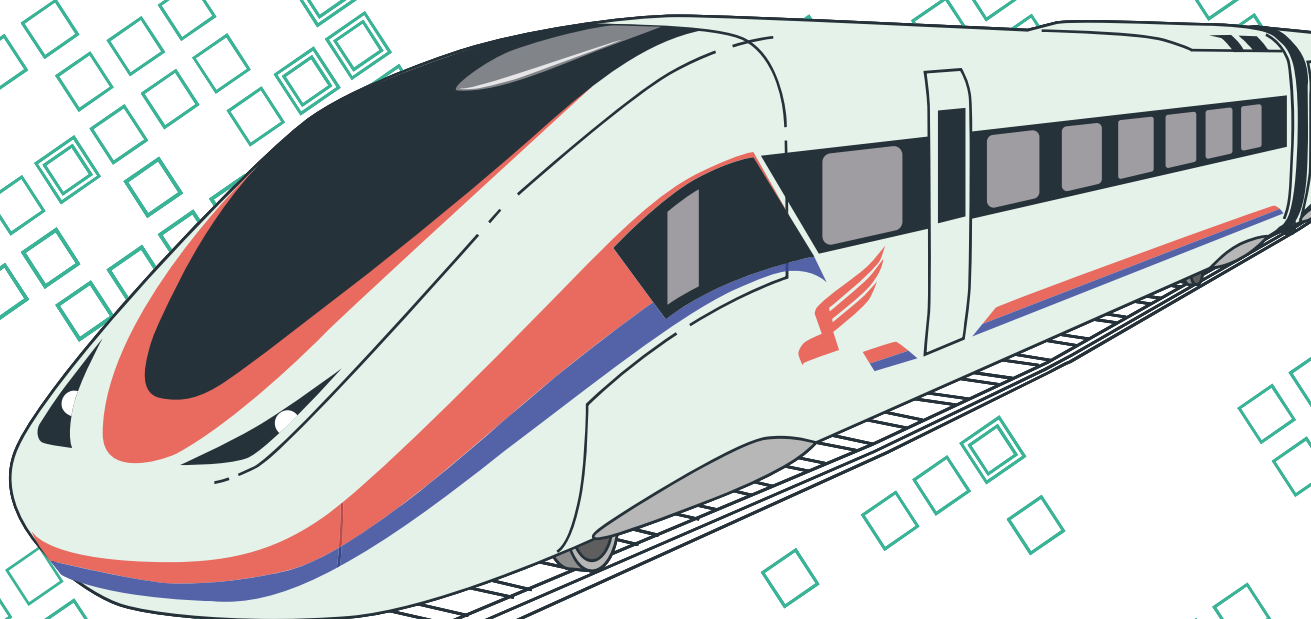


# Интеллектуальные технологии на транспорте

Intellectual Technologies  
on Transport



Выпуск 1  
2025

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ**  
**(сетевой электронный научный журнал)**  
**Выпуск 1 (41), 2025**  
ISSN 2413-2527

---

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

**Учредитель**

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

**Издатель**

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

**Адрес редакции:**

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

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

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

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

Периодичность выхода — 4 номера в год.

---

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

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

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Сопредседатели редакционного совета:**

**Валинский О. С.**, к. т. н., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Чаркин Е. И.**, зам. гендиректора по ИТ ОАО «РЖД», Москва, РФ

**Ададуров С. Е.**, д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ

**Дудин А. Н.**, д. ф.-м. н., проф., БГУ, Минск, Беларусь

**Корниенко А. А.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Макаренко С. И.**, д. т. н., доц., ПАО «Интелтех»,

С.-Петербург, РФ

**Меркурьев Ю. А.**, Dr. Habil., проф., член Латвийской АН,

РТУ, Рига, Латвия

**Титова Т. С.**, д. т. н., проф., первый проректор ПГУПС,

С.-Петербург, РФ

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Александрова Е. Б.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Басыров А. Г.**, д. т. н., проф., ВКА, С.-Петербург, РФ

**Баталов Д. И.**, к. т. н., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Безродный Б. Ф.**, д. т. н., проф., НИИАС, Москва, РФ

**Благовещенская Е. А.**, д. ф.-м. н., проф., ПГУПС,

С.-Петербург, РФ

**Бубнов В. П.**, д. т. н., проф., С.-Петербург, РФ

**Булавский П. Е.**, д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Василенко М. Н.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Глухов А. П.**, д. т. н., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Гуда А. Н.**, д. т. н., проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, РФ

**Ермаков С. Г.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Заборовский В. С.**, д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ

**Канаев А. К.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Котенко А. Г.**, д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ

**Куренков П. В.**, д. э. н., к. т. н., проф., РУТ (МИИТ),

Москва, РФ

**Лецкий Э. К.**, д. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ

**Наседкин О. А.**, к. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Никитин А. Б.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Новиков Е. А.**, д. т. н., доц., ВКА, С.-Петербург, РФ

**Охтилев М. Ю.**, д. т. н., проф., НИО ЦИТ «Петрокомета»,

С.-Петербург, РФ

**Привалов А. А.**, д. воен. н., проф., Академия войск

национальной гвардии, С.-Петербург, РФ

**Соколов Б. В.**, д. т. н., проф., СПб ФИЦ РАН,

С.-Петербург, РФ

**Таранцев А. А.**, д. т. н., проф., ИПТ РАН, С.-Петербург, РФ

**Утепбергенов И. Т.**, д. т. н., проф., АУЭС, Алматы, Казахстан

**Фазылов Ш. Х.**, д. т. н., проф., НИИ развития цифровых

технологий и ИИ, Ташкент, Узбекистан

**Хабаров В. И.**, д. т. н., проф., СГУПС, Новосибирск, РФ

**Ходаковский В. А.**, д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

**Чехонин К. А.**, д. ф.-м. н., доц., ХВИЦ ДВО РАН,

Хабаровск, РФ

**Intellectual Technologies on Transport**  
**(Network electronic scientific journal)**  
**Issue 1 (41), 2025**  
ISSN 2413-2527

---

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

**Founder**

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

**Publisher**

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

Frequency of release — 4 issues per year.

**Editorial address:**

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

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

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

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

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

---

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

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

**EDITORIAL COUNCIL MEMBERS**

**Co-chairs of the Editorial Council:**

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

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

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

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

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

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

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

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

**EDITORIAL BOARD MEMBERS**

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

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

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

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

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

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

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

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

**Glukhov A. P.**, PSTU, St. Petersburg, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Okhtilev M. Yu.**, Prof., JSC "Petrokomet", St. Petersburg, Russia

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

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

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

**Utebergenov I. T.**, Prof., AUPET, Almaty, Kazakhstan

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

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

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

**Chekhonin K. A.**, Prof., Khabarovsk FRC RAS,

Khabarovsk, Russia

## Содержание

### Искусственный интеллект и транспортные системы

**Барановский А. М., Бобриков Д. А.**

Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий . . . . . 5

**Лецкий Э. К., Гуров А. И.**

Интегрирование искусственного интеллекта в функциональное тестирование критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта . . . . . 14

### Математическое моделирование и системный анализ

**Дорофеева Ю. А., Бычков М. Н., Карванен М. Д., Красавин П. А.**

Анализ стратегий движения поездов при временных задержках с использованием равновесия Нэша . . . . . 20

**Липанов И. Д., Хомоненко А. Д., Молодкин И. А.**

Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов . . . . . 27

**Павлов А. Н., Воротягин В. Н.**

Подход к моделированию прогнозных цифровых двойников сложных многорежимных объектов . . . . . 37

**Фоменко Ю. С., Хомоненко А. Д.**

Определение координат транспортного объекта при дефиците сигналов с помощью модели нечеткого вывода Такаги — Сугено . . . . . 46

**Черняховская Е. С.**

Математическая модель выкладки товаров с вложенной категоризацией на полочном пространстве торговой сети . . . . . 56

### Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей

**Ляпунов В. Е., Гильванов Р. Г., Давыдова Д., Сергеева Д. В.**

Анализ виртуальных симуляторов, используемых для обучения машинистов электропоездов . . . . . 65

### Информационная безопасность и защита данных

**Дьяченко Н. И., Забродин А. В.**

Автоматическая генерация пайплайнов CI/CD на основе метаданных проекта: новый подход к ускорению разработки программного обеспечения . . . . . 74

# Contents

## Artificial Intelligence and Transport Systems

**Baranovsky A. M., Bobrikov D. A.**

Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies . . . . . 5

**Letsky E. K., Gurov A. I.**

Artificial Intelligence Integrated into Functional Testing of Critical Information Infrastructure of Railway Transport. . . . . 14

## Mathematical Modelling and System Analysis

**Dorofeeva Yu. A., Bychkov M. N., Karvanen M. D., Krasavin P. A.**

Train Scheduling Strategies for Reducing Delays Using Nash Equilibrium . . . . . 20

**Lipanov I. D., Khomonenko A. D., Molodkin I. A.**

A Comparative Analysis of Precise Positioning Methods for Unmanned Aerial Vehicles. . . . . 27

**Pavlov A. N., Vorotyagin V. N.**

An Approach to Predictive Digital Twin Modelling of Complex Multimode Objects . . . . . 37

**Fomenko Yu. S., Khomonenko A. D.**

Detection of Transport Object Coordinates Under Signal Scarcity Using Takagi — Sugeno Fuzzy Inference Model. . . . . 46

**Cherniakhovskaia E. S.**

Mathematical Model for Product Category Assortment and Shelf Space Allocation Within a Retail Trade System . . . . . 56

## Mathematical and Software Support for Computer Complexes and Networks

**Lyapunov V. E., Gilvanov R. G., Davydova D., Sergeeva D. V.**

A Study on Virtual Simulator-Based Learning to Develop Electric Train Drivers' Skills . . . . . 65

## Information Security and Data Protection

**Dyachenko N. I., Zabrodin A. V.**

Automatic Generation of CI/CD Pipelines Based on Project Metadata: A New Approach to Accelerating Software Development. . . . . 74

УДК 004.051

## Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий

**Барановский Анатолий Михайлович**

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

**Бобриков Даниил Алексеевич**

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

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

**Для цитирования:** Барановский А. М., Бобриков Д. А. Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13

**Аннотация.** Рассматриваются современные подходы к диагностированию и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава. **Введение:** в условиях растущих требований к надежности и безопасности транспортных систем традиционные методы диагностики становятся недостаточно эффективными. **Цель:** исследовать возможности применения многоагентных и нейросетевых технологий для повышения эффективности диагностики и восстановления ИУС подвижного состава. **Методы:** в работе анализируются многоагентные системы, обеспечивающие распределенную диагностику, где агенты взаимодействуют для быстрого обнаружения и локализации неисправностей. Также исследуются нейросетевые технологии, обеспечивающие высокую точность прогнозирования неисправностей за счет анализа больших объемов данных и самообучения. **Результаты:** основной результат заключается в выявлении потенциала интеграции многоагентных и нейросетевых технологий. Показано, что их совместное применение может значительно повысить надежность, адаптивность и автономность ИУС подвижного состава. **Обсуждение:** обсуждаются перспективы создания гибридных систем, сочетающих многоагентные и нейросетевые методы. Рассматриваются их преимущества и ограничения, а также потенциал для дальнейшего улучшения ИУС в транспортных системах.

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

**2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **2.3.6** — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

## Введение

Современные информационно-управляющие системы подвижного состава требуют высокой надежности и точности диагностирования для предотвращения сбоев и отказов оборудования, обеспечения безопасности транспортных средств. Традиционные методы диагностики часто не справляются с задачами в условиях увеличивающейся сложности оборудования и роста объемов данных. Интеллектуальные подходы, включающие многоагентные системы и нейросетевые технологии, позволяют автоматизировать диагностику, быстро выявлять неисправности и прогнозировать потенциальные отказы. Цель данной статьи — проанализировать возможности этих технологий в диагностике и восстановлении работоспособности подвижного состава, изучить их преимущества и ограничения, а также перспективы дальнейшего развития.

### Современные требования к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем

С ростом сложности информационно-управляющих систем (ИУС) подвижного состава повышаются требования к их надежности и безопасности. ИУС играют центральную роль в управлении критически важными процессами, такими как контроль и управление движением, мониторинг состояния оборудования и поддержка безопасности пассажиров и грузов. Поэтому процессы диагностирования и восстановления работоспособности ИУС требуют внедрения высокоэффективных технологий, которые способны соответствовать современным требованиям к оперативности, достоверности и надежности обнаружения отказов и локализации дефектов.

### Основные проблемы и вызовы, связанные с эксплуатацией подвижного состава

Подвижной состав функционирует в условиях сложных и часто непредсказуемых эксплуатационных нагрузок, таких как вибрация, температурные колебания и другие внешние воздействия. Эти условия увеличивают вероятность износа и отка-

зов различных компонентов системы. Ключевые проблемы, которые создают дополнительные вызовы для ИУС, включают:

- неопределенность факторов, влияющих на отказ: различия в условиях эксплуатации усложняют прогнозирование поломок;
- высокая скорость износа компонентов: интенсивность работы подвижного состава приводит к быстрому износу узлов и деталей;
- сложность выявления неисправностей: отказ одного компонента может оказывать влияние на работу всей системы, что затрудняет точную локализацию неисправности.

Эти факторы создают необходимость в адаптивных и интеллектуальных подходах, которые могут учитывать сложные и динамичные условия эксплуатации [1].

### Требования к точности, оперативности и надежности диагностирования неисправностей

Современные ИУС должны обеспечивать оперативное и точное обнаружение неисправностей, а также максимально быстрое восстановление их работоспособности. К ключевым требованиям, предъявляемым к системам диагностики и восстановления, можно отнести:

1. Достоверность диагностики: интеллектуальные системы должны минимизировать вероятность ложных срабатываний и пропущенных ошибок, что особенно важно для обеспечения безопасности.
2. Высокая оперативность обнаружения неисправностей: для предотвращения выхода из строя критически важных узлов необходимо быстрое реагирование на возникновение неисправностей, а также возможность прогнозирования поломок до их фактического появления.
3. Надежность и устойчивость функционирования: системы диагностики должны сохранять работоспособность даже при частичных отказах и иметь встроенные механизмы самовосстановления, минимизирующие время простоя.

4. Автономность и возможность самообучения: поскольку подвижной состав может эксплуатироваться в условиях удаленности от комплексов технического обслуживания, интеллектуальные системы диагностики должны обладать функциями самообучения и адаптации к изменяющимся условиям.

**Потребность в автоматизированных и интеллектуальных подходах**

Традиционные методы диагностики и обслуживания подвижного состава, как правило, требуют участия операторов и специалистов, что усложняет и замедляет процесс восстановления системы при сбоях и отказах оборудования ИУС. Использование интеллектуальных технологий, таких как многоагентные и нейросетевые системы, позволяет автоматизировать диагностирование и обеспечить его высокую адаптивность. Основные преимущества интеллектуальных подходов включают:

1. Многоагентные системы: каждый агент выполняет специализированные функции в рамках общей системы, что позволяет распределить нагрузку и повысить гибкость диагностики. Многоагентные системы эффективны в задачах диагностики, так как они позволяют проводить параллельный анализ данных, полученных с различных узлов подвижного состава.

2. Нейросетевые технологии: нейронные сети способны обрабатывать большие объемы данных, распознавать сложные закономерности и адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Применение нейронных сетей позволяет прогнозировать потенциальные неисправности и обнаруживать скрытые паттерны, которые трудно выявить с помощью традиционных методов.

На рис. 1 приведена схема работы многоагентной системы по поиску и дальнейшему направлению к устранению неисправностей на железнодорожном транспорте.

На ней изображены основные этапы функционирования системы:

- датчики измеряют температуру, вибрации, напряжение и другие параметры;



Рис. 1. Схема работы многоагентной нейронной системы по поиску и дальнейшему устранению неисправностей

- сбор и анализ данных, поиск аномалий и обнаружение дефектов оборудования с помощью технологий искусственного интеллекта (ИИ);
- определение приоритетности ремонта;
- назначение бригад, запрос (поиск) необходимых для ремонта запасных частей и принадлежностей;
- восстановление работоспособности путем устранения неисправностей;
- обновление базы данных путем фиксации новых инцидентов, улучшение модели системы на основе обновленной статистики.

Таким образом, требования к диагностике и восстановлению работоспособности ИУС подвижного состава предполагают переход к интеллектуальным системам, способным быстро и точно реагировать на возникающие сбои и отказы [2–4].



## **Обзор многоагентных систем для диагностики и восстановления работоспособности ИУС**

Многоагентные системы (МАС) являются одним из перспективных подходов для диагностики и восстановления работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава. Многоагентные системы состоят из набора взаимодействующих программных агентов, каждый из которых обладает определенной степенью автономности и выполняет специализированные функции. Благодаря способности к распределенной обработке информации и координации между агентами, МАС обеспечивают гибкость, масштабируемость и устойчивость в условиях сложных и динамичных сред.

### **Понятие многоагентных систем и их роль в диагностике**

Многоагентные системы состоят из нескольких агентов, которые могут быть независимыми программными модулями, моделирующими работу отдельных компонентов или узлов информационно-управляющей системы. Каждый агент в системе:

1. Имеет свою локальную задачу: агенты могут выполнять диагностику на уровне отдельных компонентов (например, двигателей, тормозных систем) или групп компонентов, что позволяет проводить параллельный анализ и ускоряет процесс выявления неисправностей.
2. Работает автономно и адаптивно: агенты обладают механизмами самообучения и могут адаптировать свою работу под изменения в условиях эксплуатации.
3. Обменивается информацией с другими агентами: в случае выявления неисправности или отклонения в работе компонентов агент передает информацию остальным агентам, что способствует более быстрому и точному выявлению проблем на уровне всей системы.

МАС для диагностики информационно-управляющих систем используются для выполнения задач быстрого обнаружения неисправностей и предотвращения их распространения на другие части системы. В условиях подвижного состава, где сбои

могут быстро привести к аварийным ситуациям, такой подход позволяет повысить надежность и снизить риски [5].

### **Примеры применений многоагентных систем в транспортных и информационно-управляющих системах**

Применение многоагентных систем в транспортных и информационно-управляющих системах становится все более популярным, так как они предлагают распределенное и устойчивое решение для сложных задач диагностики. Приведем примеры применения.

На железнодорожном транспорте диагностика может осуществляться в режиме реального времени путем установки «агентов», отвечающих за мониторинг различных узлов, таких как тормозные системы, двигатели и системы охлаждения.

На автотранспорте диагностика, осуществляемая «агентами», контролирует работу отдельных компонентов, например двигателей, батареи или системы безопасности, позволяя автоматически проверять состояние транспортного средства и прогнозировать необходимость технического обслуживания.

В авиации программные модули помогают следить за различными системами, снижая вероятность отказа в процессе полета.

### **Преимущества и недостатки многоагентных систем для диагностики и восстановления работоспособности подвижного состава**

Преимущества использования МАС в диагностике ИУС подвижного состава (ПС) [6]:

1. Одновременный анализ данных из различных узлов позволяет сократить время диагностирования и повысить точность диагноза.
2. Программные модули работают, независимо друг от друга снижая вероятность сбоев системы диагностирования.
3. МАС легко масштабируются. Это означает, что в любой момент при необходимости можно добавить новых агентов, расширив число контролируемых элементов и возможных технических состояний ИУС.

Недостатки МАС:

1. Для совместной работы необходимо создавать сложные алгоритмы координации функционирования агентов, что, как следствие, потребует больших вычислительных ресурсов.

2. Чем больше агентов, тем больше данных, а это означает что необходима надежная инфраструктура для их передачи и обработки.

3. Чем сложнее условия функционирования ИУС, тем выше требования к процессам самообучения систем, а значит, увеличивается сложность их разработки.

Исходя из вышеперечисленных преимуществ и недостатков можно сделать вывод, что МАС обладают большим потенциалом в диагностике и восстановлении ИУС ПС. Они смогут повысить надежность и адаптивность, однако их разработка связана с рядом сложностей: ограничения в вычислительных ресурсах и разветвленная инфраструктура передачи данных.

### Задачи, решаемые с помощью многоагентного подхода на транспорте

Многоагентные модели используются для моделирования транспортных потоков при однополосном движении. В основе подходов лежит концепция «о желании придерживаться при движении безопасной дистанции до лидера». Например, в работе «Введение в математическое моделирование транспортных потоков» приводится модель оптимальной скорости Нагеля — Шрекенберга, основанная на клеточных автоматах, которая является простейшей. В этой модели на каждом шаге  $t \rightarrow t + 1$  состояние всех транспортных средств в системе обновляется в соответствии со следующими правилами (здесь  $v_n$ ,  $v_{\max}$  — скорость, а  $s_n$  — координата  $n$ -го транспортного средства) [7]:

1) ускорение (отражает тенденцию двигаться как можно быстрее, не превышая максимально допустимую скорость):

$$v_n(m+1) = \min\{v_n(m) + 1, v_{\max}\};$$

2) торможение (гарантирует отсутствие столкновений с впереди идущими автотранспортными средствами):

$$v_n(m+1) = \min\{v_n(m), s_{n+1}(m) - s_n(m) - d\},$$

где  $d \sim 7,5$  м;

3) случайные возмущения (учитывают различия в поведении транспортных средств):

$$v_n(m+1) = \begin{cases} \max\{v_n(m) - 1, 0\}, & \text{с вероятностью } p, \\ v_n(m), & \text{с вероятностью } 1 - p; \end{cases}$$

4) движение:  $s_n(m+1) = s_n(m) + v_n(m)$ .

В работе [8] рассматриваются модели следования за лидерами в небольшие промежутки времени, описывая задачи ускорения и торможения, а также задачи дискретного выбора, возникающие в ответ на транспортный поток. Каждый агент использует свой стиль вождения исходя из следующих параметров: время реакции, желаемая скорость и т. п., а также используются внутренние характеристики агента, необходимые для описания опыта водителя. Учитываются внешние воздействия на систему, поскольку они будут влиять на состояние и поведение агента в различных ситуациях.

### Использование нейросетевых технологий для интеллектуального диагностирования

Технология нейронных сетей стала одним из наиболее востребованных инструментов для интеллектуальной диагностики в системах управления информацией о железнодорожных транспортных средствах. Способность нейронных сетей изучать и выявлять скрытые закономерности в больших объемах данных делает их ценным компонентом для анализа сложных систем, обладающим высокой степенью согласованности и совместимости с существующими техническими средствами контроля и диагностирования ИУС [9]. В случае железнодорожных транспортных средств нейронные сети могут обрабатывать данные с нескольких датчиков и обнаруживать неисправности предсказуемо рано, что значительно снижает риск внезапных отказов и повышает безопасность эксплуатации ИУС.

Одним из наиболее эффективных приложений нейронных сетей для диагностики ИУС является прогнозирование отказов на основе данных в

реальном времени. На основе анализа этих данных нейронная сеть может выявлять нарушения в работе различных узлов, таких как тормозные системы, двигатели и электрооборудование. Это возможно благодаря глубокому обучению, которое позволяет сети обнаруживать неявные модели поведения системы и делать выводы о возможных отклонениях [10]. Например, такие улучшения, как рекуррентные нейронные сети (Recurrent neural network, RNN) и длинная цепь элементов краткосрочной памяти (Long short-term memory, LTSM), могут анализировать данные временных рядов и прогнозировать будущее состояние компонентов системы, что важно для своевременных мер по предотвращению сбоев и отказов ИУС.

Технология нейронных сетей также позволяет создавать адаптивные диагностические системы, которые могут повысить точность прогнозирования и диагностики с течением времени. Нейронные сети, извлекающие уроки из прошлых данных, могут распознавать распространенные неисправности и адаптироваться к новым условиям вождения, что делает их пригодными для использования в транспортных средствах, движущихся в сложных и изменяющихся условиях. Например, сверточные нейронные сети (Convolutional neural network, CNN) могут эффективно осуществлять обработку больших объемов данных с датчиков изображения и могут помочь в визуальном осмотре деталей транспортных средств, таких как колеса, кузов, тормозные системы и токоприемники [2, 3, 11].

Внедрение технологии нейронных сетей в диагностику требует не только обработки больших данных, но и создания надежной инфраструктуры для их хранения и анализа. В этом контексте востребованы облачные вычисления и распределенные базы данных, которые могут хранить и обрабатывать данные в режиме реального времени. Облачная платформа создает возможности для удаленного управления и мониторинга транспортных средств, позволяя проводить диагностику и ремонт удаленно, уменьшая необходимость вмешательства человека и

ускоряя процесс восстановления работоспособности системы.

Основными преимуществами технологии нейронных сетей в диагностике транспортных средств являются высокая точность, скорость обработки данных и способность к самообучению. Однако в некоторых случаях, таких как потребность в больших вычислительных ресурсах или сложность настройки модели для работы в режиме реального времени, ошибки могут возникать из-за отсутствия обучающих данных или неправильных настроек сети. В этом случае необходимы точная настройка и дополнительные меры для повышения надежности и точности модели. Таким образом, использование технологии нейронных сетей позволяет не только точно и своевременно прогнозировать возможные сбои, но и гибко адаптироваться к новым условиям эксплуатации, что значительно увеличивает вероятность правильных решений (диагнозов) интеллектуальной диагностики. Это позволяет объединить преимущества обеих технологий для повышения надежности и эффективности диагностики и восстановления работоспособности ИУС транспортных средств на основе новых алгоритмов обучения распознаванию и поиску оптимальных решений [11–13].

## **Заключение**

Приведен обзор интеллектуальных подходов к диагностированию и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава на основе многоагентных и нейросетевых технологий. Современные транспортные системы предъявляют высокие требования к надежности и скорости реагирования на неисправности, что делает традиционные методы диагностики и ремонта менее эффективными в условиях усложнения оборудования и увеличения объемов данных. Интеллектуальные системы, использующие многоагентные архитектуры и нейросетевые алгоритмы, предлагают эффективные решения для удовлетворения этих требований, объединяя преимущества распределенной диагностики, автоматизированного анализа и самообучения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кон Е. Л., Кулагина М. М. Надежность и диагностика компонентов инфокоммуникационных и информационно-управляющих систем: учебное пособие. Пермь: Пермский нац. исслед. политехн. ун-т, 2012. 395 с.
2. Язынин В. С., Барановский А. М. Модель информационной системы контроля характеристик токоприемника на основе применения 3D-сканирования и нейросетевых технологий // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, Россия, 17–24 апреля 2023 г.): в 2 т. Т. 1. СПб.: ПГУПС, 2023. С. 97–102.
3. Язынин В. С., Барановский А. М., Забродин А. В. Модель системы дистанционного контроля состояния электроподвижного состава с применением искусственных нейронных сетей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 1 (33). С. 27–37. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37.
4. Харченко В. С., Эльяси Комари И., Горбенко А. В. Оценка надежности информационно-управляющих систем на основе иерархических FME(C)A-таблиц и марковских цепей: модели, методика и информационная технология // Научные ведомости Белгородского государственного университета. История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. № 19 (114), Вып. 20/1. С. 169–178.
5. Исаев И. Д. Многоагентные системы, алгоритм распознавания образов интеллектуальными агентами // Вестник науки. 2023. № 11 (68), Т. 4. С. 651–659.
6. Алибеков Б. И., Мамаев Э. А. Мультиагентные системы в логистике: информационно-аналитические аспекты // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2017. Т. 32, Вып. 4. С. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62.
7. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие / под ред. А. В. Гасникова. 2-е изд., испр. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 428 с.
8. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation // Multi-Agent Systems: Simulation and Applications / A. M. Uhrmacher, D. Weyns (eds.). Boca Raton (FL): CRC Press, 2009. Pp. 325–356.
9. Бочков А. П., Барановский А. М., Гильванов Р. Г. Оценка согласованности и совместимости технических систем в составе сложных организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 284–301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109.
10. Выучейская М. В., Крайнова И. Н., Грибанов А. В. Нейросетевые технологии в диагностике заболеваний (обзор) // Журнал медико-биологических исследований. 2018. Т. 6, № 3. С. 284–294. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2018.6.3.284.
11. Использование искусственных нейронных сетей на Российских железных дорогах для контроля токоприемников поездов / В. С. Язынин, А. М. Барановский, А. А. Воробьев, И. Ю. Романова // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2023. Т. 13, № 1. С. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287.
12. Хамидулин Т. Г. Применение искусственных нейронных сетей в транспортной отрасли / Т. Г. Хамидулин; науч. рук. О. С. Козлова // Экономика и социум. 2019. № 4 (59). С. 851–858.
13. Adapted Model Neural-Like Hopfield Network and the Algorithm of Its Training for Finding the Roots Systems of Linear Algebraic Equations / A. P. Gluhov, A. M. Baranovskiy, Y. S. Fomenko, A. P. Bochkov // Artificial Intelligence in Intelligent Systems (CSOC 2021): Proceedings of the 10th Computer Science On-line Conference 2021 (Zlín, Czech Republic, April 2021) / R. Silhavy (ed.). Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 229. Cham: Springer Nature, 2021. Pp. 386–395. DOI: 10.1007/978-3-030-77445-5\_36.

Дата поступления: 11.02.2025

Решение о публикации: 20.02.2025

# Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies

**Anatoly M. Baranovsky**

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

**Daniil A. Bobrikov**

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

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

**For citation:** Baranovsky A. M., Bobrikov D. A. Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13. (In Russian)

**Abstract.** *The article considers modern approaches to diagnostics and recovery of the rolling stock information management systems (IMS). **Introduction:** in the context of increasing demands on the transport system reliability and safety, traditional diagnostic methods are becoming ineffective. **Purpose:** to explore the possibilities of using multi-agent and neural network technologies to improve the IMS diagnostics and recovery efficiency on the rolling stock. **Methods:** the paper analyzes multi-agent systems that provide distributed diagnostics where agents interact for malfunction detection and localization. Neural network technologies that ensure high accuracy of fault prediction through the analysis of large amounts of data and self-learning are also being investigated. Results: the main result is to identify the potential for integrating multi-agent and neural network technologies. Their combined use can significantly increase the reliability, adaptability and autonomy of the rolling stock IMS. **Discussion:** the prospects of creating hybrid systems combining multi-agent and neural network methods are discussed. Their advantages and limitations are considered and the potential for further improvement of transport system IMS is illustrated.*

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

## REFERENCES

1. Kon E. L., Kulagina M. M. Nadezhnost i diagnostika komponentov infokommunikatsionnykh i informatsionno-upravlyayushchikh sistem: uchebnoe posobie [Reliability and diagnostics of components of infocommunication and information-control systems: A tutorial]. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2012, 395 p. (In Russian)
2. Yazynin V. S., Baranovsky A. M. Model informatsionnoy sistemy kontrolya kharakteristik tokopriemnika na osnove primeneniya 3D-skanirovaniya i neyrosetevykh tekhnologiy [Model of an Information System for Monitoring the Characteristics of a Pantograph Based on the Use of 3D Scanning and Neural Network Technologies], *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXXIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists]*, Saint Petersburg, Russia, April 17–24, 2023. Vol. 1. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University, 2023, Pp. 97–102. (In Russian)
3. Yazynin V. S., Baranovsky A. M., Zabrodin A. V. Model sistemy distantsionnogo kontrolya sostoyaniya elektropodvizhnogo sostava s primeneniem iskusstvennykh neyronnykh setey [The Model of Remote Monitoring System for Electric Rolling Stock Condition Using Artificial Neural Networks], *Intellektualnye tekhnologii na transporte*

[*Intellectual Technologies on Transport*], 2023, No. 1 (33), Pp. 27–37. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37. (In Russian)

4. Kharchenko V. S., Elyasi Komari I., Gorbenko A. V. Otsenka nadezhnosti informatsionno-upravlyayushchikh sistem na osnove ierarkhicheskikh FME(C)A-tablits i markovskikh tsepey: modeli, metodika i informatsionnaya tekhnologiya [Instrumentation and Control Systems Dependability Assessment Using Hierarchical FME(C)A-Tables and Markov's Chains: Models, Technique and Information Technology], *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin. History. Political Science. Economics. Information Technologies], 2011, No. 19 (114), Iss. 20/1, Pp. 169–178. (In Russian)

5. Isaev I. D. Mnogoagentnye sistemy, algoritm raspoznavaniya obrazov intellektualnymi agentami [Multi-Agent Systems, Algorithm for Pattern Recognition by Intelligent Agents], *Vestnik Nauki*, 2023, No. 11 (68), Vol. 4, Pp. 651–659. (In Russian)

6. Alibekov B. I., Mamaev E. A. Multiagentnye sistemy v logistike: informatsionno-analiticheskie aspekty [Multi-Agent Systems of Logistics: Information and Analytical Aspects], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennyye nauki* [Herald of Dagestan State University. Series 1. Natural Sciences], 2017, Vol. 32, Iss. 4, Pp. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62. (In Russian)

7. Gasnikov A. V. (ed.) Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov: uchebnoe posobie [Introduction to mathematical modeling of traffic flows: A tutorial]. Moscow, Moscow Center for Continuous Mathematical Education, 2013, 428 p. (In Russian)

8. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation. In: *Uhrmacher A. M., Weyns D. (eds.) Multi-Agent Systems: Simulation and Applications*. Boca Raton (FL), CRC Press, 2009, Pp. 325–356.

9. Bochkov A. P., Baranovskii A. M., Gilvanov R. G. Otsenka soglasovannosti i sovместimosti tekhnicheskikh sistem v sostave slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistem [Assessment of Consistency and Compatibility of Technical Systems in Complex Organizational and Technical Systems], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, No. 1, Pp. 284–301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109 (In Russian)

10. Vyucheykaya M. V., Kraynova I. N., Gribanov A. V. Neyrosetevye tekhnologii v diagnostike zabolevaniy (obzor) [Neural Network Technologies in Medical Diagnosis (Review)], *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy* [Journal of Medical and Biological Research], 2018, Vol. 6, No. 3, Pp. 284–294. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2018.6.3.284. (In Russian)

11. Yazinin V. S., Baranovskiy A. M., Vorobyev A. A., Romanova I. Yu. Ispolzovanie iskusstvennykh neyronnykh setey na Rossiyskikh zheleznykh dorogakh dlya kontrolya tokopriemnikov poezdov [The Use of Artificial Neural Networks on Russian Railways to Control Current Collectors of Trains], *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*, 2023, Vol. 13, No. 1, Pp. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287. (In Russian)

12. Khamidulin T. G. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey v transportnoy otrasli [Application of Artificial Neural Networks in the Transport Industry], *Ekonomika i sotsium* [Economics and Society], 2019, No. 4 (59), Pp. 851–858. (In Russian)

13. Gluhov A. P., Baranovskiy A. M., Fomenko Y. S., Bochkov A. P. Adapted Model Neural-Like Hopfield Network and the Algorithm of Its Training for Finding the Roots Systems of Linear Algebraic Equations. In: *Silhavy R. (ed.) Artificial Intelligence in Intelligent Systems (CSOC 2021): Proceedings of the 10th Computer Science On-line Conference 2021 (Zlín, Czech Republic, April 2021), Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 229. Cham, Springer Nature, 2021, Pp. 386–395. DOI: 10.1007/978-3-030-77445-5\_36.

Received: 11.02.2025

Accepted: 20.02.2025

УДК 336.7:004.896

## Интегрирование искусственного интеллекта в функциональное тестирование критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта

**Лецкий Эдуард Константинович**

— д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Цифровые технологии управления транспортными процессами». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, моделирование надежности. E-mail: letzky@mail.ru

**Гуров Антон Иванович**

— магистр, аспирант кафедры «Цифровые технологии управления транспортными процессами». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, моделирование надежности. E-mail: gur.16@mail.ru

Российский университет транспорта, Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

**Для цитирования:** Лецкий Э. К., Гуров А. И. Интегрирование искусственного интеллекта в функциональное тестирование критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 14–19. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-14-19

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления использования искусственного интеллекта в функциональном тестировании критической информационной инфраструктуры системы бронирования и продажи билетов на железнодорожном транспорте с целью повышения эффективности, надежности и скорости тестирования, а также сокращения затрат и рисков, связанных с потенциальными сбоями и отказами системы. **Метод исследования:** анализ возможностей методов искусственного интеллекта для совершенствования технологий функционального тестирования. **Результаты исследования:** предложено использовать методы искусственного интеллекта при построении оптимальных тестов, выборе стратегий тестирования, а также при прогнозировании сбоев и отказов автоматизированной системы управления бронированием и продажей билетов. **Практическая значимость** заключается в возможности повышения эффективности функционального тестирования систем критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** функциональное тестирование, искусственный интеллект, железнодорожный транспорт, критические информационные инфраструктуры, цифровые технологии

**1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки); **2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

### Введение

С развитием искусственного интеллекта, технологий больших данных, сенсорных устройств и интернета вещей транспортная система превращается в высокотехнологичный организм, способный оптимизировать грузовые перевозки, повысить безопасность и обеспечить комфортное перемещение пассажиров.

Технологии искусственного интеллекта позволяют решать большое количество новых задач, которые ранее не решались или решались недостаточно эффективно. Например, последние исследования показывают, что в задачах классификации изображений современные системы искусственного интеллекта уже превзошли возможности человека, а технологии нейронных сетей открывают

колоссальный потенциал для автоматизации процессов решения множества задач, в частности на железнодорожном транспорте [1].

Железнодорожный транспорт играет жизненно важную роль в экономике и повседневной жизни общества. Критические информационные инфраструктуры (КИИ) железнодорожного транспорта — это совокупность информационных систем и сетей передачи данных, от бесперебойной работы которых зависят безопасность, надежность и эффективность функционирования железнодорожной системы в целом. Отказ или сбой в работе этих систем может привести к разрушению или значительному ухудшению транспортной инфраструктуры, экономическим потерям, рискам для жизни и здоровья людей. В состав объектов железнодорожного транспорта с КИИ входит множество информационных систем, поддерживающих различные функции, обеспечивающие работу железнодорожного транспорта. В данной статье рассматриваются КИИ системы бронирования и продажи билетов на железнодорожном транспорте (АСУ «Экспресс» [2]), входящей в установленный нормативными документами перечень объектов с критической информационной инфраструктурой [3]. Одним из способов обеспечения надежности и безопасности критической информационной инфраструктуры является проведение ее непрерывного или циклического функционального тестирования. Функциональное тестирование АСУ «Экспресс» предназначено для обеспечения готовности системы к выполнению запросов пользователей. Эффективность тестирования зависит от многих факторов, таких, например, как качество тестов и стратегия тестирования (частота и порядок запуска тестов), интенсивность поступления запросов, квалификация пользователей (возможность ошибок при работе с системой) и пр. Интеграция искусственного интеллекта в функциональное тестирование может существенно улучшить его эффективность.

### Основная часть

В настоящее время АСУ «Экспресс» объединяет более 7000 пользователей и каналов обслужива-

ния. За сутки в АСУ «Экспресс» поступает более 10 миллионов обращений, при этом в пиковые периоды система должна обрабатывать не менее 2000 обращений каналов обслуживания в секунду [2]. При обработке указанных объемов данных любые инциденты (сбои, отказы, ошибки при работе с системой и пр.) могут привести к существенному ухудшению качества обслуживания пользователей.

Появляется потребность в системе проведения автоматизированных функциональных тестов с использованием искусственного интеллекта для выявления и быстрого реагирования на возникающие проблемы.

По своей сути искусственный интеллект — комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека или превосходящие их. Комплекс технологических решений включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных и поиску решений [4]. Искусственный интеллект может принимать решения, делать переводы текстов, анализировать исторические данные и многое другое, на что ранее было способно только человеческое мышление. Кроме того, модели, создаваемые с использованием искусственного интеллекта, имеют высокую адаптивность и гибкость, что позволяет им обучаться на новых данных и подстраиваться под изменяющиеся условия.

Рассмотрим задачи, решение которых с использованием методов искусственного интеллекта позволит повысить эффективность функционального тестирования системы АСУ «Экспресс» на железнодорожном транспорте:

1. Выявление степени влияния внешних (время года, время суток, погода и пр.) и внутренних (интенсивность потока запросов, состояние инфраструктуры и пр.) факторов на вероятность инцидента (сбоя, отказа информационной инфраструктуры).



2. Построение оптимальных (по заданным критериям) тестов для различных целей тестирования.

3. Выбор стратегии тестирования (последовательности тестов) для заданной совокупности значений внешних и внутренних факторов.

4. Прогнозирование сбоев и отказов для заданной совокупности значений внешних и внутренних факторов.

В контексте функционального тестирования процессов бронирования билетов железнодорожного транспорта с помощью информационных ресурсов тестирование проводится запуском средств автоматизации, с использованием предопределенных тестировщиком кейс-тестов. Кейс-тест — это набор тестовых входных данных, условий выполнения и ожидаемых результатов, разработанный для конкретной цели, например для отработки определенного пути программы или проверки соответствия определенному требованию [5]. Тестирование проводится на промышленных серверах в режиме реального времени.

Агент моделируется как виртуальный пользователь, который взаимодействует с сайтом или мобильным приложением, изучает среду сайта, определяя действия (нажатие кнопок, заполнение форм с данными и т. д.), а также результаты этих действий (переходы между страницами, ошибки заполнения и нажатий, ошибки поведения и раз-

рыва коннекта). Для начала осуществляется сбор данных о взаимодействии реальных пользователей с сайтом продажи билетов, которые потребуются для создания реалистичной среды обучения. На следующем этапе производится настройка агента, определяются возможные действия, которые искусственный интеллект может предпринять, и опощрение, которое получает за выполнение определенных задач. На этапе обучения производится запуск агента в смоделированной среде, где он взаимодействует с сайтом, искусственный интеллект получает обратную связь, тем самым постепенно обучается оптимальной стратегии тестирования. После обучения искусственный интеллект может генерировать тестовые стратегии, которые покрывают различные функциональные пути сайта. Автоматизация выполнения тестовых стратегий с использованием виртуальных пользователей или инструментов автоматизации является заключительным этапом перед анализом результатов тестов для выявления дефектов, улучшения покрытия и оптимизации стратегии тестирования.

В данном случае искусственный интеллект является функциональной надстройкой и интегрируется в подсистему функционального тестирования с целью повышения ее эффективности. Пример архитектуры подсистемы функционального тестирования представлен на рис. 1.

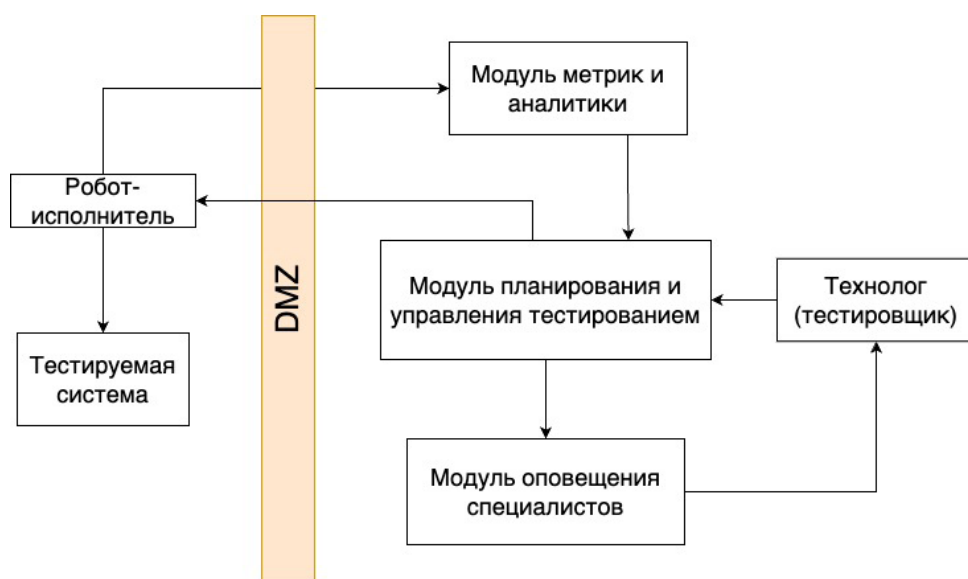


Рис. 1. Архитектура подсистемы функционального тестирования

Подсистема функционального тестирования состоит из нескольких модулей. Исполнителями являются автоматизированные роботы, которые выполняют последовательность кейс-тестов на тестируемых модулях. В целях безопасности передачи данных по сети между исполнителями и внутренними модулями с основной логикой используется демилитаризованная зона. Демилитаризованная зона (DMZ) — сегмент сети, содержащий общедоступные сервисы. Целью DMZ является обеспечение дополнительной безопасности в локальной сети, позволяющей минимизировать ущерб в случае атаки на один из общедоступных сервисов, так как злоумышленник не будет иметь прямого доступа к оборудованию за ее пределами. В нашем случае это сайт и приложение бронирования билетов на железнодорожном транспорте, находящиеся в открытом доступе. Искусственный интеллект, взаимодействующий с модулем планирования и управления тестированием, позволит составлять оптимальные стратегии тестирования и их графики проведения. Осуществление контроля сформированного искусственным интеллектом графика запуска и кейс-тестов остается за технологом (тестировщиком). Вторым важным по значимости является модуль аналитики и метрик, который непрерывно осуществляет мониторинг тестируемых систем и хранит результаты в базе данных. Накопленная информация может быть использована при предиктивном анализе сбойных ситуаций и отказов с помощью методов искусственного интеллекта.

Кроме того, подсистема включает модуль оповещения специалистов, позволяющий технологам оперативно управлять всеми механизмами функционирующей системы как с мобильного устройства, так и с рабочего компьютера через имеющиеся безопасные каналы связи.

## Заключение

Применение искусственного интеллекта для функционального тестирования сайта и приложения бронирования билетов на железнодорожном транспорте может значительно повысить эффективность тестирования, сократить время на поиск и исправление ошибок, а также улучшить качество взаимодействия с клиентами.

Исследования в области интеграции искусственного интеллекта в функциональное тестирование критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта целесообразно продолжить в следующих направлениях: использование методов машинного обучения для адаптации стратегий функционального тестирования в реальном времени в ответ на изменяющиеся условия и выявление потенциальных уязвимостей [6–8]; разработка интеллектуальных систем для анализа больших объемов данных, получаемых от сенсоров и пользовательских взаимодействий, для прогнозирования и предотвращения сбоев или отказов системы [9, 10].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов П. А. Применение технологий искусственного интеллекта для железнодорожного транспорта // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2024. № 1 (65). С. 38–41.
2. Якимова С. АСУ «Экспресс-3»: как управлять пассажирским комплексом // РЖДЦифровой. 2024. 18 июля. URL: <http://rzddigital.ru/projects/asu-ekspress-3-kak-upravlyat-passazhirskim-kompleksom/> (дата обращения: 29.01.2025).
3. Перечень типовых отраслевых объектов критической информационной инфраструктуры, функционирующих в сфере транспорта. Опубликовано 16.08.2024. 22 с. URL: <http://www.mintrans.gov.ru/documents/8/13678> (дата обращения: 29.01.2025).
4. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490: ред. от 15 февраля 2024 г. № 124.
5. IEEE/ISO/IEC 24765:2017. ISO/IEC/IEEE International Standard — Systems and Software Engineering — Vocabulary. Published 28 August 2017. New York (NY): The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. 541 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.8016712.

6. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems / R. Tang, L. De Donato, N. Bešinović, et al. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. Vol. 140, Art. No. 103679. 25 p. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679.
7. Deep Learning for Trajectory Data Management and Mining: A Survey and Beyond / W. Chen, Y. Liang, Y. Zhu, et al. // *arXiv*. 2024. Vol. 2403.14151. 25 p. DOI: 10.48550/arXiv.2403.14151.
8. Feroz Khan A. B., Perl I. Integrating Machine Learning and Deep Learning in Smart Cities for Enhanced Traffic Congestion Management: An Empirical Review // *Journal of Urban Development and Management*. 2023. Vol. 2, Iss. 4. Pp. 211–221. DOI: 10.56578/judm020404.
9. A Systematic Survey on Big Data and Artificial Intelligence Algorithms for Intelligent Transportation System / S. Abirami, M. Pethuraj, M. Uthayakumar, P. Chitra // *Case Studies on Transport Policy*. 2024. Vol. 17, Art. No. 101247. 18 p. DOI: 10.1016/j.cstp.2024.101247.
10. Boukerche A., Tao Y., Sun P. Artificial Intelligence-Based Vehicular Traffic Flow Prediction Methods for Supporting Intelligent Transportation Systems // *Computer Networks*. 2020. Vol. 182, Art. No. 107484. 21 p. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107484.

Дата поступления: 09.02.2025

Решение о публикации: 26.02.2025

## Artificial Intelligence Integrated into Functional Testing of Critical Information Infrastructure of Railway Transport

**Eduard K. Letsky** — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Department “Digital technologies for transportation process management”. Research interests: information systems, big data processing, reliability modeling. E-mail: letsky@mail.ru

**Anton I. Gurov** — Master of Engineering Sciences, Postgraduate Student of the Department “Digital technologies for transportation process management”. Research interests: information systems, big data processing, reliability modelling. E-mail: gur.16@mail.ru

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russia

**For citation:** Letsky E. K., Gurov A. I. Artificial Intelligence Integrated into Functional Testing of Critical Information Infrastructure of Railway Transport. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 14–19. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-14-19. (In Russian)

**Abstract. Purpose:** AI-driven functional testing of the critical information infrastructure such as a railway ticket booking and sales system is considered in order to increase the efficiency, reliability and speed of testing, as well as to reduce costs and risks associated with potential system failures. **Methods:** analyzing the potential of artificial intelligence methods for improving functional test technologies. **Results:** it is proposed to use artificial intelligence methods in constructing optimal tests and selecting test strategies, as well as in failure prediction in the automated ticket booking and sales system. **Practical significance:** increased functional test efficiency of critical information infrastructure systems of railway transport.

**Keywords:** functional testing, artificial intelligence, railway transport, critical information infrastructures, digital technologies

## REFERENCES

1. Popov P. A. Primenenie tekhnologiy iskusstvennogo intellekta dlya zheleznodorozhnogo transporta [Application of AI Technologies in Railway Transport], *Vestnik instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment]*, 2024, No. 1 (65), Pp. 38–41. (In Russian)
2. Yakimova S. ASU “Ekspress-3”: kak upravlyat passazhirskim kompleksom [ACS “Express-3”: How to Manage a Passenger Complex], *RZhD Tsifrovoy [RZD.Digital]*. Published online July 18, 2024. Available at: <http://rzdigital.ru/projects/asu-ekspress-3-kak-upravlyat-passazhirskim-kompleksom/> (accessed: 29.01.2025). (In Russian)
3. Perechen tipovykh otraslevykh obektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury, funktsioniruyushchikh v sfere transporta [List of typical industry objects of critical information infrastructure operating in the field of transport]. Published online August 16, 2024. Available at: <http://www.mintrans.gov.ru/documents/8/13678> (accessed: 29.01.2025). (In Russian)
4. O razvitii iskusstvennogo intellekta v Rossiyskoy Federatsii [On the Development of Artificial Intelligence in the Russian Federation]: Decree of the President of the Russian Federation of October 10, 2019 No. 490 (as amended on February 15, 2024 No. 124). (In Russian)
5. IEEE/ISO/IEC 24765:2017. ISO/IEC/IEEE International Standard — Systems and Software Engineering — Vocabulary. Published August 28, 2017. New York (NY), The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, 541 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.8016712.
6. Tang R., De Donato L., Bešinović N., et al. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, Vol. 140, Art. No. 103679, 25 p. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679.
7. Chen W., Liang Y., Zhu Y., et al. Deep Learning for Trajectory Data Management and Mining: A Survey and Beyond, *ArXiv*, 2024, Vol. 2403.14151, 25 p. DOI: 10.48550/arXiv.2403.14151.
8. Feroz Khan A. B., Perl I. Integrating Machine Learning and Deep Learning in Smart Cities for Enhanced Traffic Congestion Management: An Empirical Review, *Journal of Urban Development and Management*, 2023, Vol. 2, Iss. 4, Pp. 211–221. DOI: 10.56578/judm020404.
9. Abirami S., Pethuraj M., Uthayakumar M., Chitra P. A Systematic Survey on Big Data and Artificial Intelligence Algorithms for Intelligent Transportation System, *Case Studies on Transport Policy*, 2024, Vol. 17, Art. No. 101247, 18 p. DOI: 10.1016/j.cstp.2024.101247.
10. Boukerche A., Tao Y., Sun P. Artificial Intelligence-Based Vehicular Traffic Flow Prediction Methods for Supporting Intelligent Transportation Systems, *Computer Networks*, 2020, Vol. 182, Art. No. 107484, 21 p. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107484.

Received: 09.02.2025

Accepted: 26.02.2025

УДК 519.833.2

## Анализ стратегий движения поездов при временных задержках с использованием равновесия Нэша

- Дорофеева Юлия Александровна** — канд. физ-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика». Научные интересы: теория игр, методы оптимизации, методы принятия решений. E-mail: julana2008@yandex.ru
- Бычков Максим Николаевич** — студент бакалавриата 1-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: информационные системы, моделирование надежности, теория принятия решений. E-mail: maximus.bychkov@gmail.com
- Карванен Максим Дмитриевич** — студент бакалавриата 1-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: информационные системы, моделирование надежности, теория принятия решений. E-mail: maksimkarvanen03@gmail.com
- Красавин Павел Андреевич** — студент бакалавриата 1-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: информационные системы, моделирование надежности, теория принятия решений. E-mail: thegan354@mail.ru

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

**Для цитирования:** Дорофеева Ю. А., Бычков М. Н., Карванен М. Д., Красавин П. А. Анализ стратегий движения поездов при временных задержках с использованием равновесия Нэша // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 20–26. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-20-26

**Аннотация.** Анализ стратегий движения поездов при временных задержках с использованием равновесия Нэша представляет собой сложный процесс, который требует учета множества факторов, влияющих на эффективность и стоимость перевозок. Один из ключевых аспектов, который рассматривается в работе, — это сохранение движения поездов при условии переменных затрат времени, а именно времени простоя в связи с ремонтом железнодорожных путей или поломкой подвижного состава. В работе предложен оптимальный вариант выбора пути движения поездов по маршруту. Для нахождения кратчайшего маршрута используется алгоритм Дейкстры. В работе также анализируется среднее ожидание временных затрат для каждой стратегии. Найдено равновесие Нэша для учета взаимодействий между участниками транспортной системы. **Цель:** нахождение равновесия для движения нескольких поездов в результате возникновения внештатной ситуации и составление оптимального расписания с учетом этого фактора. Для достижения цели использованы информационные технологии, анализ данных и другие инновационные подходы. **Методы:** анализ современных инструментов и технологий, включая математическое моделирование. **Результаты:** подчеркивают важность управления движением поездов и организации работы на железнодорожном транспорте. **Практическая значимость:** анализ стратегий движения поездов при временных задержках требует комплексного подхода, который включает в себя анализ множества факторов, взаимодействие различных участников и использование современных технологий. Это позволяет не только улучшить качество обслуживания пассажиров, но и повысить общую эффективность работы железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** транспортная система, алгоритм Дейкстры, математическое ожидание, равновесие Нэша, стратегия выбора маршрута, железнодорожная сеть, эффективность маршрута

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

**Введение**

Вследствие увеличения объемов грузовых и пассажирских перевозок все более важной становится задача соблюдения установленного графика движения железнодорожного транспорта, поскольку разные отклонения от него приводят к задержкам или отмене поездов. В связи с этим особое внимание уделяется вопросам совершенствования процессов управления движением поездов, а также реализации систем поддержки принятия решений на транспорте. Основная концепция в предложенной работе заключается в применении теории игр, в которой игроками являются объекты железнодорожного транспорта. Аналогичный подход был рассмотрен в работе [1], однако важной особенностью данного исследования является применение методов искусственного интеллекта. В работе [2] используются сверточные

нейронные сети. Зарубежные исследования [3] описывают применение технологии искусственного интеллекта и игровой постановки в системах управления движением самого поезда, а также прогнозирования неисправностей подвижного состава. В работе предложено решение в виде равновесия по Нэшу, определенного в матрице выигрышей [4–11].

**Постановка задачи**

Железнодорожная транспортная система представлена в виде графа на рис. 1. В качестве конкретного примера рассматривается граф движения поездов из Санкт-Петербурга в Москву. Вершинами в данном случае будут развилки или станции, ребра — пути между ними, вес ребер представлен в виде времени в минутах.

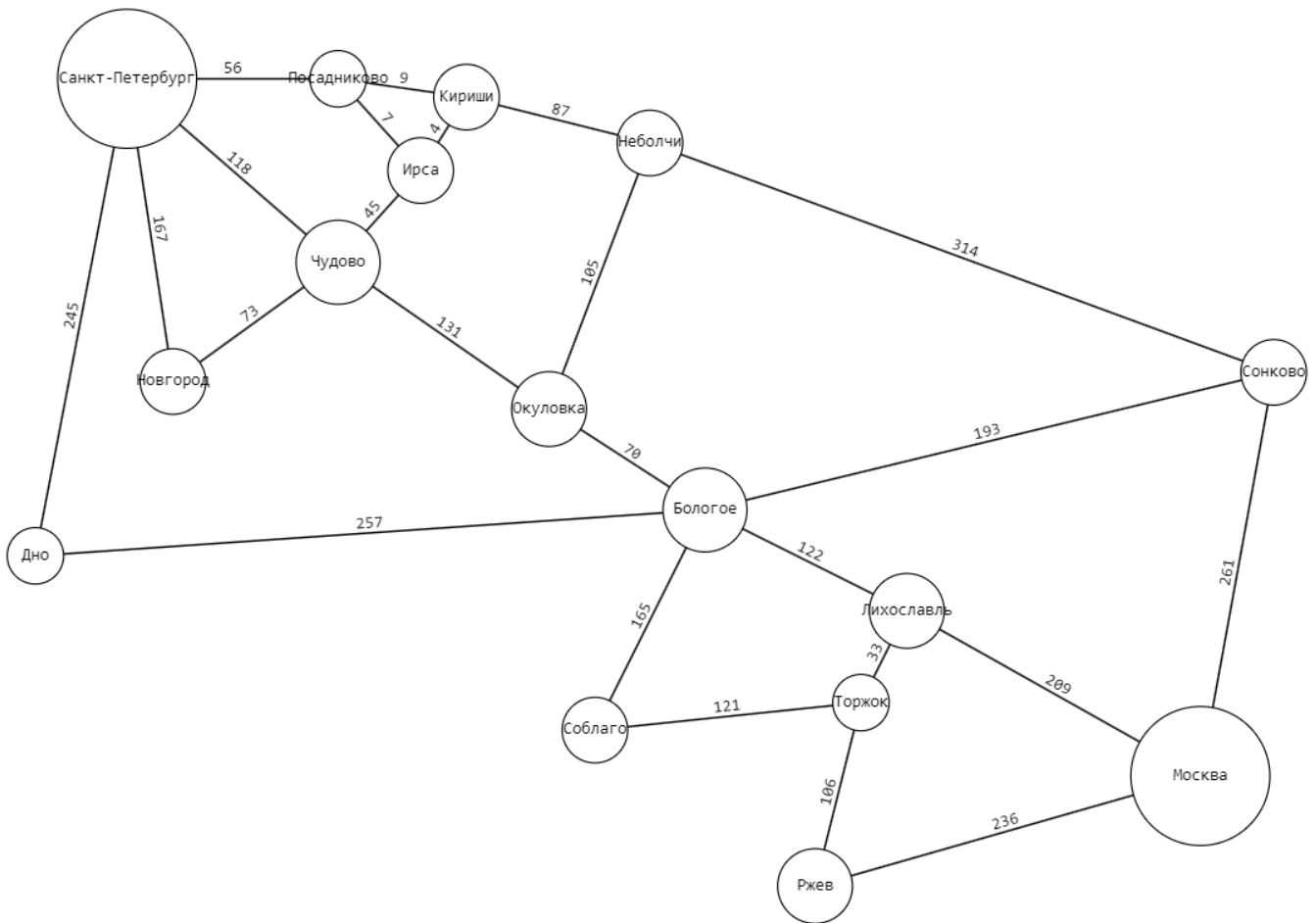


Рис. 1. Граф железнодорожной сети на участке Санкт-Петербург — Москва

Необходимо определить оптимальные пути для поездов с учетом перекрытия железнодорожных веток.

### Метод решения

Кратчайший путь между двумя вершинами графа (например, Санкт-Петербург — Чудово) может быть найден с помощью алгоритма Дейкстры. Однако, если следование по одному из маршрутов невозможно или ограничено, необходимо учитывать дополнительные факторы для преодоления маршрута:

#### Маршрут 1 (с перекрытием пути Санкт-Петербург — Чудово):

Время прохождения маршрута:  $T_1 = a + x$ , где  $a$  — время прохождения пути без перекрытия;  $x$  — дополнительное время ожидания из-за перекрытия (переменная величина).

#### Маршрут 2 (альтернативный Санкт-Петербург — Великий Новгород — Чудово):

Время прохождения маршрута:  $T_2 = b + t_{\text{ожидания}}$ , где  $b$  — время прохождения маршрута;  $t_{\text{ожидания}}$  — возможное время ожидания, например по причине загруженности линии.

Для данной постановки существует несколько стратегий прохождения пути:

- **S1:** ожидание в пункте отправления, пока маршрут 1 не освободится, затем ехать по маршруту 1.
- **S2:** немедленно отправиться по маршруту 2.
- **S3:** отправиться по маршруту 1, надеясь, что дорога откроется к моменту прибытия.

### Анализ стратегий

1. **Стратегия S1:** ожидание в пункте Санкт-Петербург, а затем ехать по маршруту 1.

В случае, если  $x$  мало, эта стратегия оказывается оптимальной. Однако если  $x$  велико, поезд теряет время, которое можно было бы потратить на движение по гарантированному маршруту 2.

2. **Стратегия S2:** движение по маршруту 2 Санкт-Петербург — Великий Новгород — Чудово.

**Преимущество:** фиксированное время, известное заранее.

**Недостаток:** если первая стратегия оптимальна, то неизбежна потеря времени при ожидании.

3. **Стратегия S3:** движение по маршруту 1.

Общее время до пункта В:

$$T_{S3} = \begin{cases} a, & \text{если } x \leq t_{\text{подъезда}} \\ t_{\text{подъезда}} + x, & \text{если } x > t_{\text{подъезда}} \end{cases},$$

где  $t_{\text{подъезда}}$  — время движения поезда до места перекрытия.

**Преимущество:** если  $x$  мало, маршрут 1 будет самым быстрым.

**Недостаток:** если  $x > t_{\text{подъезда}}$ , время ожидания может значительно превысить время проезда по маршруту 2.

Решение задачи сводится к выбору стратегии, которая минимизирует общее время  $T$ . Это зависит от вероятности  $P(x)$ , параметров  $a$ ,  $b$ ,  $t_{\text{ожидания}}$ ,  $t_{\text{подъезда}}$ .

### Условия выбора стратегии

1. **Если  $x$  мало:** стратегии S1 или S3 более предпочтительны, так как  $T_1 < T_2$ .

2. **Если  $x$  велико:** стратегия S2 более предпочтительна, так как  $T_2 < T_1$ .

3. **Если  $t_{\text{подъезда}} < x \ll b + t_{\text{ожидания}} - a$ :** S3 становится оптимальной, поскольку время преодоления пути оказывается минимальным.

### Математическое ожидание затрат времени

Для каждого сценария можно вычислить ожидаемое время:

1. Для стратегии S1:

$$E[T_{S1}] = a + E[x],$$

где  $E[x]$  — время устранения перекрытия.

2. Для стратегии S2:

$$E[T_{S2}] = b + t_{\text{ожидания}}.$$

3. Для стратегии S3:

$$E[T_{S3}] = P(x \leq t_{\text{подъезда}})a + P(x > t_{\text{подъезда}})(t_{\text{подъезда}} + E[x|x > t_{\text{подъезда}}]),$$

где  $E[x|x > t_{\text{подъезда}}]$  — условное математическое ожидание времени перекрытия, если оно превышает  $t_{\text{подъезда}}$ .

Выбирается стратегия с минимальным значением  $E[T]$ .

**Равновесие Нэша**

В задаче участвуют несколько игроков (поездных составов), рассматриваются следующие маршруты:

**Маршрут 1 (закрытый маршрут)**

Если большинство поездов решают дождаться, когда препятствие на пути 1 будет устранено, это может ускорить устранение  $x$  (например, службы экстренной помощи могут ускорить процесс из-за высокого спроса). Однако, если длительность перекрытия будет увеличена, общее время движения всех поездов увеличится.

**Маршрут 2 (альтернативный маршрут)**

Когда большинство поездов выбирают маршрут 2, возникают задержки  $t_{ожидания}$ , что увеличивает общее время  $T_2$ .

Достижение равновесия Нэша гарантировано, если ни один из игроков не может уменьшить свое время, не поменяв стратегию.

$N$  — количество игроков (поездов). Каждый игрок выбирает одну из трех стратегий: S1, S2, S3. В данном случае это маршруты. Выигрышем является время.

Распределение участников:

1.  $n_1$ : число игроков, выбравших стратегию S1.
2.  $n_2$ : число игроков, выбравших стратегию S2.
3.  $n_3 = N - n_1 - n_2$ : число игроков, выбравших стратегию S3.

Время ожидания на маршруте 2  $t_{ожидания}$  линейно растет с количеством игроков  $n_2$ :  $t_{ожидания} = \alpha n_2$ , где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от пропускной способности маршрута.

Общее время всех игроков складывается из их стратегий:

$$T_{общ} = n_1 T_{S1} + n_2 T_{S2} + n_3 T_{S3}.$$

Цель состоит в том, чтобы минимизировать  $T_{общ}$  путем нахождения равновесного распределения  $(n_1, n_2, n_3)$ . Для достижения равновесия по Нэшу необходимо, чтобы ни один игрок не мог сократить свое время, изменив свою стратегию. Для этого мы сравним время, затрачиваемое на все стратегии:

1. Если  $T_{S1} < T_{S2}$  и  $T_{S1} < T_{S3}$ , игроки выбирают S1.
2. Если  $T_{S2} < T_{S1}$  и  $T_{S2} < T_{S3}$ , игроки выбирают S2.

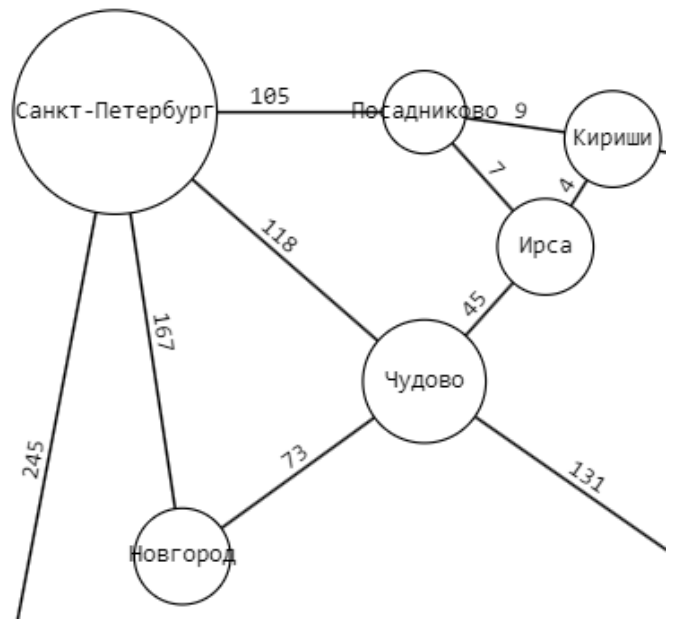


Рис. 2. Область графа, рассматриваемая в задаче

3. Если  $T_{S3} < T_{S1}$  и  $T_{S3} < T_{S2}$ , игроки выбирают S3. Равновесие достигается, когда распределение игроков  $(n_1, n_2, n_3)$  стабильно и время, затрачиваемое на каждую стратегию, сбалансированно.

Составим матрицу выигрышей для ситуации, где трое игроков ( $Player1, Player2, Player3$ ) выбирают одну из трех стратегий (граф движения на рис. 2):

- S1 — ожидание в исходном пункте (Санкт-Петербург);
- S2 — немедленно отправляться по гарантированному маршруту (Санкт-Петербург — Великий Новгород — Чудово);
- S3 — отправляться по маршруту 1 при условии, что перекрытие устранится.

**Параметры задачи (пример)**

1.  $a = 2$  часа (фиксированное время маршрута Санкт-Петербург — Чудово без перекрытий).
2.  $b = 4$  часа (фиксированное время альтернативного маршрута Санкт-Петербург — Великий Новгород — Чудово без ожидания).
3.  $X_{max} = 2$  (максимальное время перекрытия  $x$ ).
4.  $t_{ожидания} = \alpha n_2$ , где  $\lambda = 0,5$  (дополнительное время на маршруте 2 из-за загрузки).
5. Вероятность

$$P(x \leq t_{подъезда}) = \frac{t_{подъезда}}{X_{max}} = 0,5 \text{ при } t_{подъезда} = 1.$$



Таблица 1

Матрица выигрышей для трех участников

Стратегии	$T_{Player1}$	$T_{Player2}$	$T_{Player3}$
$(S_1, S_1, S_1)$	4:00	4:00	4:00
$(S_1, S_1, S_2)$	4:00	4:00	4:30
$(S_1, S_2, S_2)$	4:00	5:00	5:00
$(S_1, S_2, S_3)$	4:00	5:00	3:00
$(S_1, S_3, S_3)$	4:00	3:00	3:00
$(S_2, S_2, S_2)$	5:30	5:30	5:30
$(S_2, S_2, S_3)$	5:30	5:30	3:00
$(S_2, S_3, S_3)$	5:30	3:00	3:00
$(S_3, S_3, S_3)$	<b>3:00</b>	<b>3:00</b>	<b>3:00</b>
$(S_3, S_3, S_2)$	3:00	3:00	5:00
$(S_3, S_2, S_2)$	3:00	5:00	5:00

Выигрыш для каждого игрока — это затраты времени на достижение конечного пункта.

В результате была получена матрица выигрышей времени (табл. 1).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Интеллектуальная система оперативной корректировки графика движения поездов / И. С. Макаров, Р. А. Горбачев, Н. В. Фомин, А. Н. Новиков [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 5. С. 22–25.
2. Intelligent Control Systems for Maintenance of Railway Rolling Stock / E. M. Zakharova, F. F. Paschenko, A. K. Takmazyan [et al.] // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on the Application of Information and Communication Technologies (AICT 2017) (Russia, Moscow, 20–22 September 2017). Vol. 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. Pp. 423–425.
3. A General Reinforcement Learning Algorithm That Masters Chess, Shogi, and Go Through Self-Play / D. Silver, T. Hubert, J. Schrittwieser [et al.] // Science. 2018. Vol. 362, Iss. 6419. Pp. 1140–1144. DOI: 10.1126/science.aar6404.
4. Deep Learning Advancements: Closing the Gap / A. Stipić, T. Bronzin, B. Prole, K. Pap // Proceedings of the 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) (Opatija, Croatia, 20–24 May 2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. Pp. 1087–1092. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757133.
5. Мазалов В. В. Математическая теория игр и приложения: учебное пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2016. 448 с.
6. Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Семина Е. А. Теория игр: учебное пособие. М.: Высшая школа, Книжный дом «Университет», 1998. 304 с.
7. Зоркальцев В. И., Киселева М. А. Равновесие Нэша в нелинейной транспортной модели // Оптимизация, управление, интеллект. 2007. № 1. С. 42–50.
8. фон Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение = Theory of games and economic behavior / пер. с англ. под ред. Н. Н. Воробьева. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1970. 707 с.
9. Протасов И. Д. Теория игр и исследование операций: учебное пособие. М.: Гелиос АРВ, 2003. 368 с.
10. Myerson R. B. Game theory: Analysis of conflict. Cambridge (MA), London: Harvard University Press, 1991. 581 p.

Равновесием по Нэшу является состояние:

$$T_{Player1} = T_{Player2} = T_{Player3} = 3.$$

При движении трех составов наиболее оптимальный вариант для каждого из них — отправиться по заданному маршруту с учетом времени устранения поломки пути.

Заключение

Работы на тему анализа стратегий движения поездов при временных задержках охватывают широкий спектр аспектов — от оптимизации расписаний до внедрения новых технологий. Эти исследования способствуют улучшению качества услуг, повышению безопасности и эффективности работы железнодорожного транспорта. В данном случае показан теоретико-игровой подход для решения задачи сохранения расписания движения поездов с учетом поломки путей. В перспективе планируется решить задачу поиска оптимального пути следования поездов для конкретной железнодорожной ветки с использованием игровой постановки.

11. Solomon M. M., Desrosiers J. Survey Paper — Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems // Transportation Science. 1988. Vol. 22, No. 1. Pp. 1–13. DOI: 10.1287/trsc.22.1.1.

Дата поступления: 17.02.2025

Решение о публикации: 20.02.2025

## Train Scheduling Strategies for Reducing Delays Using Nash Equilibrium

- Yulia A. Dorofeeva** — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics. Research interests: game theory, optimization methods, decision-making methods. E-mail: julana2008@yandex.ru
- Maksim N. Bychkov** — 1st year student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, reliability modelling, decision-making theory. E-mail: maximus.bychkov@gmail.com
- Maksim D. Karvanen** — 1st year student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, reliability modelling, decision-making theory. E-mail: maksimkarvanen03@gmail.com
- Pavel A. Krasavin** — 1st year student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, reliability modelling, decision-making theory. E-mail: thegan354@mail.ru

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

**For citation:** Dorofeeva Yu. A., Bychkov M. N., Karvanen M. D., Krasavin P. A. Train Scheduling Strategies for Reducing Delays Using Nash Equilibrium. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 20–26. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-20-26. (In Russian)

**Abstract.** *Analysis of train movement strategies for reducing delays using Nash equilibrium is a complex process that requires consideration of many factors affecting the transportation efficiency and costs. One of the key aspects considered in the paper is maintaining train traffic under variable time costs, namely, downtime due to track repairs or rolling stock breakdown. The paper proposes an optimized solution for selecting the train routes. Dijkstra's algorithm is used to find the shortest route. The paper also analyzes the average time cost expectation for each strategy. The Nash equilibrium has been found that accounts for the interaction between the transport system participants. **Purpose:** to find an equilibrium for train movement in case of emergency; to create an optimal train schedule considering the above factor. Information technology, data analysis and other innovative approaches were used to achieve this goal. **Methods:** analysis of modern tools and technologies including mathematical modelling. **Results:** to emphasize the importance of train traffic management and organizational aspect of rail transport operation. **Practical significance:** the analysis of train movement strategies for reducing delays requires an integrated approach that includes the analysis of many factors, the interaction of various participants and the use of modern technologies. This allows improving the quality of passenger service as well as increasing rail transport efficiency.*

**Keywords:** *transport system, Dijkstra's algorithm, mathematical expectation, Nash equilibrium, route selection strategy, rail network, route efficiency*

## REFERENCES

1. Makarov I. S., Gorbachev R. A., Fomin N. V., et al. Intellektualnaya sistema operativnoy korrektyrovki grafika dvizheniya poezdov [Intelligent System for Operational Adjustment of Train Schedules], *Zheleznodorozhnyy Transport*, 2021, No. 5, Pp. 22–25. (In Russian)
2. Zakharova E. M., Paschenko F. F., Takmazyan A. K., et al. Intelligent Control Systems for Maintenance of Railway Rolling Stock, *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on the Application of Information and Communication Technologies (AICT 2017), Russia, Moscow, September 20–22, 2017*. Vol. 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, Pp. 423–425.
3. Silver D., Hubert T., Schrittwieser J., et al. A General Reinforcement Learning Algorithm That Masters Chess, Shogi, and Go Through Self-Play, *Science*, 2018, Vol. 362, Iss. 6419, Pp. 1140–1144. DOI: 10.1126/science.aar6404.
4. Stipić A., Bronzin T., Prole B., Pap K. Deep Learning Advancements: Closing the Gap, *Proceedings of the 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20–24, 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. Pp. 1087–1092. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757133.
5. Mazalov V. V. Matematicheskaya teoriya igr i prilozheniya: uchebnoe posobie [Mathematical game theory and applications: A tutorial]. Saint Peterburg, LAN Publishing House, 2016. 448 p. (In Russian)
6. Petrosyan L. A., Zenkevich N. A., Semina E. A. Teoriya igr: uchebnoe posobie [Game theory: A tutorial]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing House, Universitet Publishing House, 1998, 304 p. (In Russian)
7. Zorkaltsev V. I., Kiseleva M. A. Ravnovesie Nesda v nelineynoy transportnoy modeli [Nash Equilibrium in Nonlinear Transport Problem], *Optimizatsiya, Upravlenie, Intellekt*, 2007, No. 1, Pp. 42–50. (In Russian)
8. von Neumann J., Morgenstern O. Teoriya igr i ekonomicheskoe povedenie [Theory of games and economic behavior]. Moscow, Nauka Publishers, 1970, 707 p. (In Russian)
9. Protasov I. D. Teoriya igr i issledovanie operatsiy: uchebnoe posobie [Game theory and operations research: A tutorial]. Moscow, Gelios ARV Publishing House, 2003. 368 p. (In Russian)
10. Myerson R. B. Game theory: Analysis of conflict. Cambridge (MA), London, Harvard University Press, 1991. 581 p.
11. Solomon M. M., Desrosiers J. Survey Paper — Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems, *Transportation Science*, 1988, Vol. 22, No. 1, Pp. 1–13. DOI: 10.1287/trsc.22.1.1.

Received: 17.02.2025

Accepted: 20.02.2025

УДК 004

## Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов

- Липанов Илья Дмитриевич**<sup>1</sup> — аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: спутниковые навигационные системы, автономная навигация и управление БПЛА, геодезия и высокоточные измерения, обработка сигналов и данных, информационные технологии и моделирование. E-mail: illipanov@mail.ru
- Хомоненко Анатолий Дмитриевич**<sup>1,2</sup> — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы»; профессор кафедры «Математическое и программное обеспечение». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru
- Молодкин Игорь Андреевич**<sup>1</sup> — магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: компьютерные сети, базы данных, искусственный интеллект. E-mail: molodkin@pgups.ru

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

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

**Для цитирования:** Липанов И. Д., Хомоненко А. Д., Молодкин И. А. Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 27–36. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-27-36

**Аннотация.** С развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) обеспечение точного позиционирования становится одной из ключевых задач, особенно при ограниченной или отсутствующей доступности спутниковых сигналов. **Цель:** осуществить сравнительный анализ методов позиционирования RTK (Real-Time Kinematic) кинематики реального времени и PPP (Precise Point Positioning) точного позиционирования для оценки их эффективности в различных условиях эксплуатации БПЛА. **Результаты:** исследование выявило, что RTK характеризуется высокой точностью в реальном времени при наличии базовой станции. Это делает его подходящим для задач, требующих оперативной аналитики, например в агломерациях. PPP, напротив, обеспечивает автономное позиционирование и подходит для удаленных областей, но требует времени на инициализацию для достижения высокой точности. Сравнение показало, что оба метода обладают уникальными преимуществами и ограничениями, определяющими их применимость в различных сценариях использования. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы для оптимизации выбора и применения систем позиционирования в различных отраслях, таких как картография, логистика и мониторинг окружающей среды, повышая эффективность и надежность операций с использованием БПЛА. **Обсуждение:** рекомендована дальнейшая модернизация данных методов для повышения их эффективности и расширения областей применения, включая интеграцию с современными системами управления БПЛА.

**Ключевые слова:** маршрутизация БПЛА, ГНСС, DGPS, RTK, PPP, корректирующие сигналы, точное позиционирование

**2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

## Введение

В течение последнего десятилетия беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали основным инструментом во многих отраслях, включая сельское хозяйство, мониторинг окружающей среды, съемку и логистику. Одной из основных задач, с которыми сталкиваются разработчики и операторы беспилотников, является обеспечение точного позиционирования устройств, особенно в ситуациях, когда традиционные методы, такие как глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), могут оказаться ненадежными. Это особенно актуально, когда сигнал ГНСС является слабым или недоступным, например в городских районах, густых лесах или внутри зданий [1].

Для решения проблемы точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов было разработано множество подходов, среди которых особое внимание уделяется использованию ГНСС с корректирующими сигналами. Подход, основанный на дифференциальных технологиях, таких как RTK (Real-Time Kinematic) и PPP (Precise Point Positioning), может существенно повысить точность определения координат на открытой местности.

В статье рассматриваются сильные и слабые стороны каждого подхода, их применимость в различных условиях и потенциал их сочетания для повышения точности и надежности системы позиционирования. Сопоставляя эти методы, можно определить наилучшие подходы к использованию беспилотных летательных аппаратов в различных условиях эксплуатации и определить области для дальнейших исследований и разработки гибридных систем позиционирования.

## Система ГНСС с корректирующими сигналами

Метод глобальной навигационной спутниковой системы с корректирующими сигналами представляет собой высокоточный подход к определению координат, применяемый для точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов и широко используемый в задачах, где важна максимальная геопривязка [2]. Стандартное спутниковое позиционирование ГНСС обеспечивает точность в диапазоне от 1 до 10 метров, что может быть недостаточно для операций, требующих более детализированных данных, таких как агромониторинг, геодезия и логистика. Для решения этой задачи применяются корректирующие сигналы, которые значительно снижают погрешности позиционирования, обеспечивая точность на уровне сантиметров.

Глобальные навигационные спутниковые системы включают в себя множество спутниковых систем, каждая из которых состоит из нескольких десятков спутников. Эти системы обеспечивают пользователю глобальное покрытие и позволяют достигать уровня точности до сантиметров. Современная навигация включает в себя несколько глобальных навигационных спутниковых систем, среди которых Navstar GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (ЕС) и Beidou (КНР). Принцип работы спутниковых систем заключается в предоставлении пользователю информации о времени, переданной одновременно несколькими спутниками [3]. Принимая сигналы ГНСС, пользователи определяют свое местоположение (широту, долготу, высоту и время). Методы получения информации от спутниковых систем различаются в зависимости от технологии и коррекции. Стандартное ГНСС-позиционирование в режиме одного приемника предполагает наличие погрешностей в несколько метров.

## Теоретические основы использования ГНСС для точного позиционирования БПЛА

ГНСС-позиционирование во многом базируется на расчете псевдодальностей до спутников (рис. 1). Если мы знаем время, когда сигнал передан и когда получен, то псевдодальность до спутника можно рассчитать по формуле:

$$d = c(t_r - t_s),$$

где  $d$  — расстояние от спутника до приемника (БПЛА);

$c$  — скорость света;

$t_r$  — момент времени приема сигнала приемником;

$t_s$  — момент времени отправки сигнала спутником.

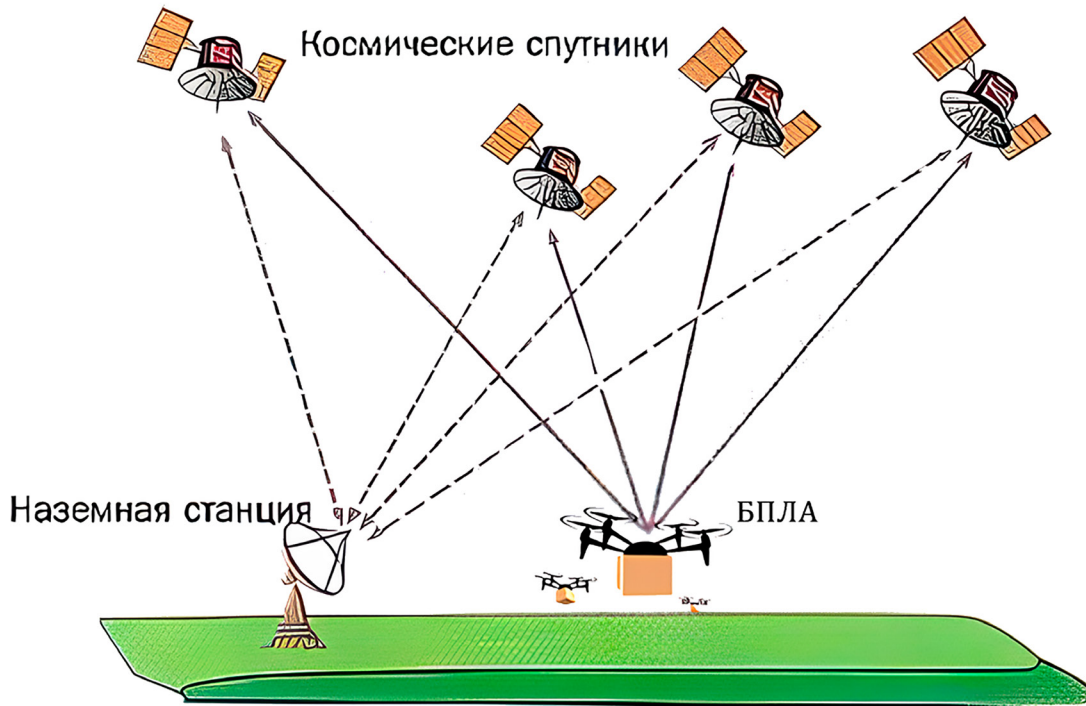


Рис. 1. Схема работы ГНСС

Но прямые измерения обычно подвержены различным задержкам, вызванным атмосферой и другими факторами, такими как ошибки времени отправления и приема. Это главный источник погрешностей в методах самостоятельного ГНСС-позиционирования [4]. Изучение природы погрешностей позволяет работать над их минимизацией дифференциальными методами.

**Применение дифференциальной глобальной системы позиционирования для повышения точности и коррекция погрешностей**

Дифференциальная глобальная система позиционирования (Differential Global Positioning System, DGPS) базируется на использовании дополнительных корректировок, вносимых для уменьшения ошибок позиционирования (рис. 2). В DGPS используются наземные станции с известными координатами, которые принимают сигналы от спутников, рассчитывают поправки, уменьшающие атмосферные и орбитальные погрешности. Эти поправки передаются на мобильные устройства, такие как БПЛА, и позволяют гораздо точнее

определять свое местоположение [5]. В условиях близости к базовой станции точность DGPS может достигать нескольких сантиметров, что делает его удобным для использования в открытой местности и областях с негустой застройкой.

В методе DGPS базовая станция, расположенная в известной точке  $(x_b, y_b, z_b)$ , принимает сигнал от спутника с измеренным расстоянием  $d_b$ . Это расстояние сравнивается с истинным расстоянием  $d_{true}$  между базовой станцией и спутником,

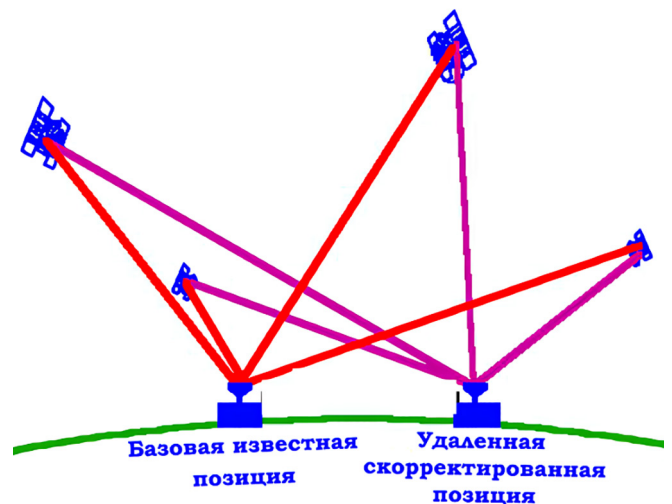


Рис. 2. Схема работы DGPS

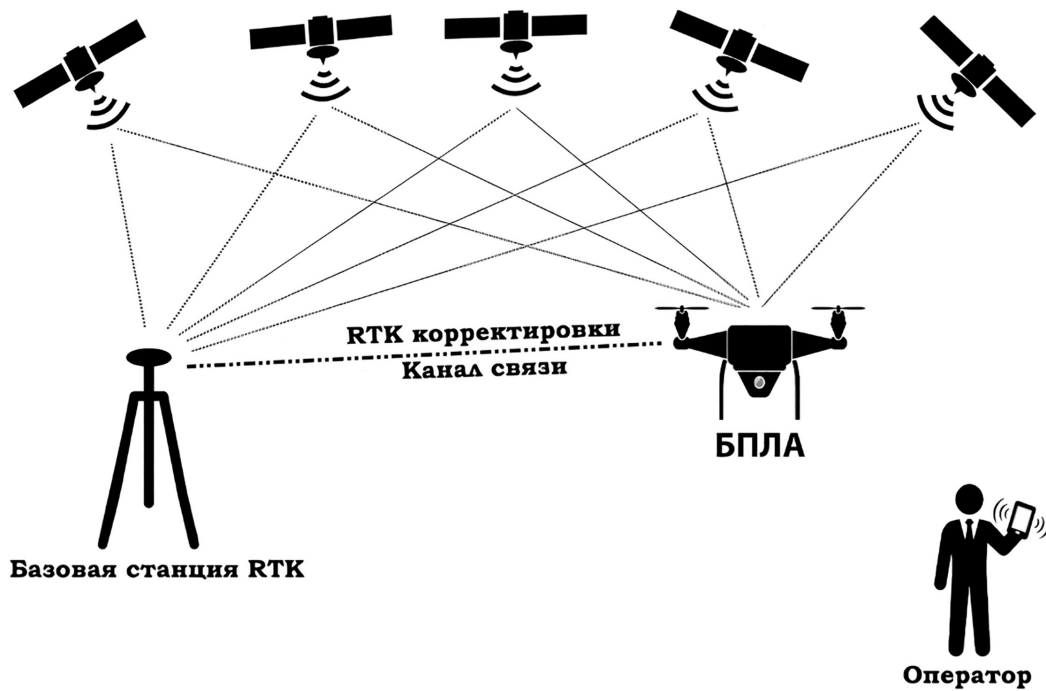


Рис. 3. Структурная схема работы системы RTK для высокоточного позиционирования БПЛА

что позволяет вычислить корректирующую поправку  $\Delta d$ :

$$\Delta d = d_{true} - d_b,$$

где  $\Delta d$  — ошибка определения расстояния (погрешность измерения);

$d_{true}$  — истинное расстояние от спутника до приемника;

$d_b$  — измеренное (наблюдаемое) расстояние, полученное приемником.

Компенсирующее значение поправки передается на подвижный приемник, что позволяет ему откорректировать свое положение относительно реальности в пределах основных погрешностей.

### Методы получения и обработки корректирующих сигналов

Система глобального позиционирования и времени доставки поправки с базовой станции ГНСС для получения корректирующих данных применяет два метода:

1. **RTK (Real-Time Kinematic)** — кинематика реального времени, в котором используется наземная станция и передача поправок в режиме реаль-

ного времени (рис. 3). Применяется в задачах, где критична высокая точность координат в пределах 2–20 см, позволяет решать задачи автоматического управления БПЛА. Ключевое условие — наличие базовой станции [6]. В силу физических ограничений распространения сигналов скорректировать подвижный приемник можно только вблизи базовой станции. Способ RTK определяет координаты с помощью следующего кинематического уравнения коррекции. Пусть подвижный приемник находится на расстоянии  $d_m$  от базовой станции, координаты коррекции  $(x_c, y_c, z_c)$  передаются для уточнения измеренного расстояния до спутника. Корректированное расстояние  $d_{corrected}$  в RTK определяется как

$$d_{corrected} = d_m + \Delta d,$$

где  $d_{corrected}$  — откорректированное расстояние (после применения корректировки);

$d_m$  — измеренное расстояние (полученное без корректировки);

$\Delta d$  — ошибка или погрешность измерения расстояния (вычисленная как разница между истинным и измеренным расстоянием).

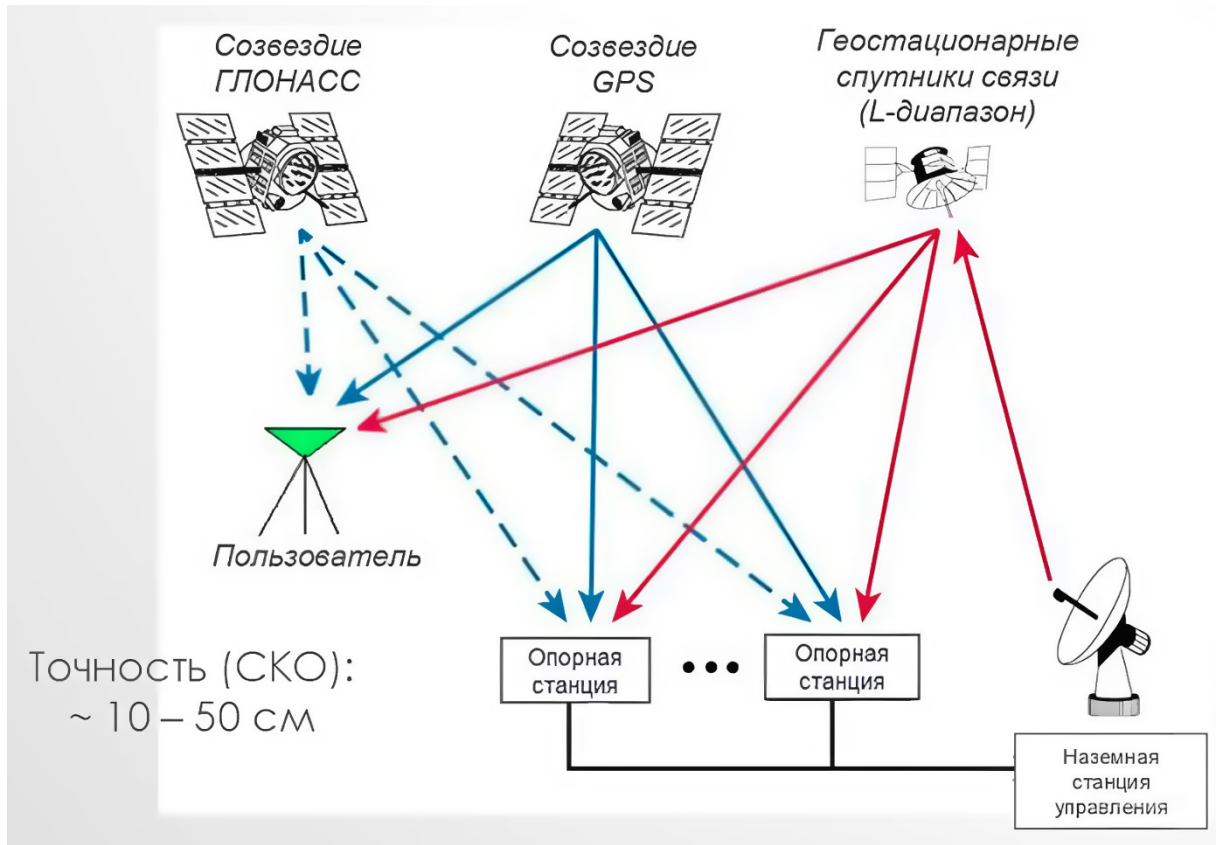


Рис. 4. Схема работы PPP

На рис. 3 показана схема работы системы RTK, используемой для повышения точности позиционирования БПЛА.

Базовая станция RTK, расположенная в фиксированном месте, получает сигналы от спутников ГНСС и вычисляет погрешности. Эти ошибки передаются через канал связи на приемник RTK, установленный на БПЛА, что позволяет скорректировать его позицию с высокой точностью в реальном времени [7]. Оператор управляет БПЛА с помощью мобильного устройства, получая актуальные данные о его местоположении. Этот метод обеспечивает точность позиционирования с погрешностью до нескольких миллиметров.

**2. PPP (Precise Point Positioning)** — метод точного позиционирования. В отличие от RTK не требует близости к базовой станции. PPP использует высокоточные данные о параметрах орбиты и часов спутников, предоставляемые различными сервисами, что позволяет получать точность до нескольких сантиметров (рис. 4). PPP может быть полезен в условиях, где установка наземной

инфраструктуры невозможна или затруднена [8]. Формула включает множество поправок, учитывающих ионосферные задержки  $I$  и тропосферные задержки  $T$ :

$$d_{ppp} = d + I + T + \Delta_{clk} + \Delta_{orb},$$

где  $d_{ppp}$  — скорректированное расстояние при использовании метода PPP;

$d$  — базовое (измеренное) расстояние между спутником и приемником;

$I$  — ошибка, вызванная ионосферными задержками;

$T$  — ошибка, вызванная тропосферными задержками;

$\Delta_{clk}$  — погрешность, связанная с ошибками синхронизации часов (как спутника, так и приемника);

$\Delta_{orb}$  — ошибка, связанная с неточностями орбитальных параметров спутников.

На рис. 4 показана схема работы PPP, при котором наземная станция передает поправки подвижному приемнику.



Приведенная схема иллюстрирует, как наземная станция непрерывно передает данные о поправках, что позволяет подвижному приемнику рассчитывать точные координаты.

### Преимущества и ограничения метода RTK

RTK использует дифференциальный подход, при котором данные с мобильного приемника, размещенного на БПЛА, корректируются с помощью информации от базовой станции, размещенной в известной точке [9]. Это позволяет значительно улучшить точность. Метод RTK обладает рядом преимуществ:

1. Обеспечивает точность в пределах нескольких сантиметров ( $< 2\text{--}3$  см), что делает его подходящим для задач, требующих высокой точности, таких как геодезия, картографирование и т.д.

2. Предоставляет точные данные о местоположении в режиме реального времени, что важно для задач, требующих немедленного реагирования, например для управления движением БПЛА или выполнения задач в динамичных условиях.

3. Демонстрирует хорошую производительность и высокую точность в условиях открытой местности, где есть прямая видимость спутников и отсутствует мультипуть.

4. Может применяться на больших дистанциях — до 30 км и более в условиях открытой местности (поля, равнины).

Однако, несмотря на свои преимущества, RTK имеет несколько ограничений, которые могут повлиять на его эффективность в разных операционных условиях:

1. Для управления БПЛА необходима базовая станция, т. е. на больших удалениях (целевая величина — сторона квадрата со стороной в 10–20 км) от нее система работать не будет. А это значит, что в удаленных точках и агрессивных средах наземную станцию разместить не получится.

2. Если осуществляется передача данных с базовой станции на мобильный приемник не физически по кабелю, а через канал связи, то у этого канала есть своя полоса и стабильность передачи. Например, дождливая погода нарушает стабильность канала.

3. Эффективность значительно уменьшается, если между базой и мобильным устройством возникают препятствия (например, холмы или здания).

Метод RTK позволяет весьма точно определить позиционирование БПЛА, если он находится в зоне видимости спутников и базовой станции [10]. Остальные случаи использования для точного позиционирования не так эффективны: на воде и в воздухе закрепить «внешнюю» станцию сложно, а в лесу и гористой местности могут возникать те или иные помехи видимости.

### Преимущества и ограничения метода PPP

PPP использует данные с первого приемника и корректирует данные спутниковых орбит и других систематических ошибок для определения координат с сантиметровой точностью. Метод получения высокоточных координат при помощи PPP не требует базовой станции [11]. Основные преимущества PPP:

1. Для управления БПЛА достаточно одного приемника, который использует оператор.

2. Системы точного позиционирования реализуют так называемый метод постобработки — это метод, при котором по мере поступления ГНСС-сигналов от приемника они бесшовно попадают на сервер провайдера, что позволяет работать с методом PPP практически везде: в удаленных или труднодоступных местах, на водных объектах, а также в любой другой части планеты.

3. При последующей обработке метод PPP исключает локальные искажения сигналов, такие как многолучевость. Если оператор находится на открытом пространстве, на небольшом удалении от стен, деревьев и других объектов, с помощью этого метода можно получить точные координаты на нескольких устройствах (от 1 до 3 штук) без необходимости вывода контрольно-корректирующих станций (ККС).

4. Более устойчив к атмосферным и радиоэлектронным помехам, что увеличивает его надежность в сложных условиях.

Несмотря на свою автономность и гибкость, метод PPP имеет несколько ограничений, которые важно учитывать при его использовании:

**Основные характеристики зависимостей методов позиционирования от качества спутниковых сигналов**

Характеристика	RTK	PPP
Зависимость от базовой станции	Требует базовой станции	Работает только с данными одного приемника
Точность в реальном времени	Высокая, в пределах миллиметров	Средняя, требует времени для постобработки
Автономность	Требует наличия базовой станции связи	Автономен, однако требует наличия связи со спутниками
Зависимость от спутниковых сигналов	Зависит от качества сигнала и расстояния до базы	Зависит от качества орбитальных данных и атмосферных условий
Работа на больших расстояниях	Ограничена (до 30 км)	Работает на любых расстояниях, если есть сигнал спутников
Производительность в открытой местности	Высокая, если есть хорошая связь с базой	Высокая, если доступны точные орбитальные данные и хорошие спутниковые сигналы

1. Основное ограничение PPP заключается в том, что метод требует времени для инициализации, особенно для получения точных орбитальных данных и оценок ошибки часов. Это означает, что от старта до получения высокоточных данных может пройти некоторое время, в отличие от RTK, который предлагает данные практически в реальном времени.

2. На коротких расстояниях точность PPP может уступать RTK. Для достижения максимальной точности PPP требует более сложной обработки и применения дополнительных фильтрующих алгоритмов и постобработки данных.

3. Для достижения точных орбитальных данных и данных о часах, используемых в PPP, требуется доступ к орбитальным станциям и данным о часах, который может быть затруднен в определенных ситуациях или при отсутствии надежной связи со спутниками.

Метод PPP выделяется своей автономностью и точностью, особенно в случаях автономного развертывания и в долгосрочных миссиях, но его ограничения, такие как инициализация и зависимость от точности орбитальных данных, делают его неподходящим для динамичных сценариев в реальном времени [12].

### Сравнительный анализ характеристик методов позиционирования

Для более наглядного сравнения в табл. 1 представлены основные характеристики зависимостей этих методов от качества спутниковых сигналов, включая их чувствительность к внешним помехам до влияния погодных условий и атмосферных ано-

малий, а также их производительность в различных операционных условиях.

Таким образом, в условиях открытой местности, где спутники доступны, оба метода позиционирования — RTK и PPP — могут обеспечивать высокую точность. Однако их подходы и ограничения делают их подходящими для разных сценариев использования [13]. RTK подходит для сценариев, где требуются точность в реальном времени и высокая производительность, но в то же время обеспечивается стабильная связь с базовой станцией. С другой стороны, PPP предлагает большую гибкость и автономность, что делает его привлекательным в местах, где установка локальной базовой станции невозможна или нежелательна. Однако PPP требует больше времени для достижения высокой точности, что делает его менее подходящим для задач, требующих мгновенной точности [14].

### Заключение

В статье проведен сравнительный анализ работы с данными точного позиционирования БПЛА посредством получения исправлений для ГНСС-навигации с использованием таких технологий, как PPP и RTK. Отметим, что обе технологии являются феноменальными инструментами, способными решать широкий массив различных аэрогеодезических, авиационных, инфраструктурных и иных задач [15].

Технология RTK отличается оперативностью передачи данных и может использоваться в достаточном количестве задач, связанных с актуализацией данных местности. В то же время технология PPP

является полным аналогом и равноценной заменой своему оппоненту, предлагая конечным пользователям несколько иной функционал — автономность полета без необходимости установки постоянной базы и возможность работы в автономных районах. Несмотря на это, обе технологии страдают от недостаточности качественных спутниковых данных и подвержены влиянию инфраструктурных, природных и технических ограничений.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что каждый из рассмотренных методов имеет свои уникальные особенности и области применения. Если техническое задание подразумевает высокоактивную навигацию в удаленных районах планеты, то метод PPP является

приоритетным решением. Если же требуется постоянное получение данных о быстроменяющейся обстановке, то метод RTK является фаворитом для выполнения задачи в условиях реализации работы в агломерациях [16].

Результаты работы подчеркивают необходимость дальнейшей модернизации методов работы ГНСС с корректирующими сигналами для повышения их стойкости к внешним возмущениям и обеспечения достоверной работы в широком спектре условий. Интеграция указанных технологий с современными системами управления БПЛА открывает перспективы для их использования в таких областях, как сельское хозяйство, мониторинг окружающей среды, картография и логистика.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments / Y. Chang, Y. Cheng, U. Manzoor, J. Murray // *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 170, Art. No. 104533. 23 p. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Al-Shaery A. M., Lim S., Rizos C. Investigation of Different Interpolation Models Used in Network-RTK for the Virtual Reference Station Technique // *Journal of Global Positioning Systems*. 2011. Vol. 10, No. 2. Pp. 136–148. DOI: 10.5081/jgps.10.2.136.
3. Angelino C. V., Baraniello V. R., Cicala L. UAV Position and Attitude Estimation Using IMU, GNSS and Camera // *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion (Singapore, 09–12 July 2012)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. Pp. 735–742.
4. Tightly Coupled Integration of Multi-GNSS PPP and MEMS Inertial Measurement Unit Data / Z. Gao, H. Zhang, M. Ge [et al.] // *GPS Solution*. 2017. Vol. 21, Iss. 2. Pp. 377–391. DOI: 10.1007/s10291-016-0527-z.
5. Odometer, Low-Cost Inertial Sensors, and Four-GNSS Data to Enhance PPP and Attitude Determination / Z. Gao, M. Ge, Y. Li [et al.] // *GPS Solutions*. 2018. Vol. 22, Iss. 3. Art. No. 57. 16 p. DOI: 10.1007/s10291-018-0725-y.
6. Липанов И. Д., Хомоненко А. Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2024. № 3 (39). С. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43.
7. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations / M. Ge, G. Gendt, M. Rothacher [et al.] // *Journal of Geodesy*. 2008. Vol. 82, Iss. 7. Pp. 389–399. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.
8. Towards PPP-RTK: Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning / J. Geng, F. N. Teferle, X. Meng, A. H. Dodson // *Advances in Space Research*. 2011. Vol. 47, Iss. 10. Pp. 1664–1673. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.030.
9. Speeding Up PPP Ambiguity Resolution Using Triple-Frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS Data / J. Geng, J. Guo, X. Meng, K. Gao // *Journal of Geodesy*. 2020. Vol. 94, Iss. 1. Art. No. 6. 15 p. DOI: 10.1007/s00190-019-01330-1.
10. Multi-GNSS Fractional Cycle Bias Products Generation for GNSS Ambiguity-Fixed PPP at Wuhan University / J. Hu, X. Zhang, P. Li [et al.] // *GPS Solutions*. 2020. Vol. 24, Iss. 1. Art. No. 15. 13 p. DOI: 10.1007/s10291-019-0929-9.
11. Laurichesse D., Mercier F. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP // *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007) (Fort Worth, TX, USA, 25–28 September 2007)*. Manassas (VA): The Institute of Navigation, 2007. Pp. 839–848.
12. Multi-GNSS Phase Delay Estimation and PPP Ambiguity Resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo / Xing Li, Xin Li, Y. Yuan [et al.] // *Journal of Geodesy*. 2018. Vol. 92, Iss. 6. Pp. 579–608. DOI: 10.1007/s00190-017-1081-3.
13. GLONASS Phase Bias Estimation and Its PPP Ambiguity Resolution Using Homogeneous Receivers / Y. Liu, W. Song, Y. Lou [et al.] // *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21, Iss. 2. Pp. 427–437. DOI: 10.1007/s10291-016-0529-x.

14. Martell H., Roesler G. Tightly Coupled Processing of Precise Point Positioning (PPP) and INS Data // Proceedings of the 22th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009) (Savannah, GA, USA, 22–25 September 2009). Manassas (VA): The Institute of Navigation, 2009. Pp. 1898–1905.

15. Towards Sub-meter Positioning Using Android Raw GNSS Measurements / D. Psychas, J. Bruno, L. Massarweh, F. Darugna // Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019) (Miami, FL, USA, 16–20 September 2019). Manassas (VA): The Institute of Navigation, 2019. Pp. 3917–3931. DOI: 10.33012/2019.17077.

16. Zhang B., Chen Y., Yuan Y. PPP-RTK Based on Undifferenced and Uncombined Observations: Theoretical and Practical Aspects // Journal of Geodesy. 2018. Vol. 93, Iss. 7. Pp. 1011–1024. DOI: 10.1007/s00190-018-1220-5.

Дата поступления: 12.02.2025

Решение о публикации: 19.02.2025

## Comparative Analysis of Precise Positioning Methods for Unmanned Aerial Vehicles

**Ilya D. Lipanov**<sup>1</sup> — Postgraduate Student, Information and Computing Systems Department. Research interests: satellite navigation systems, autonomous navigation and UAV control, geodesy and high-precision measurements, signal and data processing, information technology and modeling. E-mail: illipanov@mail.ru

**Anatoly D. Khomonenko**<sup>1,2</sup> — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Information and Computing Systems Department; Professor of the Mathematical and Software Engineering Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modeling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

**Igor A. Molodkin**<sup>1</sup> — Master's Degree, Senior Lecturer at the Information and Computing Systems Department. Research interests: computer networks, databases, artificial intelligence. E-mail: molodkin@pgups.ru

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

**For citation:** Lipanov I. D., Khomonenko A. D., Molodkin I. A. Comparative Analysis of Precise Positioning Methods for Unmanned Aerial Vehicles. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 27–36. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-27-36. (In Russian)

**Abstract.** *With the advancement of unmanned aerial vehicles (UAVs), ensuring an object's precise positioning has become one of the key challenges especially in environments with limited or no satellite signals. **Purpose:** to conduct a comparative analysis of Real-Time Kinematic (RTK) and Precise Point Positioning (PPP) methods to evaluate their effectiveness under various UAV operational conditions. **Results:** the study revealed that RTK provides high real-time accuracy when a base station is available making it suitable for tasks requiring rapid analytics, such as in urban agglomerations. In contrast, PPP enables autonomous positioning and is better suited for remote areas, though it requires an initialization period to achieve high accuracy. The comparison showed that both methods have unique advantages and limitations that define their applicability in different usage scenarios. **Practical significance:** the study's findings can be used to optimize the selection and implementation of positioning systems in various industries, such as cartography, logistics, and environmental monitoring enhancing the efficiency and reliability of UAV operations. **Discussion:** further refinement of these methods is recommended to improve their effectiveness and expand their applications including integration with modern UAV control systems.*

**Keywords:** UAV routing, GNSS, DGPS, RTK, PPP, correction signals, precise positioning

## REFERENCES

1. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments, *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, Vol. 170, Art. No. 104533, 23 p. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Al-Shaery A. M., Lim S., Rizos C. Investigation of Different Interpolation Models Used in Network-RTK for the Virtual Reference Station Technique, *Journal of Global Positioning Systems*, 2011, Vol. 10, No. 2, Pp. 136–148. DOI: 10.5081/jgps.10.2.136.
3. Angelino C. V., Baraniello V. R., Cicala L. UAV Position and Attitude Estimation Using IMU, GNSS and Camera, *Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, July 09–12, 2012*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, Pp. 735–742.
4. Gao Z., Zhang H., Ge M., et al. Tightly Coupled Integration of Multi-GNSS PPP and MEMS Inertial Measurement Unit Data, *GPS Solution*, 2017, Vol. 21, Iss. 2, Pp. 377–391. DOI: 10.1007/s10291-016-0527-z.
5. Gao Z., Ge M., Li Y., et al. Odometer, Low-Cost Inertial Sensors, and Four-GNSS Data to Enhance PPP and Attitude Determination, *GPS Solutions*, 2018, Vol. 22, Iss. 3, Art. No. 57, 16 p. DOI: 10.1007/s10291-018-0725-y.
6. Lipanov I. D., Khomonenko A. D. Tekhnologii i metody planirovaniya peremeshcheniya BPLA po marshrutnym tochkam [Technologies and Methods for Planning the Movement of UAVs Along Waypoints], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2024, No. 3 (39), Pp. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43. (In Russian)
7. Ge M., Gendt G., Rothacher M., et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations, *Journal of Geodesy*, 2008, Vol. 82, Iss. 7, Pp. 389–399. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.
8. Geng J., Teferle F. N., Meng X., Dodson A. H. Towards PPP-RTK: Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 47, Iss. 10, Pp. 1664–1673. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.030.
9. Geng J., Guo J., Meng X., Gao K. Speeding Up PPP Ambiguity Resolution Using Triple-Frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS Data, *Journal of Geodesy*, 2020, Vol. 94, Iss. 1, Art. No. 6, 15 p. DOI: 10.1007/s00190-019-01330-1.
10. Hu J., Zhang X., Li P., et al. Multi-GNSS Fractional Cycle Bias Products Generation for GNSS Ambiguity-Fixed PPP at Wuhan University, *GPS Solutions*, 2020, Vol. 24, Iss. 1, Art. No. 15, 13 p. DOI: 10.1007/s10291-019-0929-9.
11. Laurichesse D., Mercier F. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP, *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, USA, September 25–28, 2007*. Manassas (VA), The Institute of Navigation, 2007, Pp. 839–848.
12. Li Xing., Li Xin, Yuan Y., et al. Multi-GNSS Phase Delay Estimation and PPP Ambiguity Resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo, *Journal of Geodesy*, 2018, Vol. 92, Iss. 6, Pp. 579–608. DOI: 10.1007/s00190-017-1081-3.
13. Liu Y., Song W., Lou Y., et al. GLONASS Phase Bias Estimation and Its PPP Ambiguity Resolution Using Homogeneous Receivers, *GPS Solutions*, 2017, Vol. 21, Iss. 2, Pp. 427–437. DOI: 10.1007/s10291-016-0529-x.
14. Martell H., Roesler G. Tightly Coupled Processing of Precise Point Positioning (PPP) and INS Data, *Proceedings of the 22th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, USA, September 22–25, 2009*. Manassas (VA), The Institute of Navigation, 2009, Pp. 1898–1905.
15. Psychas D., Bruno J., Massarweh L., Darugna F. Towards Sub-meter Positioning Using Android Raw GNSS Measurements, *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, FL, USA, September 16–20, 2019*. Manassas (VA), The Institute of Navigation, 2019, Pp. 3917–3931. DOI: 10.33012/2019.17077.
16. Zhang B., Chen Y., Yuan Y. PPP-RTK Based on Undifferenced and Uncombined Observations: Theoretical and Practical Aspects, *Journal of Geodesy*, 2018, Vol. 93, Iss. 7, Pp. 1011–1024. DOI: 10.1007/s00190-018-1220-5.

Received: 12.02.2025

Accepted: 19.02.2025

УДК 519.7

## Подход к моделированию прогнозных цифровых двойников сложных многорежимных объектов

**Павлов Александр Николаевич**<sup>1,2</sup> — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления космических комплексов», ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании. Научные интересы: системный анализ и принятие решений в условиях существенной неопределенности, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. E-mail: pavlov62@list.ru

**Воротягин Валентин Николаевич**<sup>1</sup> — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Технологии и средства автоматизации обработки и анализа информации космических средств». Научные интересы: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. E-mail: vorotyagin@rambler.ru

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39

**Для цитирования:** Павлов А. Н., Воротягин В. Н. Подход к моделированию прогнозных цифровых двойников сложных многорежимных объектов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 37–45. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-37-45

**Аннотация.** Развитие инструментов моделирования является ключевым фактором создания и реализации интеллектуальных (прогнозных) цифровых двойников. Как правило, многие сложные объекты (СЛО) являются многорежимными, т. е. априори обладают свойством немонотонности. Изменения содержания целей и задач, стоящих перед объектом, а также деструктивные воздействия внешней среды приводят к неопределенности функционирования СЛО, которая связана с интенсивностью и характером использования различных режимов их работы. **Цель исследования:** указанная ситуация потребовала разработки подхода к исследованию многорежимных немонотонных систем в условиях существенной неопределенности. **Результаты:** учет режимов работы объекта в виде вершин схем функциональной целостности общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) исчислений показал, что функциональная структура многорежимного объекта становится немонотонной. Данная ситуация, а также отсутствие знаний об интенсивности и характере задействования этих режимов потребовала от авторов статьи разработать модельно-алгоритмическую надстройку над ОЛВМ, в основе которой лежит концепция параметрического генома функциональных структур многорежимных СЛО. **Практическая значимость:** предложенный подход позволил оценить показатели структурно-функциональной надежности и живучести таких объектов в условиях отсутствия знаний о циклограммах задействования режимов функционирования. Опираясь на изложенный в статье подход, необходимо разрабатывать новые методы, позволяющие проводить мониторинг и управление режимами функционирования СЛО.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, многорежимный объект, схема функциональной целостности, немонотонная система, параметрический геном

2.3.1 — системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00706

## Введение

Развиваемые в последние десятилетия [1–4] киберфизические системы, умное производство, интернет вещей (*IoT*), виртуальная и дополненная реальность (*VR/AR*), большие данные (*Big Data*), цифровые двойники (*Digital Twin*) и другие технологии занимают центральное место не только в контексте четвертой промышленной революции (*Industry 4.0*), которая акцентирует внимание на автоматизации и интеллектуализации различных производств, но и в рамках пятой промышленной революции (*Industry 5.0*). В рамках данной новой концепции предполагается более тесная синергия между людьми и автономными машинами, подчеркивая важность взаимодействия человека и технологий для достижения максимального уровня эффективности и инновативности. В рамках *Industry 5.0* акцент смещается от исключительно автоматизированных процессов к созданию гармоничной среды, где человек и машина работают в тандеме, усиливая друг друга. На этом этапе технологии становятся не просто инструментами, а полноценными партнерами, которые способны адаптироваться к человеческим потребностям, взаимодействовать и даже предвосхищать ожидания. Это создает новые возможности для повышения производственной эффективности и качества обслуживания услуг.

Киберфизические системы в *Industry 5.0* способны интегрировать физические и вычислительные компоненты, что позволяет обеспечить более глубокую взаимосвязь между всем процессом производства. В то время как *Industry 4.0* сосредотачивалась на автоматизации и оптимизации производственных процессов, *Industry 5.0* предлагает гораздо более сложные и многоуровневые модели взаимодействия, где учитываются не только технические, но и человеческие факторы.

Интернет вещей также играет важную роль в этой эволюции, позволяя устройствам обмениваться данными и взаимодействовать друг с другом в реальном времени. Это создает возможность для создания умных фабрик, где каждое устройство «знает» свое место в общем процессе

и может быстро адаптироваться к изменениям в условиях работы, улучшая производительность.

Виртуальная и дополненная реальность помогают не только в обучении и ориентации сотрудников, но и в проектировании новых продуктов, позволяя моделировать воссоздаваемые сценарии с высоким уровнем детализации. Это упрощает процесс взаимодействия между различными участниками производственной цепочки и способствует более интуитивному выбору решений.

Большие данные и цифровые двойники представлены как мощные инструменты, позволяющие анализировать конкурентные условия, проблемы и возможности в режиме реального времени. Цифровые двойники, представляя собой виртуальные копии физических объектов, позволяют проводить мониторинг и оптимизацию процессов, затрат и производительности без вмешательства в живую систему.

Представляется, что искусственный интеллект и роботизация, интернет вещей и цифровизация позволят реалистично моделировать не только сами сложные объекты (СЛО), но и процессы их создания, эксплуатации в различных условиях, станут частью нашего повседневного существования. Оптимизация процессов с помощью этих достижений значимо повлияла на ценность человека в осуществлении многих задач в разных отраслях, что вызвало высокую озабоченность и возражение среди работников. Тем не менее пятая промышленная революция напомнит о человечестве [1, 2].

Создание прогнозных цифровых двойников действительно представляет собой важный шаг вперед в управлении сложными системами. Цифровой двойник, состоящий из гармоничной интеграции физических, цифровых и программных компонентов, является мощным инструментом для анализа и предсказания поведения объектов в реальном времени. Однако введение кибернетического слоя, основанного на алгоритмах машинного обучения и обработке больших данных, значительно усиливает его функциональные возможности.

Эти кибернетические компоненты обеспечивают возможность не только наблюдать за состояни-

ем объектов, но и предсказывать возможные изменения и сценарии их поведения. Это позволяет управлять сложностью, возникающей из множества взаимосвязанных факторов, что критически важно для современных организаций, работающих в условиях неопределенности и быстро меняющейся среды.

Сложность, с которой сталкиваются современные системы, выявляется в различных аспектах. Структурная сложность относится к организации компонентов внутри системы и тому, как они взаимодействуют друг с другом. Сложность функционирования связана с многогранностью процессов и задач, выполнение которых требует наличие множества переменных и условий. Выбор поведения — это аспект, касающийся того, как системы реагируют на различные входные данные и обстоятельства, а также как алгоритмы могут оптимизировать это поведение. Сложность моделирования подразумевает необходимость создания адекватных и точных моделей, которые отражают реальность, при этом учитывая все переменные и взаимодействия. Наконец, сложность развития касается динамики системы, ее способности адаптироваться к изменениям во внешней среде.

Роль цифровых двойников в управлении этой сложностью становится все более важной. Они позволяют создавать виртуальные модели, которые могут быть протестированы и оптимизированы без риска для реального мира. Это приводит к более обоснованным решениям, основанным на данных и аналитике. Как следствие, организации становятся более адаптивными и готовыми к вызовам, которые ставит перед ними современный мир. Таким образом, внедрение цифровых двойников не только улучшает процессы управления, но и открывает новые горизонты для инноваций и эффективности в различных отраслях [5–7].

Одной из важных причин затруднений, часто возникающих у разработчиков цифровых двойников на этапе моделирования цифровой копии объекта, является отсутствие достаточно изученных и адекватных математических моделей, методов и алгоритмов, с максимальной реалистичностью охватывающих не только сам объект, но и этапы работы

с ним — строительство, испытания и применения в любых возможных условиях и ситуациях [3]. Кстати, это относится и к исследованию архитектуры его структурных состояний, параметров, способов функционирования. Сегодня математическое моделирование стало ключевым компонентом цифровых двойников.

Для создания системной модели цифрового двойника действительно применяются разнообразные методы анализа и синтеза, каждый из которых вносит свой уникальный вклад в процесс проектирования и оптимизации.

Метод конечных элементов (*Finite Element Method, FEM*) представляет собой мощный инструмент для решения сложных инженерных задач на микроуровне. Он основывается на разбиении геометрической модели объекта на конечное количество элементов, что позволяет упростить решение сложных уравнений в частных производных. Это разбиение позволяет точно моделировать поведение материалов и конструкций под физическими нагрузками, обеспечивает возможность учета различных краевых условий и предоставляет возможность анализа деформаций, напряжений и других характеристик, существенно улучшая понимание процессов, происходящих в объекте.

Анализ видов и последствий отказов (*Failure Mode and Effects Analysis, FMEA*), в свою очередь, служит важным инструментом для управления качеством и надежностью как продуктов, так и производственных процессов. Эта методология позволяет систематически просматривать возможные способы отказа в системе, анализировать их последствия и определять их вероятность. Такой проактивный подход помогает выявить потенциально слабые места еще на стадии проектирования, что минимизирует риски и способствует созданию более надежных и безопасных продуктов. Таким образом, применяя *FMEA*, компании могут значительно сократить затраты на ремонт, возврат товаров и улучшить свою репутацию среди клиентов.

Методы автоматизированного проектирования (*Computer-Aided Design, CAD*) сыграли революционную роль в области инжиниринга и дизайна, позволяя инженерам и проектировщикам создавать



точные и детализированные модели как в двумерной, так и в трехмерной графике. Использование *CAD-систем* значительно ускоряет процесс проектирования, упрощает внесение изменений и помогает в создании необходимой документации для производства. Технологии CAD интегрируются с другими системами, что обеспечивает возможность быстро и эффективно производить коррекции на основе данных, полученных из методов *FEM* и *FMEA*.

В сочетании эти методы образуют мощный комплекс для создания цифровых двойников, который обеспечивает возможность эффективно моделировать, анализировать и оптимизировать сложные системы, позволяя организациям лучше разбираться в их поведении и принимать обоснованные решения на основе данных. Таким образом, современные подходы к моделированию и анализу становятся ключевыми для построения эффективных и надежных систем, способных адаптироваться к изменениям и эксплуатационным условиям.

Указанные подходы нашли достойное применение при создании цифровых двойников 1-го, 2-го и иногда 3-го уровня, обладающего адаптивными возможностями. Традиционно при проектировании двойников данных уровней полагались на знание об идеальных и возможных наихудших условиях их эксплуатации. Однако при разработке интеллектуальных (прогнозных) цифровых двойников (4-го уровня) следует учитывать тот факт, что их физический близнец взаимодействует с неопределенной, частично наблюдаемой средой [4].

### **Немонотонный мир многорежимных объектов**

Изменение параметров и структур современных СЛО вызваны не только изменением содержания целей и задач, стоящих перед объектом, но и воздействием деструктивных факторов на функциональные элементы (ФЭ) объекта, под которыми будем понимать элементы (подсистемы) СЛО, взаимодействующие с внешней средой и выполняющие функции для реализации алгоритмов управления объектом.

При этом отметим, что одним из важных условий исследования возможностей СЛО с учетом

указанных возмущающих воздействий является проведение структурно-функционального анализа и синтеза его облика.

Исследование свойств однородности, равноценности, монотонности, надежности и живучести необходимо при изучении архитектуры структурных (особенно функциональных и технологических) состояний системы [8]. Однако применение графовых (сетевых) моделей для формализации взаимосвязей ФЭ СЛО может отражать поведение только монотонных систем и их параллельно-последовательных (П-структуры) и сложных (Н-структуры) структур [9]. Поэтому для исследования как монотонных, так и в особенности немонотонных функциональных структур объекта требуется принять в расчет логически сложные и противоречивые связи и отношения между ФЭ. Для чего понадобилось разработать метод с привлечением полной группы логических операций («И», «ИЛИ», «НЕ»). Несмотря на более чем 60-летние усилия по разработке указанного подхода, с решением данной задачи успешно справился к концу 2000 года А. С. Можаяев (один из учеников научной школы И. А. Рябинина), создав и реализовав на практике общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) [10].

Для исследования указанных выше свойств структурных состояний СЛО в условиях стохастической и нечетко-возможностной неопределенности от авторов статьи потребовалось обосновать концепцию генома структуры (представление структуры объекта в виде вектора коэффициентов полинома структурной функции надежности) и разработать модельно-алгоритмическую надстройку над ОЛВМ [8]. Поясним, какой практический эффект от использования данного подхода имеется к настоящему времени.

Предложенная концепция позволила, помимо исследования структурно-топологических свойств монотонных объектов, осуществить классификацию структур на монотонные и немонотонные первого и второго типа, а также реализовать оперативный прогноз значений показателей структурной надежности и живучести однородных и неоднородных, монотонных и немонотонных объектов [8]. Разработаны концептуальная и ма-

тематическая постановки задачи многокритериального синтеза структуры СЛО на этапе его проектирования с учетом кратного и комбинаторного резервирования ФЭ объекта, а также метод и реализующий его алгоритм решения данной оптимизационной задачи [11].

Дальнейшее развитие концепции генома структуры при исследовании функциональной и технологической структур (технологических циклов управления) СЛО было связано с отражением факторов функциональной сложности и потенциальной эффективности СЛО, предполагающих наличие в системе множественности режимов (видов) функционирования. Предложенная А. С. Можаявым технология схем функциональной целостности (СФЦ) при разработке ОЛВМ позволила графически представить не только логические условия реализации собственных функций ФЭ и подсистем, но и цели моделирования с учетом интенсивности,

характера (совместное и/или несовместное взаимодействие), сложных взаимосвязей задействования тех или иных режимов функционирования СЛО [12]. Для этого при построении СФЦ СЛО наряду с функциональными вершинами, отвечающими за работоспособность ее ФЭ, были включены вершины для режимов функционирования.

И вот тут оказалось, что СЛО в большинстве случаев обладают немонотонной структурной функцией (вероятностным полиномом). В то же время многим исследователям интуитивно понятно, что сложные объекты обладают свойством природной монотонности (отказ ФЭ ведет к ухудшению надежности системы), а немонотонность встречается, как правило, в системах с противоборством. В связи с проведенными исследованиями таких немонотонных объектов намного больше, чем предполагалось. Этот факт можно подтвердить следующим обстоятельством (рис. 1). Событие

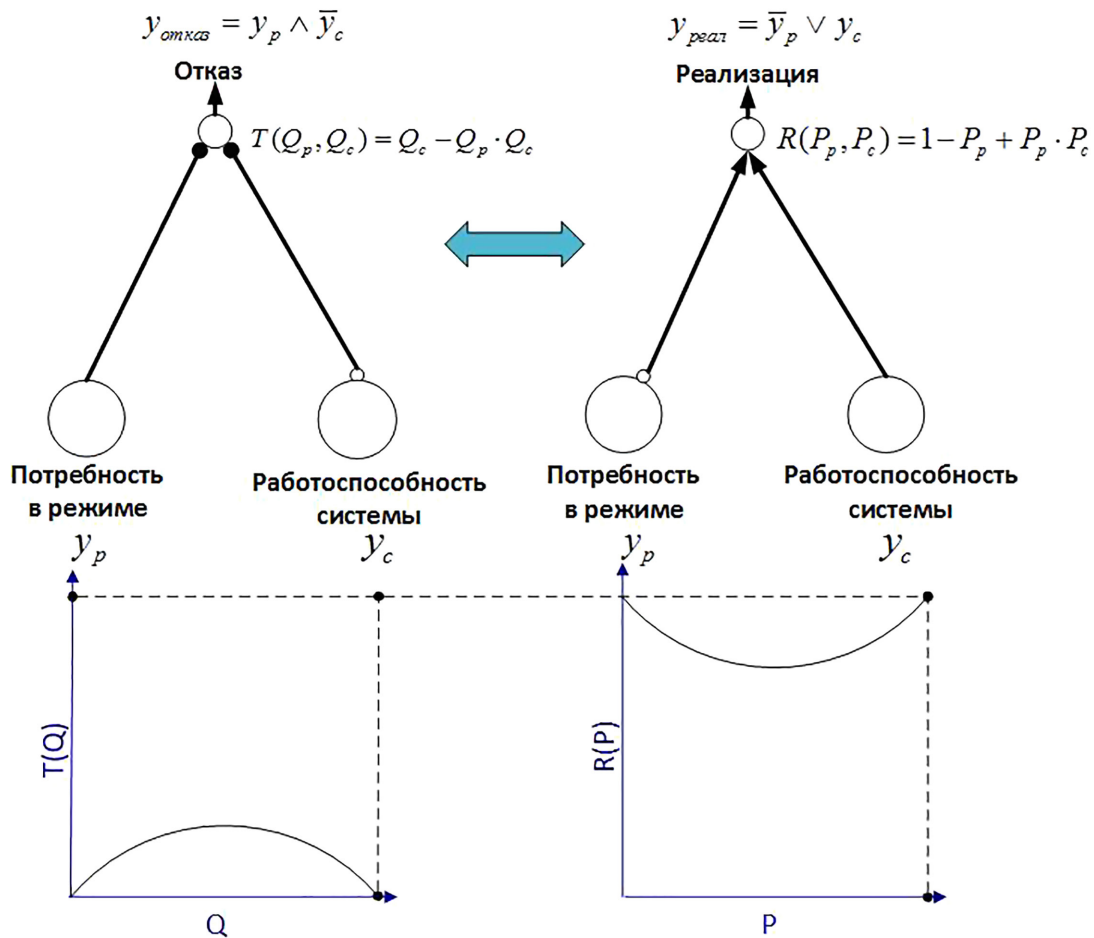


Рис. 1. Немонотонная структура объекта

«отказа» происходит в результате совместного наступления событий «есть потребность в режиме» и «объект не работоспособен». Тогда структурная логическая функция этого события представляет собой  $y_{\text{отказ}} = y_p \wedge \bar{y}_c$ , полином отказа имеет вид  $T(Q_p, Q_c) = P_p \cdot Q_c = Q_c - Q_p \cdot Q_c$ .

Для однородной структуры (т. е.  $Q_p = Q_c = Q$ ) полином отказа равен  $T(Q) = Q - Q^2$ ,  $0 \leq Q \leq 1$  и является немонотонной функцией. Соответственно, наступление противоположного события «Режим реализуется» можно описать логической функцией  $y_{\text{реализ}} = \bar{y}_{\text{отказ}} = \bar{y}_p \vee y_c$ , а полином успешной реализации имеет вид  $R(P_p, P_c) = 1 - P_p + P_p \cdot P_c$ .

Следует указать, что если режим постоянно востребован (его интенсивность равна 1), то вероятность реализации режима зависит только от вероятности безотказной работы (ВБР) ФЭ СЛО, так как  $P_p = 1$  и  $R(P_p, P_c) = P_c \geq 0$ . При стремлении интенсивности задействования режима к 0 ( $P_p \rightarrow 0$ ) будет наблюдаться подобная зависимость, вместе с тем нижнее значение вероятности успешной реализации режима равна  $Q_p$  и стремится к 1 (так как  $R(P_p, P_c) = 1 - P_p + P_p \cdot P_c \geq 1 - P_p = Q_p$ ). Данный факт требуется учитывать при исследовании свойств многорежимных объектов.

Построив СФЦ многорежимного СЛО, можно определить вероятностный полином успешной реализации задействования различных режимов функционирования. Для чего следует применить программный комплекс логико-вероятностного моделирования «Арбитр» [10].

$$\mathfrak{X}(P_1, P_2, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m), \quad (1)$$

где  $P_i, i = 1, \dots, n$  — ВБР ФЭ СЛО, а  $\alpha_i, i = 1, \dots, m$  — интенсивность реализации режимов функционирования СЛО.

Предположив, что все ФЭ СЛО однородные по ВБР (т. е.  $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$ ), рассчитанный вероятностный полином (1) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} \mathfrak{X}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) &= \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \\ &+ \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \\ &+ \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n. \end{aligned}$$

Вектор-функцию от параметров  $\alpha_i, i = 1, \dots, m$

$$\bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^{\hat{O}}$$

было предложено назвать параметрическим геномом структуры многорежимного СЛО [13, 14]. Данная концепция параметрического генома структуры многорежимного СЛО позволила оценить показатели структурно-функциональной надежности и живучести таких объектов с учетом характера реализации режимов их функционирования и отсутствия знаний о циклограммах их задействования [13, 14].

Кроме того, анализ проведенных исследований [13, 14] показал, что при решении задач многокритериального структурно-параметрического синтеза сложных многорежимных объектов с перестраиваемой структурой на этапах разработки и создания следует принимать во внимание различные варианты задействования динамических режимов функционирования, влияющих на надежность и живучесть рассматриваемых объектов.

Наиболее заметные и удачные применения разработанных концепций выполнены в области управления производством, транспортной логистики, аэрокосмических приложений [8, 13, 14].

## Заключение

Таким образом, в данной статье затрагивается весьма интересная и актуальная тема, касающаяся моделирования прогнозных цифровых двойников многорежимных сложных объектов как с монотонной, так и с немонотонной структурной функцией. Действительно, немонотонная природа таких систем подразумевает, что их поведение под воздействием различных режимов функционирования может быть совершенно непредсказуемым, что, в свою очередь, затрудняет процесс моделирования и верификации.

Предложенный подход, основанный на концепции параметрического генома функциональной структуры, выглядит многообещающе. Он может обеспечить более глубокое понимание внутренней динамики системы, благодаря чему возможно более точное предсказание ее поведения в условиях изменяющихся параметров и режимов работы.

В отсутствие циклограмм, которые обычно помогают контролировать и анализировать режимы функционирования, необходимо разрабатывать новые методы, позволяющие учесть все возможные сценарии взаимодействия различных режимов. Это, в свою очередь, подчеркивает важность гибкости и адаптивности в моделировании таких систем. Дальнейшие исследования по влиянию характера и интенсивности задействования режимов на надежность и живучесть системы также являются крайне важными. Понимание того, как различные режимы взаимодействуют и влияют друг на друга, поможет не только в улучшении

характеристик надежности, но и в разработке более эффективных методов диагностики и защиты от деструктивных воздействий. Это будет способствовать созданию более устойчивых и жизнеспособных систем, что крайне актуально в современных условиях, когда операционные среды становятся все более сложными и непредсказуемыми.

Таким образом, данный подход может сыграть ключевую роль в развитии теории и практики моделирования многорежимных немонотонных систем, предлагая новые подходы к их оптимизации и управлению.

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Industry 4 and Industry 5.0 — Inception, Conception and Perception / X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, L. Wang // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 61. Pp. 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
2. de Souza R. O., Ferenhof H. A., Forcellini F.A. Industry 4 and Industry 5 from the Lean Perspective // *International Journal of Management, Knowledge and Learning*. 2022. Vol. 11. Pp. 145–155. DOI: 10.53615/2232-5697.11.145-155.
3. What is a Digital Twin? — Definitions and Insights from an Industrial Case Study in Technical Product Development / J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, C. Engel [et al.] // *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. 2020. Pp. 757–766. DOI: 10.1017/dsd.2020.15.
4. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов / В. Н. Калинин, А. Ю. Кулаков, А. Н. Павлов [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20, № 2. С. 236–269. DOI: 10.15622/ia.2021.20.2.1.
7. Городецкий В. И., Скобелев П. О. Многоагентные технологии для индустриальных приложений: реальность и перспектива // *Труды СПИИРАН*. 2017. Вып. 6 (55). С. 11–45. DOI: 10.15622/sp.55.1.
8. Павлов А. Н. Классификация монотонных и немонотонных информационных систем на основе генома структуры // *Труды СПИИРАН*. 2012. Вып. 2 (21). С. 238–248. DOI: 10.15622/sp.21.15.
9. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 384 с.
10. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можяева. СПб.: Санкт-Петербургское региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.
11. Ivanov D. A., Pavlov A. N., Sokolov B. V. Optimal Distribution (Re)planning in a Centralized Multi-Stage Supply Network Under Conditions of the Ripple Effect and Structure Dynamics // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 237, Iss. 2. Pp. 758–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.02.023.
12. Проектирование надежных спутников связи / под ред. М. Ф. Решетнева. Томск: Раско, 1993. 221 с.
13. Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта / А. Н. Павлов, Д. А. Павлов, А. Б. Умаров, А. В. Гордеев // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21, № 4. С. 812–845. DOI: 10.15622/ia.21.4.7.

14. Study of Technology for the Reliability and Survivability Modelling of Onboard Control System of Small Spacecraft Operating in Complex Modes / A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, A. Yu. Kulakov, V. V. Zakharov // Journal of Applied Engineering Science. 2024. Vol. 22, No. 3. Pp. 612–620. DOI: 10.5937/jaes0-50149.

Дата поступления: 17.02.2025

Решение о публикации: 02.03.2025

## An Approach to Predictive Digital Twin Modelling of Complex Multimode Objects

**Alexander N. Pavlov<sup>1,2</sup>** — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems Space Complexes, Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling. Research interests: systems analysis and operations research by conditions of substantial uncertainty, the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. E-mail: pavlov62@list.ru

**Valentin N. Vorotyagin<sup>1</sup>** — PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Technologies and Automation of Information Processing and Analysis of Space Assets. Research interests: development of scientific foundations of the theory of control of structural dynamics of complex organizational and technical systems. E-mail: vorotyagin@rambler.ru

<sup>1</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th Line V. O., Saint Petersburg, 199178, Russia

**For citation:** Pavlov A. N., Vorotyagin V. N. An Approach to Predictive Digital Twin Modelling of Complex Multimode Objects. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 37–45. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-37-45. (In Russian)

**Abstract.** *The development of modelling tools is a key factor in the creation and implementation of intelligent (predictive) digital twins. As a rule, many complex objects (CO) are multi-mode, i.e. a priori they have the property of non-monotony. Changes in the content of the goals and tasks required from the object, as well as the destructive effects of the external environment, lead to uncertainty in the CO functioning, which is associated with the intensity and nature of their various modes of operation. **Purpose:** the stated above situation requires a new approach to the study of multimode non-monotonic systems in conditions of significant uncertainty. **Results:** the object operation modes in the form of vertices of functional integrity schemes of the general logical-probabilistic method (GLPM) of calculus shows that the functional structure of a multi-mode object becomes non-monotonic. This situation, as well as lack of knowledge about the intensity and nature of these modes' use, required the authors to develop a model-algorithmic superstructure over the GLPM. It is based on the concept of a parametric genome of functional structures of multi-mode CO. **Practical significance:** the proposed approach made it possible to evaluate the indicators of structural and functional reliability and sustainability of such objects in the absence of knowledge about their operating mode cyclograms. Based on the approach outlined in the article, it is necessary to develop new methods that allow monitoring and management of CO operating modes.*

**Keywords:** *digital twin, multimode object, functional integrity scheme, non-monotonic system, parametric genome*

## REFERENCES

1. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. Industry 4 and Industry 5.0 — Inception, Conception and Perception, *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, Vol. 61, Pp. 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
2. de Souza R. O., Ferenhof H. A., Forcellini F.A. Industry 4 and Industry 5 from the Lean Perspective, *International Journal of Management, Knowledge and Learning*, 2022, Vol. 11, Pp. 145–155. DOI: 10.53615/2232-5697.11.145-155.
3. Trauer J., Schweigert-Recksiek S., Engel C., et al. What is a Digital Twin? — Definitions and Insights from an Industrial Case Study in Technical Product Development, *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 2020, Pp. 757–766. DOI: 10.1017/dsd.2020.15.
4. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, Pp. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
5. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intellektualnye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh obektov [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publishers, 2006, 410 p. (In Russian)
6. Kalinin V. N., Kulakov A. Yu., Pavlov A. N., et al. Metody i algoritmy sinteza tekhnologiy i programm upravleniya rekonfiguratsiy bortovykh sistem malomassorazmernykh kosmicheskikh apparatov [Methods and Algorithms for the Synthesis of Technologies and Programs for Controlling the Reconfiguration of On-board Systems of Small-Sized Spacecrafts], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2021, Vol. 20, No. 2, Pp. 236–269. DOI: 10.15622/ia.2021.20.2.1. (In Russian)
7. Gorodetsky V. I., Skobelev P. O. Mnogoagentnye tekhnologii dlya industrialnykh prilozheniy: realnost i perspektiva [Industrial Applications of Multi-Agent Technology: Reality and Perspectives], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2017, Iss. 6 (55), Pp. 11–45. DOI: 10.15622/sp.55.1. (In Russian)
8. Pavlov A. N. Klassifikatsiya monotonykh i nemonotonykh informatsionnykh sistem na osnove genoma struktury [The Classification of Monotonous and Nonmonotonous Information Systems Based on Genome of Structure], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2012, Iss. 2 (21), Pp. 238–248. DOI: 10.15622/sp.21.15. (In Russian)
9. Yablonsky S. V. Vvedenie v diskretnuyu matematiku [Introduction to discrete mathematics]. Moscow: Nauka Publishers, 1986, 384 p. (In Russian)
10. Polenin V. I., Ryabinin I. A., Svirin S. K., Gladkova I. A. Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsionalnykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: monografiya [Application of the general logical-probabilistic method for the analysis of technical, military organizational-functional systems and armed confrontation: Monograph]. Saint Petersburg, Russian Academy of Natural Science, 2011, 416 p. (In Russian)
11. Ivanov D. A., Pavlov A. N., Sokolov B. V. Optimal Distribution (Re)planning in a Centralized Multi-Stage Supply Network Under Conditions of the Ripple Effect and Structure Dynamics, *European Journal of Operational Research*, 2014, Vol. 237, Iss. 2, Pp. 758–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.02.023.
12. Reshetnev M. F. (ed.) Proektirovanie nadezhnykh sputnikov svyazi [Design of reliable communication satellites]. Tomsk, Rasko Publishing House, 1993, 221 p. (In Russian)
13. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Umarov A. B., Gordeev A. V. Metod strukturno-parametricheskogo sinteza konfiguratsiy mnogorezhimnogo obekta [Method of Structural-Parametric Synthesis of Configuration Multi-Mode Object], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2022, Vol. 21, No. 4, Pp. 812–845. DOI: 10.15622/ia.21.4.7. (In Russian)
14. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Kulakov A. Yu., Zakharov V. V. Study of Technology for the Reliability and Survivability Modelling of Onboard Control System of Small Spacecraft Operating in Complex Modes, *Journal of Applied Engineering Science*, 2024, Vol. 22, No. 3, Pp. 612–620. DOI: 10.5937/jaes0-50149.

Received: 17.02.2025

Accepted: 02.03.2025

УДК 681.51

## Определение координат транспортного объекта при дефиците сигналов с помощью модели нечеткого вывода Такаги — Сугено

- Фоменко Юлия Сергеевна**<sup>1</sup> — аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, нечеткие интеллектуальные системы, системы искусственного интеллекта. E-mail: yu.srgvn@gmail.com
- Хомоненко Анатолий Дмитриевич**<sup>1,2</sup> — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы»; профессор кафедры «Математическое и программное обеспечение». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

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

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

**Для цитирования:** Фоменко Ю. С., Хомоненко А. Д. Определение координат транспортного объекта при дефиците сигналов с помощью модели нечеткого вывода Такаги — Сугено // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 46–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-46-55

**Аннотация.** Актуальность задач определения координат транспортных объектов в режиме реального времени возрастает в условиях информационной «слепоты», когда традиционные методы навигации становятся недоступными. Особую значимость это приобретает на железнодорожном транспорте, где ошибки в позиционировании могут привести к катастрофическим последствиям. **Цель:** разработка алгоритма на основе нечеткого вывода Такаги — Сугено для повышения точности и надежности определения координат транспортных объектов в условиях дефицита данных. **Методы:** предложена адаптивная модель, интегрирующая нечеткую логику для обработки неполных и противоречивых сигналов. Алгоритм реализует многоуровневый анализ данных с учетом динамики движения и внешних помех для критических участков инфраструктуры. **Результаты:** проведены компьютерные эксперименты применительно к участкам железнодорожных путей с ограниченным числом датчиков. Разработаны рекомендации по использованию алгоритма для поддержки принятия решений. **Обсуждение:** доказана эффективность применения нечеткой логики для компенсации информационной «слепоты». Обозначены перспективы внедрения алгоритма в системы безопасности и диспетчеризации, а также необходимость дальнейшей оптимизации вычислительной сложности для высокоскоростных объектов.

**Ключевые слова:** идентификация, координаты объекта, транспортные объекты, алгоритм Такаги — Сугено, информационная «слепота», безопасность движения

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

## Введение

Современные системы управления транспортными потоками требуют высокоточного мониторинга местоположения объектов в режиме реального времени. На железнодорожном транспорте эта задача сопряжена с уникальными вызовами: ограниченная видимость, нестабильность датчиков, кибератаки на инфраструктуру и возникающая вследствие этого информационная «слепота» — состояние, при котором система теряет доступ к критически важным данным. Традиционные навигационные методы, включая GPS и RFID, в таких условиях демонстрируют снижение надежности, повышая риски аварий, столкновений и несанкционированного вмешательства.

Актуальность точного позиционирования обусловлена его ролью в обеспечении безопасности и оптимизации процессов. Определение координат транспортных средств в реальном времени позволяет:

- отслеживать их местоположение на карте при выполнении перевозок;
- реализовывать диспетчерское управление, предотвращать столкновения, корректировать маршруты;
- контролировать движение высокоскоростных поездов в условиях плотного трафика, тоннелей и сортировочных станций.

Особую значимость задача приобретает в контексте предотвращения аварийных ситуаций, где даже погрешность в 1–2 метра для высокоскоростного состава может привести к нарушению графика или чрезвычайному происшествию. Несмотря на многочисленные исследования в этой области, разработка систем, устойчивых к информационным помехам и дефициту сигналов, остается нерешенной проблемой.

Существующие подходы, включая статистические методы и нейросетевые алгоритмы, часто требуют значительных объемов данных и недостаточно адаптированы к условиям неопределенности. В качестве альтернативы предлагается использование нечеткой логики, в частности модели Такаги — Сугено, которая способна формализовать экспертные знания о динамике транспортных систем и эффективно об-

рабатывать неточные сигналы. Целью исследования является разработка алгоритма на ее основе, способного восстанавливать координаты объектов при частичной потере данных, что позволит повысить отказоустойчивость систем управления.

## Системы и технологии определения координат в режиме реального времени

Для определения координат транспортного средства в режиме реального времени можно использовать следующие технологии и системы:

1. GPS (глобальная навигационная спутниковая система): это наиболее распространенный способ определения местоположения. GPS-датчики устанавливаются на транспортные средства и передают координаты (широту и долготу) на сервер или мобильное устройство [1–3].

2. ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) — это российская спутниковая система, аналогичная GPS, которая позволяет определять координаты объектов на Земле. Она может быть использована для отслеживания транспортных средств в режиме реального времени [4].

3. GSM (глобальная система мобильной связи) и GPRS (общий пакетный радиосервис) могут использоваться для определения координат транспортного средства и передачи этой информации на стационарный пункт.

4. Интернет вещей (IoT) [5, 6] активно используется для определения координат транспортных средств, что позволяет улучшить управление логистикой, повысить безопасность и оптимизировать маршруты.

5. RFID (Radio Frequency Identification) — беспроводная коммуникационная технология, которая использует радиоволны для автоматической идентификации помеченных объектов или вещей [7].

6. Поддержка принятия решения на основе нечеткого вывода — мощный инструмент определения координат транспортного объекта в условиях информационной «слепоты».



Сравнительная характеристика технологий представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительная характеристика систем и технологий определения координат объектов**

Система	Принцип работы	Требуемое оборудование	Программное обеспечение	Область применения	Преимущества	Недостатки
GPS	Приемник GPS определяет местоположение, принимая сигналы от нескольких спутников	GPS-навигаторы; смартфоны с GPS-модулями	Программное обеспечение для навигации, например Google Maps	Автотранспорт; авиация; морской транспорт и др.	Точность	Сложности с работой на территории России
ГЛОНАСС	Спутники передают сигналы приемникам на объекте	Спутник; приемник на объекте; модуль передачи данных	Программное обеспечение для мониторинга, анализа маршрутов и скоростей	Логистика и транспорт; пассажирские перевозки; сельское хозяйство и др.	Точность; доступность на территории России; интеграция с другими системами	Необходимость синхронизации с другими системами
GSM/GPRS	GPS-трекер совмещает GNSS-приемник и GSM-модуль. Определяет координаты, скорость движения и передает данные через GPRS-канал сотовой связи	Стационарное или мобильное оборудование для систем GPS-трекинга	Широкий спектр приложений для трекинга объектов	Логистика и транспорт; пассажирские перевозки; сельское хозяйство и др.	Широкое покрытие	Плохое качество сигнала в удаленных регионах; потенциальные проблемы с безопасностью данных, передаваемых по Сети
Интернет вещей (IoT)	Связывание устройств через интернет для сбора и передачи данных	GPS-трекеры; сенсоры	Облачные платформы для обработки и анализа данных	Мониторинг активов; оптимизация процессов; безопасность	Возможность подключения к другим устройствам IoT; автоматизация процессов	Зависимость от качества интернета; потребность в большом объеме данных
RFID	RFID-метки (теги) бывают активными (с батареей) и пассивными (питаются от считывателя). Считыватель получает данные метки при ее нахождении в зоне действия	Метки (теги); считыватели	Специализированное ПО для управления RFID-системами	Управление доступом к объектам; инвентаризация товаров; контроль доступа персонала	Простота внедрения и использования; возможность автоматической идентификации объектов	Ограниченный диапазон действия считывателей; затраты на внедрение и поддержку
Принятие решений на основе нечеткого вывода	Анализ текущей обстановки системой нечеткого вывода на основе обширной базы знаний	Компьютеры с поддержкой нечеткого вывода; база знаний	Программное обеспечение для управления правилами нечеткого вывода	Транспортировка грузов; управление активами; мониторинг событий	Работает при недостатке данных; настройка правил «на лету»; совместимость со сторонними системами	Большой объем данных для формирования базы знаний; сложность в разработке и настройке

## Определение координат объекта на основе нечеткого вывода

Принятие решения на основе нечеткого вывода [8–10] может успешно применяться для определения координат транспортного объекта, особенно в условиях неопределенности и неполной информации. Основные преимущества применения нечеткого вывода:

### 1. Возможность работы в условиях информационной «слепоты»

Нечеткая логика позволяет работать с неопределенными и размытыми данными. В отличие от других систем определения координат, где значения принимают четкие значения, нечеткая логика позволяет использовать промежуточные значения, что делает ее более подходящей для реальных сценариев, где данные могут быть неточными.

### 2. Разнородность входных данных

Система может принимать различные входные данные, такие как:

- данные GPS (координаты, скорость, направление движения);
- данные от сенсоров (например, уровень топлива, состояние дороги);
- информация о погодных условиях;
- данные о трафике (загруженность дорог, наличие аварий).

### 3. Возможность формулирования условий в виде нечетких правил

Система принятия решения строится на базе нечетких правил для принятия решений.

### 4. Результат принятия решения представлен в виде нечеткого вывода

Поскольку для формирования базы знаний используются нечеткие правила, результат представляется в виде нечеткого вывода. Например, если транспортное средство следует к зоне с высокой вероятностью загрузки пути следования, то система может рекомендовать альтернативный маршрут.

### 5. Взаимозаменяемость смежных систем

Например:

- если GPS-сигнал слабый, система может использовать данные от других сенсоров (например, акселерометры) для более точного определения местоположения;

- если транспортное средство движется по сложной местности (например, в горах или в городских условиях с высокими зданиями), нечеткая логика может помочь оценить возможные ошибки в определении координат.

## 6. Выводы

На основе анализа данных и нечетких правил система может предоставлять рекомендации:

- оптимизация маршрута с учетом текущих условий;
- рекомендации по остановкам (например, для заправки или отдыха);
- оценка рисков и предупреждения о потенциальных проблемах на маршруте.

Таким образом, система поддержки принятия решения на основе нечеткого вывода может значительно повысить точность и надежность определения координат транспортного средства, особенно в условиях неопределенности.

## Математическая модель алгоритма Такаги — Сугено

Модель Такаги — Сугено может быть использована для определения координат транспортного средства, например в задачах навигации или управления движением. В этом случае модель строится на основе нечетких правил, которые связывают входные данные с выходными данными.

Выбор алгоритма нечеткого вывода Такаги — Сугено [11] обусловлен проведенным анализом сравнения с алгоритмом Мамдани [9, 10], результаты которого представлены в табл. 2.

Обобщенное математическое представление алгоритма Такаги — Сугено имеет следующий вид:

### 1. Нечеткие правила

Модель Такаги — Сугено состоит из набора нечетких правил, которые имеют следующее математическое представление:

Если  $x_1$  есть  $A_1$  и  $x_2$  есть  $A_2$  и ... и  $x_n$  есть  $A_n$ ,  
то  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — входные переменные;

$A_1, A_2, \dots, A_n$  — нечеткие множества;

$y$  — выходная переменная;

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  — линейная функция входных переменных.

Таблица 2

Сравнительная таблица характеристик алгоритмов нечеткого вывода  
Мамдани и Такаги — Сугено

Характеристика	Такаги — Сугено	Мамдани
Вычислительная сложность	Низкая (нет дефаззификации)	Высокая (требуется дефаззификация)
Точность	Высокая (линейные зависимости)	Среднее (нечеткие множества)
Адаптивность	Высокая (подходит для сложных систем)	Ограниченная
Настройка	Относительно простая (меньшая зависимость от экспертов)	Сложная (требуется обширная экспертная оценка)
Применение	Управление, прогнозирование	Экспертные системы, диагностика
Масштабируемость	Высокая	Ограниченная

## 2. Линейная функция в заключении

В модели Такаги — Сугено заключение правила представляет собой линейную функцию входных переменных:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n,$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n$  — коэффициенты, характеризующие термы каждого нечеткого множества модели.

## 3. Агрегация выходов

Для каждого правила вычисляется степень его активации,  $w_n$ , на основе функций принадлежности:

$$w = \mu_{A_1}(x_1)\mu_{A_2}(x_2)\dots\mu_{A_n}(x_n),$$

где  $\mu_{A_j}(x_j)$  — значение функции принадлежности для входной переменной  $x_j$ .

## 4. Итоговый выход модели

Итоговый выход модели Такаги — Сугено вычисляется как взвешенная сумма выходов всех правил:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i y_i}{\sum_{i=1}^N w_i},$$

где  $N$  — количество правил;

$w_i$  — степень активации  $i$ -го правила;

$y_i$  — выход  $i$ -го правила.

Преимущество данной модели заключается в:

- простоте интерпретации благодаря линейным функциям в заключении;
- возможности аппроксимации сложных нелинейных систем;
- эффективности в задачах управления и прогнозирования;

- широком применении в системах управления, идентификации систем, где требуется высокая точность и интерпретируемость.

Рассмотрим модель Такаги — Сугено для определения координат транспортного средства (поезда) в масштабах реального времени на основе количественных и качественных входных (скорость, угол поворота, ускорение/замедление, положение поезда на пути, наклон пути, тормозной путь, время реакции системы, целевая скорость, состояние пути и внешние условия) и выходных (координаты транспортного средства) данных.

### 1. Входные переменные

Пусть входными переменными являются:

- $v$  — текущая скорость поезда — используется для оценки динамики движения и принятия решений о торможении или ускорении;
- $\theta$  — угол поворота;
- $\alpha$  — текущее ускорение или замедление — позволят учитывать изменение скорости и прогнозировать будущее состояние.

### 2. Нечеткие правила

Модель состоит из набора нечетких правил, которые описывают, как совокупность входных переменных влияет на изменение координат:

Если  $v$  есть  $A_i$  и  $\theta$  есть  $B_j$  и  $\alpha$  есть  $C_k$ ,

то  $\Delta x = f_{ij}^x(v, \theta, \alpha)$ ,  $\Delta y = f_{ij}^y(v, \theta, \alpha)$ ,

где  $A_i, B_j, C_k$  — нечеткие множества для входных переменных;

$\Delta x, \Delta y$  — изменение координат транспортного средства;

$f_{ij}^x, f_{ij}^y$  — линейные функции, описывающие изменение координат.

### 3. Линейные функции заключения

В модели Такаги — Сугено функции  $f_{ij}^x$  и  $f_{ij}^y$  являются линейными:

$$f_{ij}^x = a_{ij}^x + b_{ij}^x v + c_{ij}^x \theta + d_{ij}^x \alpha;$$

$$f_{ij}^y = a_{ij}^y + b_{ij}^y v + c_{ij}^y \theta + d_{ij}^y \alpha,$$

где  $a_{ij}^x, b_{ij}^x, c_{ij}^x, d_{ij}^x, a_{ij}^y, b_{ij}^y, c_{ij}^y, d_{ij}^y$  — коэффициенты, характеризующие термы каждого нечеткого множества.

### 4. Степень активации правил

Для каждого правила вычисляется степень его активации  $w_{ij}$  на основе функций принадлежности:

$$w_{ij} = \mu_{A_i}(v) \mu_{B_j}(\theta) \mu_{C_k}(\alpha),$$

где  $\mu_{A_i}(v), \mu_{B_j}(\theta), \mu_{C_k}(\alpha)$  — значение функций принадлежности для входных переменных.

### 5. Итоговое измерение координат

Итоговое измерение координат вычисляется как взвешенная сумма выходов всех правил:

$$\Delta x = \frac{\sum_{ijk} w_{ij} j \Delta x_{ij}}{\sum_{ijk} w_{ij}};$$

$$\Delta y = \frac{\sum_{ijk} w_{ij} j \Delta y_{ij}}{\sum_{ijk} w_{ij}}.$$

### 6. Обновление координат

Координаты транспортного средства обновляются на каждом шаге времени:

$$x(t+1) = x(t) + \Delta x,$$

$$y(t+1) = y(t) + \Delta y.$$

**Преимущества** выбора данной модели как основной для поддержки принятия решения заключаются в следующем:

- возможности учета нелинейных зависимостей в движении поезда;
- возможности адаптации к различным условиям движения (прямые участки, кривые, подъемы, спуски) и воздействия негативных факторов (метель, ураган, смерч и т. д.);
- оптимизации движения за счет минимизирования энергопотребления и времени в пути;
- простоте интерпретации и настройки модели.

### Пример расчета координат движения поезда с использованием модели Такаги — Сугено на основе трех основных характеристик движения

Рассмотрим пример расчета координат движения поезда с использованием модели Такаги — Сугено. Для примера будем использовать координаты, описанные выше: скорость поезда ( $v$ ), угол поворота ( $\theta$ ) и текущее ускорение/замедление ( $\alpha$ ).

#### 1. Определение входных и выходных переменных

Входные переменные:

- скорость ( $v$ ): от 0 до 10 км/ч;
- угол поворота ( $\theta$ ): от  $-30^\circ$  до  $30^\circ$ .
- текущее ускорение/замедление ( $\alpha$ ): от  $-5$  м/с<sup>2</sup> до  $5$  м/с<sup>2</sup>.

Выходные переменные:

- изменение координаты  $\Delta x$ ;
- изменение координаты  $\Delta y$ .

#### 2. Функции принадлежности

Для скорости:

- «Малая» (0–40 км/ч).
- «Средняя» (30–70 км/ч).
- «Высокая» (60–100 км/ч).

Для угла поворота:

- «Малый» ( $-30^\circ$ – $0^\circ$ ).
- «Средний» ( $-15^\circ$ – $15^\circ$ ).
- «Большой» ( $0^\circ$ – $30^\circ$ ).

Для ускорения/замедления:

- Отрицательное ( $-5$ – $0$  м/с<sup>2</sup>).
- Нулевое ( $-2,5$ – $2,5$  м/с<sup>2</sup>).
- Положительно ( $0$ – $5$  м/с<sup>2</sup>).

#### 3. Нечеткие правила

• Правило 1: если  $v$  есть «Малая» и  $\theta$  есть «Малый», и  $\alpha$  есть «Отрицательная», то  $\Delta x = 0,1 v + 0,05 \theta + 0,05 \alpha$ ,  $\Delta y = 0,05 v + 0,1 \theta + 0,01 \alpha$ .

• Правило 2: если  $v$  есть «Средняя» и  $\theta$  есть «Средний», и  $\alpha$  есть «Нулевое», то  $\Delta x = 0,15 v + 0,1 \theta + 0,03 \alpha$ ,  $\Delta y = 0,1 v + 0,15 \theta + 0,02 \alpha$ .

• Правило 3: если  $v$  есть «Высокая» и  $\theta$  есть «Большой», и  $\alpha$  есть «Положительное», то  $\Delta x = 0,2 v + 0,15 \theta + 0,05 \alpha$ ,  $\Delta y = 0,15 v + 0,2 \theta + 0,03 \alpha$ .

#### 4. Пример входных данных

- скорость  $v$ : 50 км/ч;
- угол поворота  $\theta$ :  $10^\circ$ ;
- ускорение/замедление  $\alpha$ : 2 м/с<sup>2</sup>.

## 5. Расчет степени активации правил

Для скорости 50 км/ч:

- принадлежность к «Малая»: 0,0;
- принадлежность к «Средняя»: 1,0;
- принадлежность к «Высокая»: 0,0.

Для угла 10°:

- принадлежность к «Малый»: 0,0;
- принадлежность к «Средний»: 1,0;
- принадлежность к «Большой»: 0,0.

Для ускорения 2 м/с<sup>2</sup>:

- принадлежность к «Отрицательное»: 0,0;
- принадлежность к «Нулевое»: 0,6;
- принадлежность к «Положительная»: 0,4.

Степень активации правил:

- Правило 1:  $w_1 = 0,0 \cdot 0,0 \cdot 0,0 = 0,0$ .
- Правило 2:  $w_2 = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,6 = 0,6$ .
- Правило 3:  $w_3 = 0,0 \cdot 0,0 \cdot 0,4 = 0,0$ .

## 6. Вычисление выходов правил

Правило 2:

$$\Delta x_2 = 0,15 \cdot 50 + 0,1 \cdot 10 + 0,03 \cdot 2 = 7,5 + 1,0 + 0,06 = 8,5,$$

$$\Delta y_2 = 0,1 \cdot 50 + 0,15 \cdot 10 + 0,02 \cdot 2 = 5 + 1,5 + 0,04 = 6,54.$$

## 7. Агрегация выходов

$$\Delta x = \frac{w_1 \Delta x_1 + w_2 \Delta x_2 + w_3 \Delta x_3}{w_1 + w_2 + w_3} = \frac{0,0 + 8,56 + 0,0}{0,0 + 0,6 + 0,0} = 14,2,$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{w_1 \Delta y_1 + w_2 \Delta y_2 + w_3 \Delta y_3}{w_1 + w_2 + w_3} = \\ &= \frac{0,0 + 6,54 + 0,0}{0,0 + 0,6 + 0,0} = 10,9. \end{aligned}$$

## 8. Обновление координат

Если текущие координаты поезда  $x(t) = 100$  м,  $y(t) = 200$  м, то:

$$x(t+1) = 114,2 \text{ м.}$$

$$y(t+1) = 210,9 \text{ м.}$$

Таким образом, рассмотренный пример показал, что предлагаемый метод позволяет рассчитать предполагаемое положение транспортного средства.

## Заключение

Поддержка принятия решений, основанная на нечеткой логике модели Такаги — Сугено, может быть эффективно использована для определения координат объектов железнодорожного транспорта.

Применение нечеткого вывода на основе модели Такаги — Сугено для железной дороги имеет следующие **достоинства**:

1. *Учет неопределенности и неточности данных*: железнодорожные системы часто работают в условиях неопределенности (например, состояние путей, человеческий фактор и др.). Нечеткая логика позволяет эффективно обрабатывать данные в условиях «информационной слепоты», а также их нечеткости.

2. *Адаптивность*: модель Такаги — Сугено может адаптироваться к изменяющимся условиям, таким как изменение скорости поезда, угла поворота, состояния пути и многое другое.

3. *Простота интерпретации*: нечеткие правила в базе знаний нечеткой модели легко интерпретировать и настраивать, что позволяет сделать систему понятной для оператора, машиниста и инженера.

4. *Эффективность в нелинейных системах*: железнодорожные системы часто имеют нелинейные зависимости (например, зависимость тормозного пути от скорости и состояния пути). Для разрешения таких зависимости модель Такаги — Сугено является мощным инструментом.

5. *Возможность интеграции с другими системами*: нечеткий вывод на основе модели Такаги — Сугено можно интегрировать с системами автоматического управления, мониторинга и прогнозирования.

6. *Снижение аварийности*: с помощью модели Такаги — Сугено можно заблаговременно спрогнозировать и подать верный управляющий сигнал в опасных ситуациях (например, повышение скорости на криволинейных участках) для предотвращения критических ситуаций.

7. *Оптимизация движения*: модель Такаги — Сугено может помочь оптимизировать скорость и маршрут железнодорожного транспорта, например, снизив энергопотребление и увеличив пропускную способность на конкретном участке пути.

К **недостаткам** применения модели Такаги — Сугено на железной дороге относятся:

1. *Сложность настройки модели*: для создания эффективной модели требуется обширная база

знаний и точная настройка функций принадлежности, что может быть трудоемким процессом.

2. *Зависимость от качества данных*: если входные данные (например, скорость, угол поворота, состояние пути) зашумлены, это может привести к ошибочным решениям.

3. *Вычислительная сложность*: для высокой точности при большом количестве входных переменных и правил вычислительная сложность модели может увеличиваться, что требует мощных вычислительных ресурсов.

4. *Ограниченная способность к обучению*: в отличие от нейронных сетей, модель Такаги — Сугено не обладает способностью к самообучению. Для ее улучшения требуется ручная корректировка правил и параметров.

5. *Трудности масштабирования*: модель, разработанная для одного участка железной дороги,

может не подходить для других участков без значительной доработки.

6. *Зависимость от экспертных знаний*: для создания правил и функций принадлежности часто требуются экспертные знания, которые может быть трудно получить.

Таким образом, для успешного внедрения системы поддержки принятия решений на основе нечеткого вывода Такаги — Сугено важно и полезно:

- тщательно настроить функции принадлежности и создать обширную базу знаний;
- обеспечить высокое качество входных данных;
- интегрировать систему с другими технологиями (например, IoT для сбора данных).

Анализ работ [12, 13] показал, что актуальное дальнейшее направление исследований и разработок может быть связан с организацией управления беспилотного транспортного средства на железной дороге.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сарайкин А. И., Аралбаев Т. З., Хасанов Р. И. Позиционирование мобильного объекта на дорожном полотне в условиях дефицита информации // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4 (179). С. 114–118.
2. Хруль С. А., Сонькин Д. М. Повышение точности позиционирования подвижных объектов на основе оригинальных методов фильтрации навигационных данных // Науковедение. 2013. № 4 (17). 11 с.
3. Антонович К. М., Карпик А. П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2004. № 1. С. 53–67.
4. ГЛОНАСС — стратегический ресурс России / А. Ю. Данилюк, С. Г. Ревнивых, Н. А. Тестоедов [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. Вып. 6 (52). С. 17–23.
5. Ядровская М. В., Поркшеян М. В., Синельников А. А. Перспективы технологии интернета вещей // Advanced Engineering Research. 2021. Т. 21, № 2. С. 207–217. DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217.
6. Gerber A., Romeo J. Connecting All the Things in the Internet of Things // IBM Developer. 2020. 30 January. URL: <http://developer.ibm.com/articles/iot-lp101-connectivity-network-protocols> (дата обращения: 09.02.2025).
7. Provotorov A., Privezentsev D., Astafiev A. Development of Methods for Determining the Locations of Large Industrial Goods During Transportation on the Basis of RFID // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 1005–1009. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.163.
8. Методика применения нечетких множеств в системе поддержки принятия решений робототехнического комплекса / С. В. Войцеховский, У. Ю. Головчанская, С. В. Логашев, Ю. С. Фоменко // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2018. № 2 (14). С. 34–40.
9. Хомоненко А. Д., Логашев С. В., Краснов С. А. Автоматическая рубрикация документов с помощью латентно-семантического анализа и алгоритма нечеткого вывода Мамдани // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 1 (44). С. 5–19.
10. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для оценки качества моделей искусственного интеллекта на основе имеющихся данных / С. Т. Дусакаева, М. П. Носарев, И. А. Хохлов, П. Л. Нирян // Со-

временные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 170–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).170-180.

11. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. SMC-15, Iss. 1. Pp. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.

12. Филатова Е. С., Девяткин А. В., Фридрих А. И. Система стабилизации БПЛА на основе нечеткой логики // Сборник докладов XX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM) 2017), (Санкт-Петербург, Россия, 24–26 мая 2017 г.). Т. 1. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 380–383.

13. Fakurian F., Menhaj M. B., Mohammadi A. Design of a Fuzzy Controller by Minimum Controlling Inputs for a Quadrotor // Proceedings of the Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM 2014), (Tehran, Iran, 15–17 October 2014). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 619–624. DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990971.

Дата поступления: 13.02.2025

Решение о публикации: 14.02.2025

## Detection of Transport Object Coordinates Under Signal Scarcity Using Takagi — Sugeno Fuzzy Inference Model

**Yulia S. Fomenko**<sup>1</sup> — Postgraduate Student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, fuzzy intelligent systems, artificial intelligence systems. E-mail: yu.srgvn@gmail.com.

**Anatoly D. Khomonenko**<sup>1,2</sup> — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Information and Computing Systems Department; Professor of the Mathematical and Software Engineering Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modelling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

**For citation:** Fomenko Yu. S., Khomonenko A. D. Detection of Transport Object Coordinates Under Signal Scarcity Using Takagi — Sugeno Fuzzy Inference Model. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 46–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-46-55. (In Russian)

**Abstract.** *The significance of real-time detection of transport object coordinates has increased in conditions of information “blindness” when traditional navigation methods become unavailable. This is especially important in rail transport where positioning errors can lead to catastrophic consequences. **Purpose:** to develop an algorithm based on Takagi — Sugeno fuzzy inference to improve the accuracy and reliability of detecting the transport object coordinates in conditions of data scarcity. **Methods:** an adaptive model integrating fuzzy logic for processing incomplete and contradictory signals is proposed. The algorithm implements multi-level data analysis taking into account the dynamics of movement and external interference for the infrastructure critical sections. **Results:** computer experiments have been conducted for railway sections with a limited number of track sensors. Recommendations on the algorithm application to support decision-making have been developed. **Discussion:** the effectiveness of using fuzzy logic to compensate for information “blindness” has been proven. The prospects for implementing the algorithm in security and dispatching systems, as well as the need for further optimization of computational complexity for high-speed objects have been outlined.*

**Keywords:** identification, object coordinates, transport objects, Takagi — Sugeno algorithm, information “blindness”, traffic safety

## REFERENCES

1. Saraikin A. I., Aralbaev T. Z., Khasanov R. I. Pozitsionirovanie mobilnogo obekta na dorozhnom polotne v usloviyakh defitsita informatsii [Positioning of Mobile Objects on the Roadway in a Deficit of Information], *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Vestnik of the Orenburg State University]*, 2015, No. 4 (179), Pp. 114–118. (In Russian)
2. Khrul S. A., Sonkin D. M. Povyshenie tochnosti pozitsionirovaniya podvizhnykh obektov na osnove originalnykh metodov filtratsii navigatsionnykh dannykh [Increasing Positioning Accuracy of Moving Objects Based on the Original Navigation Data Filtering Methods], *Naukovedenie*, 2013, No. 4 (17), 11 p. (In Russian)
3. Antonovich K. M., Karpik A. P. Monitoring obektov s primeneniem GPS-tekhnologiy [Monitoring of Objects Using GPS Technologies], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka [Proceedings of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 2004, No. 1, Pp. 53–67. (In Russian)
4. Danilyuk A. Yu., Revnivykh S. G., Testoedov N. A., et al. GLONASS — strategicheskii resurs Rossii [GLONASS Is the Strategic Resource of Russia], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva [Vestnik of the Reshetnev Siberian State Aerospace University]*, 2013, Iss. 6 (52), Pp. 17–23. (In Russian)
5. Yadvorskaya M. V., Porsheyev M. V., Sinelnikov A. A. Prospects of IoT Technology, *Advanced Engineering Research*, 2021, Vol. 21, No. 2, Pp. 207–217. DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217.
6. Gerber A., Romeo J. Connecting All the Things in the Internet of Things, *IBM Developer*. Published online January 30, 2020. Available at: <http://developer.ibm.com/articles/iot-lp101-connectivity-network-protocols> (accessed: 09.02.2025).
7. Provotorov A., Privezentsev D., Astafiev A. Development of Methods for Determining the Locations of Large Industrial Goods During Transportation on the Basis of RFID, *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 129, Pp. 1005–1009. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.163.
8. Voytsekhovskiy S. V., Golovchanskaya U. Yu., Logashev S. V., Fomenko Yu. S. Metodika primeneniya nechetkikh mnozhestv v sisteme podderzhki prinyatiya resheniy robototekhnicheskogo kompleksa [Method of Application of Fuzzy Sets in the System of Support of Decision-Making of the Robotechnical Complex], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2018, No. 2 (14), Pp. 34–40. (In Russian)
9. Khomonenko A. D., Logashev S. V., Krasnov S. A. Avtomaticheskaya rubrikatsiya dokumentov s pomoshchyu latentno-semanticheskogo analiza i algoritma nechetkogo vyvoda Mamdani [Automatic Categorization of Documents Using Latent Semantic Analysis and Fuzzy Inference Algorithm of Mamdani], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2016, Iss. 1 (44), Pp. 5–19. (In Russian)
10. Dusakaeva S. T., Nosarev M. P., Khokhlov I. A., Niryan P. L. Primenenie algoritma nechetkoy logiki Mamdani dlya otsenki kachestva modeley iskusstvennogo intellekta na osnove imeyushchikhsya dannykh [Application of the Mamdani Fuzzy Logic Algorithm to Assess the Quality of Artificial Intelligence Models Based on Available Data], *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2023, No. 1 (77), Pp. 170–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).170-180. (In Russian)
11. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, Vol. SMC-15, Iss. 1, Pp. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
12. Filatova E. S., Devyatkin A. V., Fridrix A. I. Sistema stabilizatsii BPLA na osnove nechetkoy logiki [UAV Fuzzy Logic Stabilization System], *Sbornik dokladov XX Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam [Proceedings of the XX International Conference on Soft Computing and Measurement] (SCM'2017)*, St. Petersburg, Russia, May 24–26, 2017. Vol. 1. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2017, Pp. 380–383. (In Russian)
13. Fakurian F., Menhaj M. B., Mohammadi A. Design of a Fuzzy Controller by Minimum Controlling Inputs for a Quadrotor, *Proceedings of the Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM 2014)*, Tehran, Iran, October 15–17, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 619–624. DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990971.

Received: 13.02.2025

Accepted: 14.02.2025



УДК 656.073

## Математическая модель выкладки товаров с вложенной категоризацией на полочном пространстве торговой сети

**Черняховская Екатерина Сергеевна** — канд. наук по менеджменту и качеству, преподаватель. Научные интересы: оптимизация, программирование, распределение полочного пространства.  
E-mail: [kateryna.czerniachowska@ue.wroc.pl](mailto:kateryna.czerniachowska@ue.wroc.pl)

Вроцлавский университет экономики и бизнеса, Польша, 53-345, Вроцлав, ул. Командорская, 118-120

**Для цитирования:** Черняховская Е. С. Математическая модель выкладки товаров с вложенной категоризацией на полочном пространстве торговой сети // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 56–64. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-56-64

**Аннотация.** *Представлено исследование математической модели максимизации прибыли от продаж при соблюдении ограничений на размещение товаров на полках с позиции ретейлера. Цель: создание математической модели, оптимизирующей размещение товаров на доступном полочном пространстве магазина. Предлагаемая модель учитывает категоризацию товаров по группам и подгруппам. В частности, товары группируются в вертикальные категории по типам, а также в горизонтальные подгруппы по вложенным ценовым категориям. Обсуждение: рассматриваются преимущества и недостатки предложенной модели выкладки товаров. Практическая значимость: предложенная модель помогает улучшить эффективность использования торгового пространства, повысить доступность ключевых товаров и, как следствие, увеличить общие объемы продаж. Это исследование имеет большое значение для розничной торговой сети.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, оптимизация, распределение полочного пространства

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

### Введение

Категорийный менеджмент представляет собой важную и конкурентную область в розничной торговле. Его стратегии позволяют оптимизировать ассортимент товаров, обеспечивая клиентам доступ к необходимым товарам в подходящее время. С точки зрения ретейлера, категорийный менеджмент управляет объемом ассортимента, стратегиями ценообразования и продвижения. Визуальный мерчандайзинг и взаимодействие с потребителями являются ключевыми аспектами розничной торговли, признанными как исследователями, так и практиками [1–3]. Кроме того, эффективное управление категориями товаров помогает улучшить взаимо-

действие с поставщиками, что способствует более точному прогнозированию спроса и улучшению товарооборота. Важно отметить, что успешное применение категорийного менеджмента требует тесного сотрудничества всех подразделений компании, включая маркетинг, логистику и закупки, для достижения оптимального результата.

Соответствующая стратегия визуального мерчандайзинга играет критическую роль в стимулировании незапланированных покупок. Этот аспект включает в себя не только эстетическое оформление магазина, но и тактику размещения товаров, создание привлекательных витрин и точек привле-

чения внимания [4]. Правильное использование цветовых решений, освещения и пространственного зонирования помогает направить внимание покупателя на ключевые товары, создавая тем самым атмосферу, способствующую импульсным покупкам. Важную роль также играет сезонность и соответствие актуальным трендам, что позволяет ретейлерам оставаться конкурентоспособными и поддерживать интерес к продукции на протяжении всего года.

Хорошо спланированный визуальный мерчандайзинг может подтолкнуть покупателя к совершению дополнительных покупок, привлечь его внимание к продуктам, которые он не собирался приобретать изначально, и создать положительное впечатление о магазине в целом. Это особенно важно в условиях жесткой конкуренции, когда каждая возможность увеличить средний чек клиента имеет значимость для ретейлера. Создание эффективного уровня заинтересованности магазином среди покупателей является важным аспектом успешного визуального мерчандайзинга [5, 6]. Визуальный мерчандайзинг также способствует созданию позитивного эмоционального опыта у покупателей. В конечном итоге грамотное сочетание эстетики и функциональности способствует не только увеличению продаж, но и формированию лояльности к бренду, что становится важным конкурентным преимуществом на рынке.

На предприятиях розничной торговли решения о распределении полочного пространства принимаются на двух уровнях: 1) определение общего объема полочного пространства, выделенного для каждой товарной категории; 2) распределение этого пространства между отдельными товарами внутри каждой категории [7].

Исследование покупательского поведения позволяет точно определить, где находятся ключевые точки привлечения внимания в магазине, что существенно повышает эффективность размещения товаров. Анализ данных о поведении покупателей позволяет оптимизировать локацию и дизайн витрин, превращая их в эффективные инструменты для привлечения внимания и стимулирования импульсивных покупок.

## Постановка задачи

Описываемая задача ранее была опубликована в [8, 9]. В исследовании используются следующие переменные и параметры. Нижние индексы обозначают собственно индексы переменных, а верхние индексы обозначают описания переменных. Параметры и индексы следующие:  $K$  — количество категорий;  $G$  — количество подкатегорий;  $S$  — количество полок;  $P$  — количество товаров;  $k$  — индекс категории;  $g$  — индекс подкатегории;  $i$  — индекс полки;  $j$  — индекс товара. Параметры категории  $k$ :  $m_k$  — минимальный размер категории, процент от длины полки;  $t_k$  — максимальный допуск по размеру категории между полками. Параметры полки  $i$ :  $s_i^l$  — длина;  $s_i^d$  — глубина;  $s_i^h$  — высота;  $s_i^b$  — допустимая масса товаров. Параметры товара  $j$ :  $p_j^w$  — ширина;  $p_j^d$  — глубина;  $p_j^h$  — высота;  $p_j^b$  — масса;  $p_j^s$  — лимит поставки;  $p_j^n$  — прибыль;  $p_j^k$  — категория;  $p_j^g$  — подкатегория;  $p_j^v$  — коэффициент вложенности,  $p_j^v < 1$ , если  $p_j^v = 0$ , товар не может быть вложен друг в друга;  $p_j^c$  — кластер;  $f_j^{\min}$ ,  $f_j^{\max}$  — минимальное и максимальное количество фейсингов;  $c_j^{\min}$ ,  $c_j^{\max}$  — минимальное и максимальное количество каппингов на одну группу фейсингов;  $n_j^{\min}$ ,  $n_j^{\max}$  — минимальное и максимальное количество нестингов в одном фейсинге;  $s_j^{\min}$ ,  $s_j^{\max}$  — минимальное и максимальное количество полок для размещения товара;  $p_j^{o1}$  — бинарный параметр прямого положения;  $p_j^{o2}$  — бинарный параметр бокового положения.

$$p_j^{o1} = \begin{cases} 1, & \text{если прямое положение товара } j \text{ допустимо} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

$$p_j^{o2} = \begin{cases} 1, & \text{если боковое положение товара } j \text{ допустимо} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Переменные задачи:

$f_{ij}$  — количество фейсингов товара;  $c_{ij}$  — количество каппингов товара;  $n_{ij}$  — количество нестингов (вложений) товара;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если товар } j \text{ поставлен на полку } i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases};$$

$$y_{ij}^{o1} = \begin{cases} 1, & \text{если товар } j \text{ поставлен} \\ & \text{на полку } i \text{ в прямом положении} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases};$$

$$y_{ij}^{02} = \begin{cases} 1, & \text{если товар } j \text{ поставлен} \\ & \text{на полку } i \text{ в боковом положении} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Проблему можно сформулировать следующим образом. Некоторое количество товаров  $P$  распределены по  $K$  категориям и  $G$  ценовым подкатегориям, которые затем размещаются на  $S$  полках на планеграмме. На каждой планеграмме определено минимальное пространство, занимаемое категорией, что делает ее визуально привлекательной для покупателей. Категории товаров вертикальные. Ценовые подкатегории горизонтальные, т. е. товары могут быть размещены на полках большей или равной заданной ценовой подкатегории, но не могут быть размещены на полке более низкой ценовой подкатегории. Данное правило можно объяснить следующим образом: более дорогие товары (в более высокой ценовой подкатегории) располагаются на более высоких полках (на уровне глаз); более дешевые товары могут располагаться как на нижних полках, так и на верхних. Однако более дорогие товары не могут располагаться на менее выгодных, менее заметных полках. Одна из ключевых задач — это оптимизация использования доступного пространства, чтобы каждый товар был представлен на наиболее выгодном месте, соответствующем его ценовой категории. Для этого можно использовать методы категорийного менеджмента, где важно учитывать как стратегическое распределение товаров, так и психологию покупателя. Необходимо определить количество места на полках для каждой категории товаров, определив количество единиц каждого товара, максимизируя прибыль ретейлеров. Следовательно, задача оптимизации размещения товаров на полках должна быть направлена на увеличение прибыли, при этом учитывая ограничения по пространству и ценовым категориям.

В табл. 1 описаны правила расположения товаров на полках в соответствии с описанным способом. Товары из категории А и подкатегории 1 могут быть размещены на полках категорий А, Б, В, а также в подкатегориях 1, 2 и 3. Однако товары из категории В и подкатегории 3 не могут быть раз-

мещены на полках, предназначенных для других категорий и подкатегорий, так как это самые дорогие товары. Товар Б2 можно разместить на полках Б2, Б3, В2 и В3.

На рис. 1 показаны категории товаров на полках с разными ценовыми подкатегориями. Граница вертикальных категорий может быть гибкой или фиксированной. Параметры границы категории устанавливаются коэффициентом  $m_k$  (процент от длины полки) и коэффициентом  $t_k$  (процент от длины полки). Этот коэффициент позволяет контролировать, чтобы каждая категория товаров занимала соответствующую ей долю пространства, обеспечивая гармоничное и визуально привлекательное распределение. Важно, чтобы товары были размещены таким образом, чтобы они были легкодоступны для покупателей и создавали ощущение целостности и порядка на полке, что способствует улучшению покупательского опыта и увеличению вероятности покупки.

Таблица 1

**Правила распределения товаров по категориям и ценовым подкатегориям**

Категория	Подкатегория	А			Б			В		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
А	1	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	2		•	•		•	•		•	•
	3			•			•			•
Б	1				•	•	•	•	•	•
	2					•	•		•	•
	3						•			•
В	1							•	•	•
	2								•	•
	3									•

	А		Б		В	
3	А2	А3	Б1	Б3	В2	В3
2	А2		Б1	Б2	В1	В2
1	А1		Б1		В1	

Рис. 1. Вертикальные категории и горизонтальные подкатегории товаров: гибкая граница между категориями А и Б; фиксированная граница между категориями Б и В

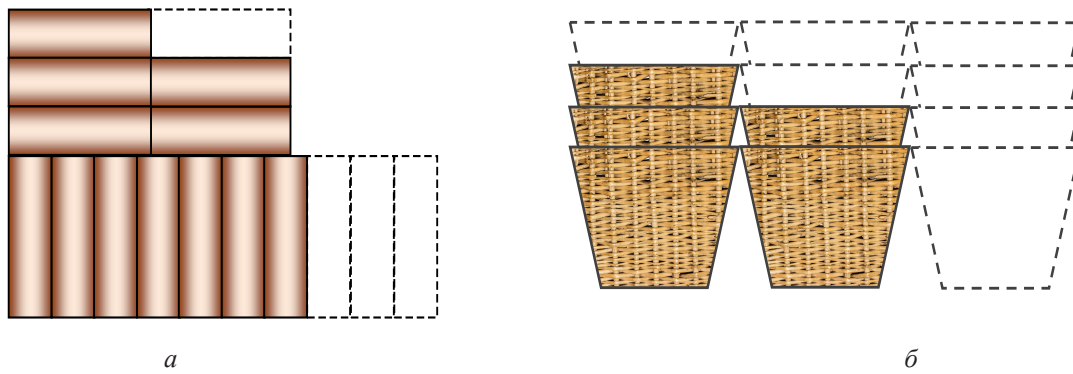


Рис. 2. Выкладка товаров: а — каппинг; б — нестинг

Товар может быть размещен на полке лицевой стороной (ширина  $p_j^w$  как линейный параметр ширины) или боковой стороной под углом 90 градусов (глубина  $p_j^d$  принимается за ширину товара). Товары с одинаковыми характеристиками, функциями или вкусами могут быть сгруппированы в кластеры для создания определенного эффекта замещения и должны быть размещены на одной полке. При отсутствии определенного товара клиент может легко выбрать аналогичный товар другого бренда.

В зависимости от упаковки товары могут быть поставлены один на другой либо вложены один в другой. Фейсинг — основная единица товара, его видимая часть. Каппинг — это положение товара боком вверх фейсинга того же товара (рис. 2, а). Нестинг — размещение товара внутри фейсинга (рис. 2, б). Коэффициент вложенности для товаров, которые допускают возможность быть вложенными,  $p_j^n < 1$ , в противном случае  $p_j^n = 0$ .

Для товаров в прямом положении количество фейсингов в одной группе каппингов равно  $\lceil p_j^h / p_j^w \rceil \lceil p_j^h / p_j^d \rceil$ . Пример можно объяснить следующим образом. Если на полке размещено слишком много коробок на верхнем ряду фейсингов, то это может привести к повреждению нижних коробок или падению верхних с полки. В случае с корзинами, если их слишком много внутри нижней, она может быть деформирована из-за нагрузки. Для тарелок опасность заключается в том, что они могут упасть и разбиться, если их размещение будет неустойчивым. Общее количество товара на полке определяется суммой фейсингов, каппингов и нестингов. В этом исследовании рассматривает-

ся только верхний ряд фейсингов с каппингами и нестингами, при этом вертикальное размещение фейсингов не рассматривается.

В задаче требуется определить количество фейсингов  $f_{ij}$ , каппингов  $c_{ij}$  и нестингов  $n_{ij}$  товара  $j$ , размещенного на полке  $i$ , с учетом 4 классов ограничений: ограничения на полку, ограничения на товар, ограничения на расположение на нескольких полках, ограничения на категорию, чтобы максимизировать общую прибыль ретейлера.

Нелинейная целочисленная модель может быть сформулирована так:

$$\max \sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^S x_{ij} p_j^u (f_{ij} + c_{ij} + n_{ij}).$$

1. Ограничения на полку:

- длина полки:  $\forall(i) \left[ \sum_{j=1}^P f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d) \leq s_i^l \right];$

- высота полки:

$$\forall(i, j) \left[ x_{ij} p_j^h + \frac{c_{ij} x_{ij}}{\max\left(\frac{f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d)}{p_j^h}, 1\right)} \right] \times$$

$$\times \left( y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d \right) + \left[ \frac{n_{ij} x_{ij}}{\max(f_{ij}, 1)} \right] p_j^h p_j^n \leq s_i^h;$$

- глубина полки:  $\forall(i, j) [x_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^d + y_{ij}^{o2} p_j^w) \leq s_i^d];$

- масса товаров на полке:

$$\forall(i) \left[ \sum_{j=1}^P (f_{ij} + c_{ij} + n_{ij}) p_j^b \leq s_i^b \right].$$

2. Ограничения на товар:

- минимальное и максимальное количество полок:

$$\forall(j) \left[ s_j^{\min} \leq \sum_{i=1}^S x_{ij} \leq s_j^{\max} \right];$$

- лимит поставки:  $\forall(j) \left[ \sum_{i=1}^S (f_{ij} + c_{ij} + n_{ij}) \leq p_j^s \right];$

- минимальное и максимальное количество

фейсингов:  $\forall(j) \left[ f_j^{\min} \leq \sum_{i=1}^S f_{ij} \leq f_j^{\max} \right];$

- минимальное и максимальное количество

каппингов:

$$\forall(i, j) \left[ c_j^{\min} \leq c_{ij} \leq c_j^{\max} \left[ \frac{f_{ij}(y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d)}{p_j^h} \right] \right];$$

- минимальное и максимальное количество не-

стингов:  $\forall(i, j) [n_j^{\min} \leq n_{ij} \leq n_j^{\max} f_{ij}];$

- для товара допускается либо каппинг, либо нестинг, либо ни то ни другое:  $\forall(i, j) [c_{ij} n_{ij} = 0].$

3. Ограничения на расположение товаров на нескольких полках:

- товар может быть расположен только в одном положении (прямое или боковое):  $\forall(i, j) [y_{ij}^{o1} y_{ij}^{o2} = 0],$

$$\forall(i, j) [y_{ij}^{o1} + y_{ij}^{o2} = 1];$$

- товар должен быть расположен в одном и том же положении на всех полках:

$$\forall(j) \left[ \max_{i=1, \dots, S} (y_{ij}^{o1}) \neq \max_{i=1, \dots, S} (y_{ij}^{o2}) \right];$$

- прямое положение допустимо:  $\forall(i, j) [y_{ij}^{o1} \leq p_j^{o1}];$

- боковое положение допустимо:  $\forall(i, j) [y_{ij}^{o2} \leq p_j^{o2}];$

- товар может быть расположен только на непосредственно прилегающей полке:

$$\forall(j) \forall(a, b: |a - b| \neq 1 \wedge a < b, a, b = 1, \dots, S) [x_{aj} x_{bj} = 0];$$

- товары из одного кластера находятся на одной полке:

$$\forall(i) \forall(a, b: p_a^l = p_b^l, a, b = 1, \dots, P) [x_{ia} = x_{ib}].$$

Ограничение одинакового положения товара на всех полках, а также размещения товара на непосредственно прилегающей полке необходимо для создания визуальных блоков товаров на полках.

4. Ограничения на категорию:

- минимальный размер категории:

$$\forall(i, k) \left[ \sum_{\substack{j=1, \\ p_j^k=k}}^P f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d) \geq [s_i^l m_k] \vee \sum_{\substack{j=1, \\ p_j^k=k}}^P f_{ij} = 0 \right];$$

- допуск категории при расположении товаров на разных полках:

$$\forall(k) \left[ \max_{i=1, \dots, S} \left( \sum_{\substack{j=1, \\ p_j^k=k}}^P f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d) \right) - \min_{i=1, \dots, S} \left( \sum_{\substack{j=1, \\ p_j^k=k}}^P f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d) \right) \leq \left[ \max_{i=1, \dots, S} (s_i^l) t_k \right] \right];$$

- правило расположения товаров определенных ценовых подкатегорий на полках:

$$\forall(i, j) [x_{ij} \leq \min(\max(s_i^g - p_j^g, 0), 1)].$$

Выражение  $\left[ \max_{i=1, \dots, S} (s_i^l) t_k \right] = \left[ \max_{i=1, \dots, S} (s_i^l) t_k + 0,5 \right]$  означает округленное значение.

5. Ограничения отношений:

- соотношение единиц товара:

$$\forall(i, j) \left[ x_{ij} s_i^l \left( \frac{y_{ij}^{o1}}{p_j^w} + \frac{y_{ij}^{o2}}{p_j^d} \right) \geq f_{ij} \right];$$

- соотношение единиц товара и положения:

$$\forall(i, j) [x_{ij} \leq f_{ij} (y_{ij}^{o1} + y_{ij}^{o2})];$$

- соотношение каппингов:

$$\forall(i, j) \left[ c_{ij} \leq x_{ij} c_j^{\max} \left[ \frac{f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d)}{p_j^h} \right] \right];$$

- соотношение нестингов:  $\forall(i, j) [n_{ij} \leq x_{ij} n_j^{\max} f_{ij}].$

6. Переменные решения:

- товар размещен на полке:  $x_{ij} \in \{0, 1\};$

- количество фейсингов товара на полке:  $f_{ij} = \{f_j^{\min} \dots f_j^{\max}\};$

- количество каппингов товара на полке:

$$c_{ij} = \left\{ c_j^{\min} \dots c_j^{\max} \left[ \frac{f_{ij} (y_{ij}^{o1} p_j^w + y_{ij}^{o2} p_j^d)}{p_j^h} \right] \right\};$$

- количество нестингов товара на полке:

- прямое положение товара:  $y_{ij}^{o1} \in \{0, 1\};$

- боковое положение товара:  $y_{ij}^{o2} \in \{0, 1\}.$

## Обсуждение

Организация полочного пространства магазинов играет ключевую роль в привлечении внимания покупателей и увеличении продаж. Эффективная расстановка товаров на полках способствует упрощению поиска нужных товаров и стимулирует импульсные покупки. Важно учитывать покупательские предпочтения и поведение при размещении товаров, чтобы оптимизировать их доступность и привлекательность. Современные методы, такие как аналитика данных и планограммы, помогают оптимизировать выкладку товаров и улучшить общих покупательский опыт.

Эффективная организация полочного пространства магазинов способствует улучшению управления запасами. Четкое распределение товаров по категориям и подкатегориям упрощает инвентаризацию и пополнение запасов. Это позволяет более точно прогнозировать потребности клиентов и минимизировать риск дефицита или излишков товаров.

Приведенный способ выкладки товаров с вертикальной категоризацией товаров по типам и вложенной горизонтальной категоризацией товаров по ценовым группам имеет следующие достоинства:

1. Удобство для покупателей. Покупатели могут быстрее находить нужные товары благодаря логичной иерархии, где категории и подкатегории товаров четко структурированы. Упрощение просмотра полок клиентами магазина способствует улучшению покупательского опыта, что может повысить лояльность клиентов. Удобное расположение товаров, близость соответствующих категорий товаров формирует положительный покупательский опыт.

2. Повышение продаж. Благодаря вертикальной категоризации товаров сопутствующие категории товаров можно разместить рядом, что стимулирует импульсные покупки. Например, паста рядом с соусами и специями.

3. Оптимизация полочного пространства. Более эффективное использование полочного пространства позволяет разместить больше товаров на доступной торговой поверхности полок, что потенциально увеличивает объем продаж.

4. Эффективность управления ассортиментом. При инвентаризации четкая структура категоризации товаров помогает персоналу быстрее находить и подсчитывать товары, что снижает вероятность ошибок. Кроме того, становится легче отслеживать и анализировать данные с продаж в различных категориях, что помогает в принятии обоснованных управленческих решений.

Среди недостатков приведенной в исследовании модели выкладки товаров на полки в магазине можно выделить следующие:

1. Трудоемкость. Создание и поддержание сложной вложенной структуры требует значительных временных и трудовых затрат.

2. Потребность в обучении персонала. Персоналу может потребоваться дополнительное обучение для правильного размещения товаров в соответствии с заданным принципом категоризации товаров.

3. Эстетический аспект при перегруженности полок. Полки, перегруженные товарами и информацией о категориях, могут выглядеть неопрятно и отпугивать покупателей.

4. Сложность в реорганизации. Перестановка товаров одной категории требует также перестановки товаров в сопутствующей категории, что в рамках существующей иерархии может потребовать значительных усилий и времени.

Использование вложенной категоризации товаров в выкладке на полочном пространстве торговой сети имеет свои плюсы и минусы. Успех такой системы зависит от баланса между удобством для покупателей, целей ретейлеров и сложностью ее реализации и поддержания. Преимущества вложенной категоризации включают улучшение организации товаров и упрощение поиска нужных позиций для покупателей, что способствует повышению удобства и удовлетворенности. Однако она также может создавать сложности в управлении пространством и потребовать значительных усилий для постоянного обновления и поддержания актуальности выкладки, особенно в условиях динамично меняющихся ассортиментов.

## Заключение

Эффективное использование полочного пространства для оптимального размещения ключевых товаров включает анализ предпочтений не только покупателей, но и ретейлеров. Учитывая интересы обеих сторон, можно разработать стратегию выкладки, которая увеличит продажи и удовлетворит спрос. Важно также принять во внимание сезонные колебания спроса и адаптировать выкладку под текущие тренды. Совместное использование данных о покупательских предпочтениях и стратегий ретейлеров помогает максимизировать эффективность торговых площадей.

В данной работе представлена математическая модель организации выкладки товаров на полках магазина. Характерной особенностью такой модели является вертикальная категоризация товаров, а также вложенная категоризация товаров по ценовым подкатегориям, что характеризует правила расположения товаров на полках в зависимости от их ценовой категории, прибыли, уникальности, заинтересованности в них ретейлеров. Следовательно, товарам на полке подбираются более выгодные месторасположения. Модель позволяет определить наилучшие зоны для размещения наиболее

прибыльных товаров. Это повышает вероятность привлечения внимания покупателей и увеличивает продажи. Кроме того, модель учитывает динамические изменения в спросе и сезонных предпочтениях, что позволяет гибко адаптировать выкладку товаров в реальном времени. Важным аспектом является также оптимизация ассортимента с учетом предпочтений целевой аудитории, что способствует повышению конверсии и удовлетворенности покупателей. Следующей особенностью модели является расположение товаров на полке в виде фейсинга, нестинга (внутри фейсинга) и каппинга (поверх фейсинга). Это позволяет экономить пространство, размещая большее количество товаров на той же торговой площади. Использование такой модели помогает ретейлерам не только максимизировать прибыль, но и эффективно управлять товарными запасами, минимизируя избыточные остатки и улучшая товарооборот.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание алгоритмов категоризации товаров и выкладки товаров на полки, что требует комплексного подхода, включающего методы машинного обучения, анализ больших данных и оптимизационные техники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kerfoot S., Davies B., Ward P. Visual Merchandising and the Creation of Discernible Retail Brands // *International Journal of Retail and Distribution Management*. 2003. Vol. 31, Iss. 3. Pp. 143–152. DOI: 10.1108/09590550310465521.
2. Ebster C., Garaus M. *Store Design and Visual Merchandising: Creating Store Space That Encourages Buying*. New York (NY): Business Expert Press, 2011. 150 p.
3. Cant M. C., Hefer M. Y. Visual Merchandising Displays: Wasted Effort or Strategic Move? The Dilemma Faced by Apparel Retail Stores // *Journal of Applied Business Research*. 2012. Vol. 28, No. 6. Pp. 1489–1496. DOI: 10.19030/jabr.v28i6.7356.
4. Does In-Store Marketing Work? Effects of the Number and Position of Shelf Facings on Brand Attention and Evaluation at the Point of Purchase / P. Chandon, J. W. Hutchinson, E. T. Bradlow, S. H. Young // *Journal of Marketing*. 2009. Vol. 73, No. 6. Pp. 1–17. DOI: 10.1509/jmkg.73.6.1.
5. Mattila A. S., Wirtz J. The Role of Store Environmental Stimulation and Social Factors on Impulse Purchasing // *Journal of Services Marketing*. 2008. Vol. 22, No. 7. Pp. 562–567. DOI: 10.1108/08876040810909686.
6. The Influence of Multiple Store Environment Cues on Perceived Merchandise Value and Patronage Intentions / J. Baker, A. Parasuraman, D. Grewal, G. B. Voss // *Journal of Marketing*. 2002. Vol. 66, Iss. 2. Pp. 120–141. DOI: 10.1509/jmkg.66.2.120.18470.
7. Using Analytics to Enhance a Food Retailer's Shelf-Space Management / T. Bianchi-Aguiar, E. Silva, L. Guimarães [et al.] // *Interfaces*. 2016. Vol. 46, No. 5. Pp. 424–444. DOI: 10.1287/inte.2016.0859.

8. Czerniachowska K., Hernes M. A Heuristic Approach to Shelf Space Allocation Decision Support Including Facings, Capping, and Nesting // *Symmetry*. 2021. Vol. 13, Iss. 2. Art. No. 314. 19 p. DOI: 10.3390/sym13020314.

9. Czerniachowska K., Michalak K., Hernes M. Heuristics for the Shelf Space Allocation Problem // *OPSEARCH*. 2023. Vol. 60, Iss. 2. Pp. 835–869. DOI: 10.1007/s12597-023-00636-1.

Дата поступления: 23.01.2025

Решение о публикации: 18.02.2025

## Mathematical Model for Product Category Assortment and Shelf Space Allocation Within a Retail Trade System

**Ekaterina S.  
Cherniakhovskaia**

— PhD in Management and Quality Sciences, Lecturer. Research interests: optimization, programming, shelf space allocation. E-mail: [kateryna.czerniachowska@ue.wroc.pl](mailto:kateryna.czerniachowska@ue.wroc.pl)

Wroclaw University of Economics and Business, 118-120, Komandorska str., Wroclaw, 53-345, Poland

**For citation:** Cherniakhovskaia E. S. Mathematical Model for Product Category Assortment and Shelf Space Allocation Within a Retail Trade System. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 56–64. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-56-64. (In Russian)

**Abstract.** *The research presents a mathematical model for maximizing sales profits while maintaining shelf space restrictions from the retailer's point of view. **Purpose:** to create a mathematical model for optimized product placement on the store shelves available. The proposed model takes into account the product categorization into groups and subgroups. In particular, products are grouped into vertical categories by type, as well as into horizontal ones by nested price. **Discussion:** the article examines the advantages and disadvantages of the proposed product display model. **Practical significance:** the development of such a model will help to improve the efficiency of using retail space, increase the availability of key products and, as a result, increase overall sales volumes. This study would be of great importance for retail chains.*

**Keywords:** *mathematical modelling, optimization, shelf space allocation*

### REFERENCES

1. Kerfoot S., Davies B., Ward P. Visual Merchandising and the Creation of Discernible Retail Brands, *International Journal of Retail and Distribution Management*, 2003, Vol. 31, Iss. 3, Pp. 143–152. DOI: 10.1108/09590550310465521.

2. Ebster C., Garaus M. Store Design and Visual Merchandising: Creating Store Space That Encourages Buying. New York (NY), Business Expert Press, 2011, 150 p.

3. Cant M. C., Hefer M. Y. Visual Merchandising Displays: Wasted Effort or Strategic Move? The Dilemma Faced by Apparel Retail Stores, *Journal of Applied Business Research*, 2012, Vol. 28, No. 6, Pp. 1489–1496. DOI: 10.19030/jabr.v28i6.7356.

4. Chandon P., Hutchinson J. W., Bradlow E. T., Young S. H. Does In-Store Marketing Work? Effects of the Number and Position of Shelf Facings on Brand Attention and Evaluation at the Point of Purchase, *Journal of Marketing*, 2009, Vol. 73, No. 6, Pp. 1–17. DOI: 10.1509/jmkg.73.6.1.

5. Mattila A. S., Wirtz J. The Role of Store Environmental Stimulation and Social Factors on Impulse Purchasing, *Journal of Services Marketing*, 2008, Vol. 22, No. 7, Pp. 562–567. DOI: 10.1108/08876040810909686.



6. Baker J., Parasuraman A., Grewal D., Voss G. B. The Influence of Multiple Store Environment Cues on Perceived Merchandise Value and Patronage Intentions, *Journal of Marketing*, 2002, Vol. 66, Iss. 2, Pp. 120–141. DOI: 10.1509/jmkg.66.2.120.18470.

7. Bianchi-Aguiar T., Silva E., Guimarães L., et al. Using Analytics to Enhance a Food Retailer's Shelf-Space Management, *Interfaces*, 2016, Vol. 46, No. 5, Pp. 424–444. DOI: 10.1287/inte.2016.0859.

8. Czerniachowska K., Hernes M. A Heuristic Approach to Shelf Space Allocation Decision Support Including Facings, Capping, and Nesting, *Symmetry*, 2021, Vol. 13, Iss. 2, Art. No. 314, 19 p. DOI: 10.3390/sym13020314.

9. Czerniachowska K., Michalak K., Hernes M. Heuristics for the Shelf Space Allocation Problem, *OPSEARCH*, 2023, Vol. 60, Iss. 2, Pp. 835–869. DOI: 10.1007/s12597-023-00636-1.

Received: 23.01.2025

Accepted: 18.02.2025

УДК 004.946

## Анализ виртуальных симуляторов, используемых для обучения машинистов электропоездов

- Ляпунов Владислав Евгеньевич** — магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, виртуальная реальность, дополненная реальность, иммерсивные технологии. E-mail: Blad11967@yandex.ru
- Гильванов Ринат Гафганович** — канд. воен. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, виртуальная реальность, дополненная реальность, иммерсивные технологии. E-mail: gilvanov1950@mail.ru
- Давыдова Даяна** — магистр, ассистент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных. E-mail: dayana-0820@bk.ru
- Сергеева Дарья Владимировна** — ассистент, заведующий лабораторией кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, искусственный интеллект. E-mail: ssergeevadv@gmail.com

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

**Для цитирования:** Ляпунов В. Е., Гильванов Р. Г., Давыдова Д., Сергеева Д. В. Анализ виртуальных симуляторов, используемых для обучения машинистов электропоездов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 65–73. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-65-73

**Аннотация.** *Представлено исследование о разработке VR-симулятора для обучения машинистов электропоезда. Цель: повышение эффективности применения симуляторов для формирования профессиональных качеств машинистов электропоездов и увеличение уровня безопасности эксплуатации электропоездов. Методы: анализ применяемых на рынке современных виртуальных симуляторов для обучения машинистов электропоездов. Результаты: проанализированы такие виртуальные симуляторы, как REDS SA VR, TecknoSIM VR, симулятор электропоезда ЭД9М, «Кабина машиниста» United 3D Labs, VR-тренажеры ОАО «РЖД», VR-тренажер Simbott. Практическая значимость: VR-симуляторы, представленные на рынке, практически не уделяют внимание обучению машинистов электропоездов, связанному с чрезвычайными ситуациями на железной дороге, такими как наезд на пешехода или автомобиль, сход вагона с рельсов и прочее.*

**Ключевые слова:** виртуальные симуляторы, VR-технологии, обучение машинистов, железнодорожный транспорт, безопасность, эффективность обучения

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); 2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

## Введение

Согласно определению, данному в Большой российской энциклопедии, под железной дорогой понимается рельсовый путь, предназначенный для движения поездов [1]. Железнодорожный транспорт является составной частью единой транспортной системы государства, призванной во взаимодействии с организациями других видов транспорта своевременно и качественно обеспечить потребности физических лиц, юридических лиц и государства в перевозках железнодорожным транспортом, способствовать созданию условий для развития экономики и обеспечения единства экономического пространства на территории государства [2]. Для решения этих сложных стратегических задач необходима высокая профессиональная квалификация всех лиц, участвующих в обеспечении ее эксплуатации. Ввиду этого приказом Минтранса России от 23 июня 2022 № 250 утверждены «Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации», которые устанавливают систему организации движения поездов, требования к технической эксплуатации сооружений и устройств инфраструктуры железнодорожного транспорта и определяют обязанности работников железнодорожного транспорта. Исходя из этого корректируются федеральные государственные образовательные стандарты как высшего, так и среднего профессионального обу-

чения. Одним из таких стандартов является приказ Минобрнауки России от 2 августа 2013 г. № 703 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по профессии 190623.01 Машинист локомотива». Для обучения столь сложной профессии необходимо выбрать технологию, которая будет способствовать качественному обучению. При выборе той или иной технологии обучения мы должны руководствоваться статистическими данными об авариях на железной дороге. По данным о крупнейших железнодорожных катастрофах в стране и мире, представленным в работе [3], выяснили, что среди них лидирует именно столкновение поездов, что составляет 31,82 % от общего количества железнодорожных происшествий за период с 2002 по 2021 год. На рис. 1 представлены причины возникновения аварийных ситуаций на железной дороге.

Согласно сведениям Росстата, в 2023 году число происшествий с ж/д транспортом составило 12, погибших, по официальным данным, двое. При этом в предыдущие годы эти показатели были ниже. А в 2024 году статистика аварийности на железнодорожном транспорте также показала рост [4]. За период с января по апрель число происшествий по сравнению с аналогичным периодом прошлого года выросло вдвое — до четырех.

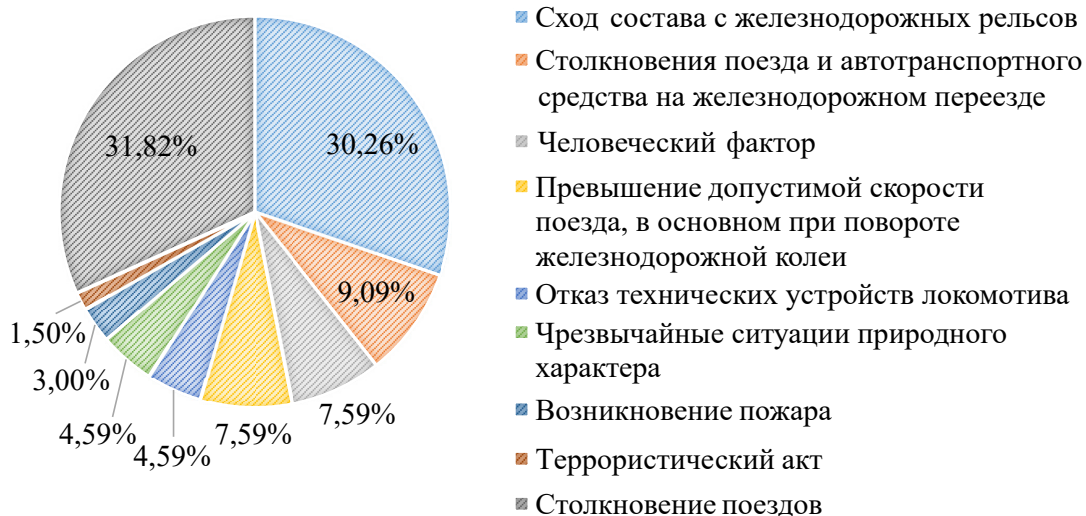


Рис. 1. Причины аварийных ситуаций на железной дороге

Особую категорию составляют ДТП на железнодорожных переездах. Так, за первые полгода 2024 года произошло 96 аварий на переездах. В этом случае подавляющее большинство ДТП (90 %) случилось по вине водителей автомобилей, выезжавших на переезд при запрещающем сигнале светофора.

Важным направлением обеспечения безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта является организация взаимодействия всех категорий работников, связанных с движением поездов при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД» [5].

Наиболее перспективным направлением создания симуляторов явилась технология виртуальной реальности (Virtual Reality, VR), которая произвела революцию в методологиях обучения в различных отраслях, включая железнодорожный сектор. Известно, что симуляторы виртуальной реальности обеспечивают безопасную и экономически эффективную среду для обучения машинистов электропоездов. В статье анализируются виртуальные симуляторы, используемые для этой цели, выделяются их особенности, преимущества и эффективность.

### Виртуальные симуляторы

Виртуальная реальность — это передовая система моделирования, объединяющая компьютерные технологии, сенсорные технологии и технологии взаимодействия человека и компьютера. Она позволяет пользователям почувствовать, что они находятся в реальном или вымышленном мире, создавая трехмерную интерактивную виртуальную среду. Эта среда может быть полностью сгенерирована компьютером или являться цифровым воспроизведением реального мира.

Технология VR создает эффект погружения, имитируя многочисленные органы чувств, такие как зрение, слух и осязание. Пользователи надевают очки или шлемы виртуальной реальности и взаимодействуют с виртуальной средой с помощью движений головы и отслеживания движения глаз для достижения эффекта погружения. Кроме

того, некоторые продвинутые VR-системы оснащены такими устройствами, как перчатки и треке-ры тела, чтобы обеспечить более полный интерактивный опыт.

Симуляторы, или эмуляторы, — это программные или аппаратные устройства, которые имитируют работу реальной среды или системы. Эта технология находит широкое применение в различных областях, включая, в частности, авиацию, видеоигры, научные исследования и автомобильную промышленность. Имитируя реальные ситуации, симуляторы обеспечивают эффективную и безопасную платформу для тестирования, обучения, проверки и оптимизации. Например, в авиации авиасимуляторы широко используются для обучения пилотов и позволяют моделировать различные погодные и летные условия, чтобы помочь пилотам улучшить свои навыки пилотирования. Виртуальные тренажеры используют на железной дороге для [6]:

1. Проектирования линии пути. Процесс проектирования высокоскоростных железнодорожных путей может быть смоделирован с помощью технологии виртуальной реальности. Проектный план представлен таким образом, чтобы дизайнеры могли более интуитивно понимать направление линии и радиус кривой, а также другие параметры для более точного проектирования. Благодаря технологии виртуальной реальности дизайнеры могут вносить коррективы в режиме реального времени. Конструкция схемы позволяет избежать многочисленных модификаций традиционным способом и значительно повышает эффективность проектирования.

2. Обучения операторов сортировочных горок. В VR-симуляторе пользователю необходимо следить за приходящими на станцию составами, останавливать их и собирать новые составы.

3. Обучения электротехнического персонала. В нем обучающийся отрабатывает навык замены электропривода стрелочного перевода на станции.

4. Обучения специалистов Центральной дирекции по ремонту пути. В VR-симуляторе отрабатываются такие навыки, как замена железобетонных шпал, восстановление рельсового пути, строительство железных дорог и прочее.

5. Подготовка специалистов службы путей и сооружений. VR-модуль позволяет отработать замену железобетонной шпалы, восстановление рельсовой плети и прочее.

Эффективность виртуальных тренажеров в промышленности заключается в их способности обеспечивать обучение без необходимости непосредственного доступа к дорогостоящему оборудованию. Они создают безопасные условия для обучения и позволяют проводить тренировки с имитацией сложных и потенциально опасных ситуаций. Это способствует повышению уровня подготовки сотрудников и снижению рисков, связанных с обучением на реальных устройствах.

Все вышеперечисленное делает VR-симуляторы эффективным инструментом для обучения и подготовки персонала, способствует повышению производительности труда и соблюдению условий безопасности на рабочем месте.

Существует множество видов виртуальных симуляторов:

1. Медицинские симуляторы. VR-технологии также демонстрируют большой потенциал в медицинском образовании и подготовке хирургов. Благодаря моделированию хирургического процесса студенты-медики и врачи могут выполнять сложные хирургические операции в условиях отсутствия риска. Это моделирование не только обеспечивает реалистичное визуальное восприятие, высоко реалистичную анатомическую структуру, позволяет пользователям практиковаться в разрезании, сшивании и других навыках, но также имитирует тактильную обратную связь, чтобы сделать обучение более реалистичным, повысить качество медицинского образования и снизить риски при реальной операции.

2. Симуляторы космических полетов. В аэрокосмической области VR-симуляторы используются для моделирования космических полетов и обучения астронавтов. Это включает в себя управление космическим кораблем, тренировки в условиях микрогравитации и даже имитацию выхода в открытый космос. Астронавты могут отрабатывать операции и реагировать на чрезвычайные ситуации в моделируемой космической среде, что помогает снизить риски в реальных миссиях.

3. Морские симуляторы. В области морского дела виртуальные симуляторы используются для моделирования навигации и морских операций. Члены экипажа и специалисты морского дела могут практиковать навыки навигации, меры реагирования на чрезвычайные ситуации и другие связанные с ними задачи в виртуальной среде, чтобы улучшить свои профессиональные навыки, умения справляться с трудностями и осведомленность о безопасности.

4. Сельскохозяйственные симуляторы. В области сельского хозяйства VR-симуляторы могут использоваться для моделирования окружающей среды фермы, операций по выращиванию сельскохозяйственных культур и животноводства, чтобы помочь специалистам-аграриям понять и применить новейшие сельскохозяйственные технологии, разобраться в выращивании сельскохозяйственных культур, борьбе с болезнями и вредителями, оптимизировать управление фермой и повысить эффективность производства.

Все виртуальные симуляторы обеспечивают безопасное и эффективное обучение персонала, улучшая их навыки и подготавливая к реальным рабочим сценариям в рабочем процессе.

К преимуществам использования виртуальных симуляторов относятся:

1. Безопасность обучения. Виртуальные тренажеры позволяют обучаться в безопасной среде, что особенно важно в областях с высоким риском, таких как медицина и промышленность. Это исключает возможность травм и ошибок, которые могут произойти при обучении на реальном оборудовании.

2. Экономия ресурсов. Виртуальные тренажеры позволяют избежать затрат на дорогостоящее оборудование и материалы, так как обучение может проводиться в виртуальной среде. Это делает процесс обучения более доступным и экономически эффективным.

3. Гибкость и доступность. Обучение с использованием виртуальных тренажеров может проводиться в любое время и в любом месте, что позволяет адаптировать процесс обучения под индивидуальные потребности и графики обучающихся.

4. Имитация сложных ситуаций. Виртуальные тренажеры способны моделировать сложные и опасные сценарии, что позволяет пользователям отрабатывать навыки в условиях, приближенных к реальным, без риска для здоровья и безопасности.

5. Интерактивность и вовлеченность. Виртуальные тренажеры предлагают интерактивные элементы, которые делают процесс обучения более увлекательным и мотивирующим, что способствует лучшему усвоению материала.

Виртуальные симуляторы являются эффективными инструментами для обучения и тренировки в различных областях. Они снижают производственные затраты, сводят к минимуму последующие риски в работе персонала.

Ключевые виртуальные симуляторы для обучения машинистов электропоездов представлены в табл. 1.

### Недостатки симуляторов машинистов электропоездов

Представленные выше симуляторы хороши для обучения начальным навыкам машиниста электропоезда, однако у них **есть ряд недостатков:**

1. Ограниченное количество сценариев. Большинство симуляторов ориентированы на штатные ситуации и не включают достаточное количество сценариев для отработки чрезвычайных ситуаций (например, сход с рельсов, пожары, столкновения). Например, в симуляторе REDS SA VR отсутствуют модули для отработки аварийных ситуаций.

2. Упрощенная физика и поведение поезда. В чрезвычайных ситуациях поведение поезда может значительно отличаться от штатного режима, но симуляторы часто не учитывают эти нюансы. Так, в TecknoSIM VR физика движения поезда упрощена, что делает его непригодным для моделирования аварий.

3. Недостаточная детализация внешней среды. В чрезвычайных ситуациях важна реалистичность внешней среды (например, поведение других участников движения, состояние путей), но симуляторы часто ограничены в этой области (например, в VR-тренажере электропоезда ЭД9М

внешняя среда недостаточно детализирована для отработки аварийных сценариев).

4. Отсутствие стрессовых факторов. В реальных чрезвычайных ситуациях машинист испытывает стресс, что влияет на его реакцию и принятие решений. Симуляторы не могут воспроизвести этот фактор. В симуляторах ОАО «РЖД», например, отсутствуют модули, имитирующие психологическое давление.

5. Ограниченная подготовка к взаимодействию с другими службами. В чрезвычайных ситуациях машинист должен взаимодействовать с диспетчерами, аварийными службами и пассажирами, но симуляторы редко включают такие сценарии. В Simbott, например, отсутствуют модули для отработки взаимодействия с аварийными службами.

6. Недостаточная гибкость. Многие симуляторы не позволяют создавать пользовательские сценарии, что ограничивает их применение для обучения в нестандартных ситуациях. Так, в VR-тренажере «Кабина машиниста» United 3D Labs отсутствует возможность добавления новых сценариев.

Из вышеперечисленных недостатков можно сделать вывод, что данные симуляторы не учитывают отработку ситуаций, связанных с чрезвычайными происшествиями на железной дороге. Отработка навыков при нестандартных ситуациях важна. Так, по данным за 2024 год, на железнодорожных переездах было зарегистрировано 196 дорожно-транспортных происшествий. Одним из наиболее значительных инцидентов стало происшествие в Волгоградской области, в результате которого произошел сход с рельсов восьми вагонов пассажирского поезда [13].

Согласно данным за 2024 год, на железнодорожных путях в результате нарушения правил безопасности и неосторожного поведения травмы различной степени тяжести получили 1677 человек. Из них 1180 случаев закончились летальным исходом, включая гибель 87 несовершеннолетних. Указанная информация подтверждается официальными источниками [14].

Важным документом, которым руководствуются все работники, связанные с организацией дви-

Таблица 1

**Ключевые виртуальные симуляторы для обучения машинистов электропоездов**

Наименование симулятора	Характеристики	Преимущества	Особенности
<b>Симулятор поезда REDS SA VR</b>	Реалистичная физика поезда и изменения сценариев в реальном времени, такие как изменение погоды и времени суток. Создан с использованием Unity для оптимальной производительности. Высокая производительность без сообщений о проблемах с тошнотой или усталостью у тестируемых пользователей. Масштабное создание виртуального мира, представленное на выставке InnoTrans в Ганновере	Многопользовательская игра и подробные сценарии обучения повышают навыки совместной работы и обеспечивают тщательную подготовку к реальным операциям [7]	В симуляторе игроки могут сесть за пульт управления классического русского электровоза и испытать себя в роли машиниста. Игрокам предстоит справиться с дикими зверями, злодеями, суровыми морозами и постоянно ломающимся оборудованием во время управления поездом. Помимо симуляторов управления поездом, существуют также игры-стратегии, где игроки могут проектировать, строить и автоматизировать железнодорожные сети
<b>Симулятор вождения TecknoSIM VR</b>	Симулятор вождения виртуальной реальности TecknoSIM, который совместим со всеми ведущими гарнитурами виртуальной реальности и предназначен для множества приложений, включая обучение и тестирование	Высокий уровень детализации и реалистичности помогает обучаемым получить глубокое представление об органах управления поездом и операциях с ним, повышая их готовность к реальному вождению [8]	Реалистичная обстановка в салоне со всеми необходимыми элементами управления. Использование передовых технологий, таких как лазерное сканирование и визуализация с высокой детализацией
<b>VR-тренажер электропоезда ЭД9М</b>	Виртуальный симулятор поддерживает многопользовательский режим, позволяя тренироваться в команде и улучшая навыки общения между членами поездной бригады	Многопользовательская игра и подробные сценарии обучения повышают навыки совместной работы и обеспечивают тщательную подготовку к реальным операциям [9]	Комплексное обучение от приема поезда до прибытия на конечную станцию. Два режима: обучение и экзамен с сопровождающими аудио- и визуальными подсказками
<b>VR-тренажер «Кабина машиниста» United 3D Labs</b>	Симулятор оснащен всеми атрибутами кабины настоящего машиниста, включая комфортабельные кресла и ручки контроля. Позволяет посетителям ощутить себя в роли машиниста современного поезда «Иволга»	Высокий уровень детализации и реалистичности помогает обучаемым получить глубокое представление об органах управления поездом и операциях с ним, повышая их готовность к реальному вождению [10]	Реалистичная обстановка в салоне со всеми необходимыми элементами управления. Использование передовых технологий, таких как лазерное сканирование и визуализация с высокой детализацией
<b>VR-тренажеры ОАО «РЖД»</b>	VR-тренажер для обучения по охране труда электромонтеров контактной сети	Эти симуляторы помогают снизить риски и улучшить сохранение навыков, делая их эффективными как для новых, так и для опытных сотрудников [11]	Обучение в контролируемой среде для отработки различных сценариев и действий
<b>Многофункциональный VR-тренажер Simbott</b>	Обучающие модули виртуальной реальности для различных профессий, в том числе для железнодорожных перевозок	Гибкость и захватывающий опыт, предоставляемые виртуальными симуляторами Simbott, обеспечивают всестороннее развитие навыков в различных отраслях, включая железные дороги [12]	Экономичные и временные решения для обучения. Настраиваемые модули для удовлетворения конкретных потребностей в обучении

жения поездов, является регламент [5], который устанавливает:

- положения и требования, предъявляемые к организации и выполнению мероприятий работниками ОАО «РЖД», связанных с движением поездов и выполнением маневровой работы при воз-

никновении аварийных и нестандартных ситуаций на инфраструктуре ОАО «РЖД»;

- перечень нормативных документов ОАО «РЖД», Минтранса России и МЧС России, определяющих основные направления организации по взаимодействию работников смежных служб в во-

просах обеспечения безопасности движения поездов;

- регламент взаимодействия между участниками перевозочного процесса при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций.

Область применения регламента определена требованиями нормативных документов ОАО «РЖД», МПС России и Министерством транспорта Российской Федерации.

## Заключение

Виртуальные симуляторы предлагают преобразующий подход к обучению машинистов электропоездов, обеспечивая реалистичную, за-

хватывающую и безопасную среду для развития навыков. Проанализированные симуляторы, в том числе от REDS SA, Tecknotrove, United 3D Labs, ОАО «РЖД» и Simbott, демонстрируют эффективность технологии виртуальной реальности в повышении результатов обучения. Созданные виртуальные тренажеры дают возможность создавать различные ситуации, отрабатывать необходимые действия, имитировать аварийные условия работы, что невозможно в реальных условиях. Приобретенные в результате обучения знания и умения и полученные на тренажерных комплексах практические навыки позволяют лучше готовить машинистов электропоездов к полноценной работе.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воробьев Э. В., Павлов В. Е., Соловьева А. М. Железная дорога // Большая российская энциклопедия. Электронная версия. URL: [http://old.bigenc.ru/domestic\\_history/text/3822668](http://old.bigenc.ru/domestic_history/text/3822668) (дата обращения: 02.02.2025).
2. ГОСТ 34530—2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения = Railway transport. General. Terms and definitions: межгосударственный стандарт: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2019 г. № 748-ст: дата введения 2020-02-01. М.: Стандартинформ, 2019. 50 с.
3. Литвиненко Ю. Статистика показывает рост числа происшествий на железной дороге в РФ // Новые Известия on-line. 2024. 19 декабря. URL: <http://newizv.ru/news/2024-12-19/statistika-pokazyvaet-rost-chisla-proisshestviy-na-zheleznoy-doroge-v-rf> (дата обращения: 02.02.2025).
4. Карпович П. Аварийность на транспорте: статистика показывает снижение везде, кроме железной дороги // РЖД-Партнер.РУ. 2024. 05 июля. URL: <http://www.rzd-partner.ru/logistics/news/avariynost-na-transporte-statistika-pokazyvaet-snizhenie-vezde-krome-zheleznoy-dorogi> (дата обращения: 02.02.2025).
5. О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 12 декабря 2017 г. № 2580р.
6. VR-тренажеры уменьшают число ошибок машинистов и ремонтных бригад // РЖД Цифровой. 2022. 11 декабря. URL: <http://rzddigital.ru/projects/vr-trenazhery-umenshayut-chislo-oshibok-mashinistov-i-remontnykh-brigad/> (дата обращения: 02.02.2025).
7. Training & Simulation VR Train Simulator for REDS. URL: <http://immersiveform.com/index.php/case-study/training-simulation-vr-train-simulator-for-reds> (дата обращения: 02.02.2025).
8. Virtual Reality Training Simulator and Solutions. URL: <http://tecknotrove.com/virtual-reality-training-simulator-solutions> (дата обращения: 21.12.2024).
9. Research on the Effectiveness of Virtual Reality Technology for Locomotive Crew Driving and Emergency Skills Training / X. Gao, P. Zhou, Q. Xiao [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, Iss. 22. Art. No. 12452. 15 p. DOI: 10.3390/app132212452.
10. Разработка VR тренажера «Кабина машиниста». URL: <http://uni3dlabs.ru/portfolio/train-driver-simulator> (дата обращения: 21.12.2024).
11. Технологии AR/VR // РЖД Цифровой. 2022. 11 ноября. URL: <http://rzddigital.ru/technology/ar-vr/> (дата обращения: 21.12.2024).



12. Simbott — Advanced AR, VR, & MR Training Simulation Company. URL: <http://simbott.com> (дата обращения: 21.12.2024).

13. На железнодорожных переездах в 2024 году произошло 196 ДТП // Информационное агентство ТАСС. 2025. 31 января. URL: <http://tass.ru/ekonomika/23024489> (дата обращения: 02.02.2025).

14. На железной дороге в 2024 году из-за неосторожности погибли 1180 человек // Информационное агентство ТАСС. 2025. 27 января. URL: <http://tass.ru/proisshestiya/22984977> (дата обращения: 02.02.2025).

Дата поступления: 12.02.2025

Решение о публикации: 24.02.2025

## A Study on Virtual Simulator-Based Learning to Develop Electric Train Drivers' Skills

**Vladislav E. Lyapunov** — Master's Degree Student, Postgraduate Student, Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, virtual reality, augmented reality, immersive technologies. E-mail: [Bladl1967@yandex.ru](mailto:Bladl1967@yandex.ru)

**Rinat G. Gilvanov** — PhD in Military Sciences, Associate Professor, Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, virtual reality, augmented reality, immersive technologies. E-mail: [gilvanov1950@mail.ru](mailto:gilvanov1950@mail.ru)

**Dayana Davydova** — Master's Degree Student, Assistant Lecturer, Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, big data processing. E-mail: [dayana-0820@bk.ru](mailto:dayana-0820@bk.ru)

**Daria V. Sergeeva** — Assistant Lecturer, Head of the Laboratory of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, big data processing, artificial intelligence. E-mail: [ssergeevadv@gmail.com](mailto:ssergeevadv@gmail.com)

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

**For citation:** Lyapunov V. E., Gilvanov R. G., Davydova D., Sergeeva D. V. A Study on Virtual Simulator-Based Learning to Develop Electric Train Drivers' Skills. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 65–73. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-65-73. (In Russian)

**Abstract.** *A study on a VR simulator-based learning to develop electric train drivers' skills is presented. **Purpose:** to improve the simulator efficiency to develop the professional qualities of electric train drivers thus increasing the electric train operation safety. **Methods:** to conduct a study on virtual simulators available today for training electric train drivers. **Results:** such virtual simulators as REDS SA VR, TecknoSIM VR, ED9M electric train simulator, United 3D Labs Driver's Cabin, "Russian Railways" VR simulator, Simbott VR simulator are analyzed. **Practical significance:** VR simulators available today do not focus on electric train drivers' training related to railway accidents such as train-pedestrian or train-automobile collisions, derailment, and others.*

**Keywords:** *virtual simulators, VR technologies, driver training, railway transport, safety, training efficiency*

## REFERENCES

1. Vorobyev E. V., Pavlov V. E., Solovyeva A. M. Zheleznaya doroga [Railway], *Bolshaya rossiyanskaya entsiklopediya. Elektronnaya versiya [Great Russian Encyclopedia. Electronic version]*. Available at: [http://old.bigenc.ru/domestic\\_history/text/3822668](http://old.bigenc.ru/domestic_history/text/3822668) (accessed: 02.02.2025). (In Russian)

2. GOST 34530—2019. Transport zheleznodorozhnyy. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [GOST 34530—2019. Railway transport. General. Terms and definitions]. Effective from February 01, 2020. Moscow, StandartInform Publishing House, 2007, 50 p. (In Russian)

3. Litvinenko Yu. Statistika pokazyvaet rost chisla proisshestviy na zheleznoy doroge v RF [Statistics Show an Increase in the Number of Accidents on the Railway in the Russian Federation], *Novye izvestiya on-line*. Published online December 19, 2024. Available at: <http://newizv.ru/news/2024-12-19/statistika-pokazyvaet-rost-chisla-proisshestviy-na-zheleznoy-doroge-v-rf> (accessed: 02.02.2025). (In Russian)
4. Karpovich P. Avariynost na transporte: statistika pokazyvaet snizhenie vezde, krome zheleznoy dorogi [Accident Rate in Transport: Statistics Show a Decrease Everywhere Except the Railway], *RZhD-Partner.RU*. Published online July 05, 2024. Available at: <http://www.rzd-partner.ru/logistics/news/avariynost-na-transporte-statistika-pokazyvaet-snizhenie-vezde-krome-zheleznoy-dorogi> (accessed: 02.02.2025). (In Russian)
5. O vvode v deystvie Reglamenta vzaimodeystviya rabotnikov, svyazannykh s dvizheniem poezdov, s rabotnikami lokomotivnykh brigad pri vozniknovenii avariynykh i nestandartnykh situatsiy na putyakh obshchego polzovaniya infrastruktury OAO “RZhD” [On the Introduction of the Regulations on the Interaction of Employees Associated with Train Movement with Employees of Locomotive Crews in the Event of Emergency and Non-Standard Situations on Public Tracks of the Infrastructure of JSC Russian Railways]: Order of JSC Russian Railways dated December 12, 2017 No. 2580r. (In Russian)
6. VR-trenazhery umenshayut chislo oshibok mashinistov i remontnykh brigad [VR Simulators Reduce the Number of Errors by Drivers and Repair Crews], *RZhD Tsifrovoy [RZD.Digital]*. Published online December 11, 2022. Available at: <http://rzdigital.ru/projects/vr-trenazhery-umenshayut-chislo-oshibok-mashinistov-i-remontnykh-brigad/> (accessed: 02.02.2025). (In Russian)
7. Training & Simulation VR Train Simulator for REDS. Available at: <http://immersiveform.com/index.php/case-study/training-simulation-vr-train-simulator-for-reds> (accessed: 02.02.2025).
8. Virtual Reality Training Simulator and solutions. Available at: <http://tecknotrove.com/virtual-reality-training-simulator-solutions> (accessed: 21.12.2024).
9. Gao X., Zhou P., Xiao Q., et al. Research on the Effectiveness of Virtual Reality Technology for Locomotive Crew Driving and Emergency Skills Training, *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, Iss. 22, Art. No. 12452, 15 p. DOI: 10.3390/app132212452.
10. Razrabotka VR trenazhera “Kabina mashinista” [Development of the “Driver’s Cabin” VR simulator]. Available at: <http://uni3dlabs.ru/portfolio/train-driver-simulator> (accessed: 21.12.2024). (In Russian)
11. Tekhnologii AR/VR [AR/VR Technologies], *RZhD Tsifrovoy [RZD.Digital]*. Published online November 11, 2022. Available at: <http://rzdigital.ru/technology/ar-vr/> (accessed: 21.12.2024). (In Russian)
12. Simbott — Advanced AR, VR, & MR Training Simulation Company. Available at: <http://simbott.com> (accessed: 21.12.2024).
13. Na zheleznodorozhnykh pereezdakh v 2024 godu proizoshlo 196 DTP [In 2024 196 Accidents Occurred at Railway Crossings], *Informatsionnoe agentstvo TASS [TASS Russian News Agency]*. Published online at January 31, 2025. Available at: <http://tass.ru/ekonomika/23024489> (accessed: 02.02.2025). (In Russian)
14. Na zheleznoy doroge v 2024 godu iz-za neostorozhnosti pogibli 1180 chelovek [In 2024 1180 People Died on the Railway Due to Carelessness], *Informatsionnoe agentstvo TASS [TASS Russian News Agency]*. Published online at January 27, 2025. Available at: <http://tass.ru/proisshestviya/22984977> (accessed: 02.02.2025). (In Russian)

Received: 12.02.2025

Accepted: 24.02.2025

УДК 004.4

## Автоматическая генерация пайплайнов CI/CD на основе метаданных проекта: новый подход к ускорению разработки программного обеспечения

**Дьяченко Никита Иванович** — магистрант 1-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: информационные системы, базы данных.  
E-mail: dacenkonikita439@gmail.com

**Забродин Андрей Владимирович** — канд. истор. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные технологии.  
E-mail: zabrodin@pgups.ru

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

**Для цитирования:** Дьяченко Н. И., Забродин А. В. Автоматическая генерация пайплайнов CI/CD на основе метаданных проекта: новый подход к ускорению разработки программного обеспечения // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 74–82. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-74-82

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема автоматизации процессов конфигурации CI/CD пайплайнов для разработки и развертывания программного обеспечения. Авторы анализируют существующие сложности ручной настройки и предлагают инновационный подход, основанный на использовании метаданных проекта для автоматического создания пайплайнов. **Цель:** разработка метода автоматической генерации пайплайнов на основе метаданных, а также оценка влияния этого подхода на процесс разработки программного обеспечения в рамках практик CI/CD. Для достижения цели разработан сервис, реализующий данный подход. **Результаты:** автоматизация настройки пайплайнов повышает эффективность процессов разработки и сокращает время доставки программных продуктов. **Практическая значимость:** заключается в возможности широкого внедрения предложенного метода в различных сферах разработки ПО, что способствует повышению стандартизации и снижению трудозатрат. В обсуждении высказываются рекомендации по дальнейшему совершенствованию разработанного сервиса, выявляются перспективы его применения и освещаются вопросы, требующие дальнейших исследований и разработок.

**Ключевые слова:** CI/CD, автоматизация, пайплайн, DevOps, разработка программного обеспечения

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

### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире информационных технологий создание программного обеспечения становится все более сложным и трудоемким процессом. Важнейшим условием любой успешной разработки остается эффективное управление данными и внутренними процессами проекта.

Автоматизация этих процессов может достигаться путем использования пайплайнов (англ. pipeline — трубопровод), которые представляют собой автоматизированные последовательности действий по интеграции, тестированию и развертыванию программного обеспечения.

В данной статье предлагается инновационный подход, который позволяет создавать пайплайны с использованием метаданных проекта. Этот метод представляет собой перспективное решение в области разработки ПО, так как пайплайны позволяют стандартизировать процессы сборки, тестирования и развертывания и предотвращают возможные ошибки. В рамках подхода используются метаданные проекта, которые включают используемые технологии, систему сборки проекта и другие ключевые характеристики проекта.

Пайплайны используются в рамках практик непрерывной интеграции (Continuous Integration, CI) и непрерывной доставки/развертывания (Continuous Delivery/Deployment, CD), что в результате сокращает время между изменением кода и его появлением в производственной среде.

Несмотря на значительные достижения в области CI/CD и использование метаданных, многие вопросы остаются нерешенными. Существующие программные решения часто требуют от разработчиков ручной настройки пайплайнов, что может приводить к ошибкам и увеличению времени настройки процессов. Также стоит отметить, что большинство существующих инструментов ориентированы на конкретные технологии, что ограничивает их применимость. Предлагаемый в статье подход позволит устранить эти проблемы, повысить гибкость и ускорить процессы разработки и развертывания программного обеспечения.

Объектом исследования в работе являются процессы автоматизации, такие как интеграция, тестирование и развертывание. Новизна работы заключается в предложении подхода для создания гибких и адаптируемых пайплайнов, исполь-

зование которых позволит значительно улучшить скорость и качество разработки программных продуктов.

### Методологии разработки программного обеспечения CI/CD

Непрерывная интеграция представляет собой методологию разработки программного обеспечения, которая основана на регулярном внесении изменений в общий репозиторий всеми участниками разработки. Каждый добавленный фрагмент кода автоматически проверяется на совместимость с основной кодовой базой [1]. Так как над проектом обычно работает несколько разработчиков, необходимо централизованно хранить все изменения, чтобы обеспечить согласованность кода. Процесс слияния кода в идеале должен выполняться несколько раз в день в автоматическом режиме. Главной целью непрерывной интеграции является поддержание стабильности разработки и выпуска программного обеспечения за счет автоматизации, командного взаимодействия и своевременной проверки внесенных изменений.

Внедрение подхода непрерывной интеграции начинается с регулярной отправки обновлений в систему управления версиями. Это позволяет всем разработчикам работать с актуальным кодом. Каждый коммит автоматически запускает процесс сборки и тестирования, который проверяет корректность работы программы и предотвращает возможные ошибки. Такой подход позволяет реализовать первый этап создания полного CI/CD-пайплайна [2].

На рис. 1 представлена схема процесса CI.

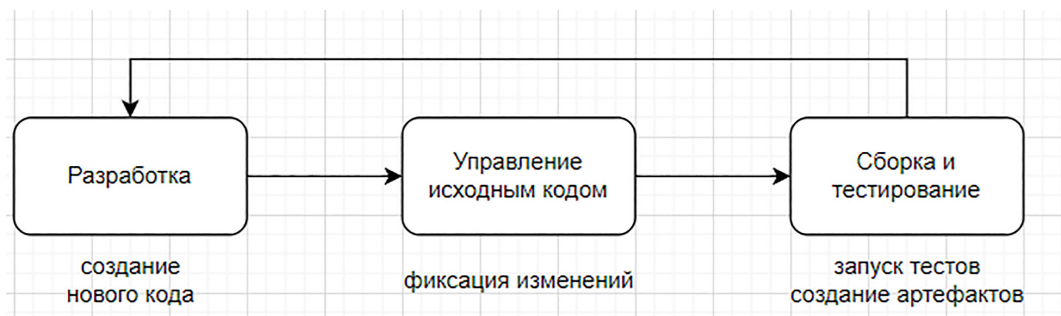


Рис. 1. Схема процесса непрерывной интеграции

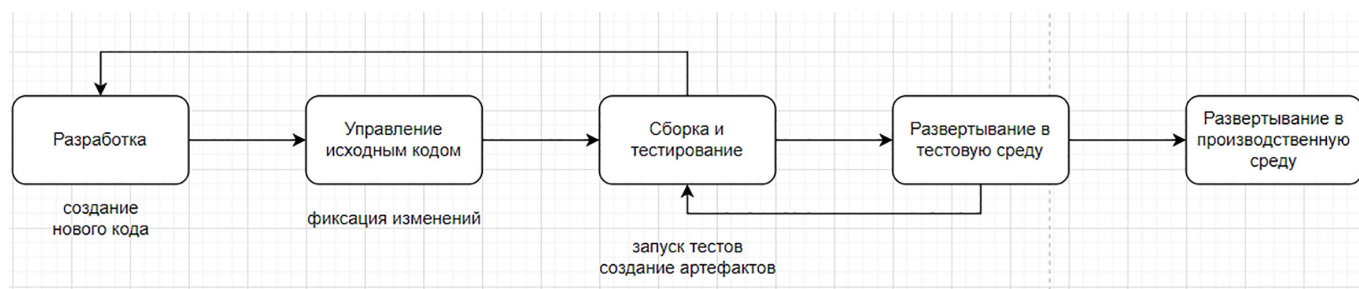


Рис. 2. Схема процесса непрерывной доставки и развертывания

На рис. 2 представлена схема процесса непрерывной доставки и развертывания.

Непрерывная доставка/развертывание является логическим продолжением процесса непрерывной интеграции и предполагает автоматизацию ручных шагов, необходимых для сборки и выпуска ПО. Основной целью этого процесса является обеспечение постоянной готовности кода проекта к развертыванию [3]. Для этого в рабочий процесс доставки необходимо встроить комплекс автоматических тестов. Использование этого метода позволяет добиться ускорения доставки версий программного обеспечения за счет автоматизации ряда задач, благодаря чему разработчики могут сосредоточиться на более сложных задачах.

Задачей CD является ускорение процесса разработки и повышение его надежности путем сокращения времени на доставку версии программного продукта и обеспечения обратной связи от пользователей [4].

Последовательное выполнение процессов CI и CD составляет CI/CD-пайплайн, благодаря которому обеспечивается интеграция, тестирование и доставка новых версий программного обеспечения. Основной задачей пайплайна является ускорение и автоматизация процессов разработки и доставки ПО, что обеспечивает быстрое обновление с минимальными рисками [5].

Основные функции CI/CD-пайплайнов:

1) периодическая интеграция кода в репозиторий проекта, что позволяет отслеживать возможные ошибки в коде;

2) запуск модульных, интеграционных и функциональных тестов, что позволяет выявлять ошибки и проблемы на ранних стадиях разработки;

3) сборка программного продукта и его упаковка в пакеты или контейнеры. Это позволяет создавать релизы приложения и подготавливать его к развертыванию;

4) мониторинг работы приложения, а также отображение отчетов о прохождении тестов, что помогает получить данные о работе приложения [5].

Пайплайны CI/CD описываются текстом с помощью специальных форматов данных. Наиболее часто используемыми из них являются форматы данных YAML и JSON. Эти форматы отличаются читаемым синтаксисом, который позволяет облегчить создание и поддержку пайплайнов. Ниже подробнее рассмотрен формат представления YAML.

YAML (англ. Yet Another Markup Language — «еще один язык разметки») представляет собой формат сериализации данных, который разработан для удобства чтения и записи. YAML хранит данные в структурированном формате (в виде списка) [6].

Конфигурационные файлы в формате YAML применяются в CI/CD следующим образом:

1. *Определение структуры пайплайна.* В конфигурационном файле описываются этапы, шаги и задания пайплайна, что позволяет определять порядок выполнения этапов.

2. *Определение инструкций для сборки и развертывания.* YAML-файл используется для задания последовательности действий на различных этапах пайплайна. В нем указываются команды, необходимые для компиляции кода, выполнения тестов и развертывания приложения в нужной среде.

3. *Конфигурация переменных окружения и зависимостей.* В конфигурационном файле задаются переменные окружения и зависимости, необходимые для корректного функционирования пайплайна. Сюда входит информация о подключении к

базам данных, API-ключи, а также внешние библиотеки, используемые в проекте.

4. *Код-ревью и утверждение кода.* YAML-файл можно использовать для определения рабочих процессов рецензирования и утверждения кода, чтобы гарантировать, что все изменения будут проверены перед слиянием кода с основной веткой.

В настоящее время существует множество программных решений, которые позволяют упростить процесс создания и конфигурации пайплайнов. Далее рассмотрены некоторые из них.

1. *Jenkins.* Программное решение, написанное на языке программирования Java, которое предназначено для обеспечения процесса непрерывной интеграции программного обеспечения. Платформа поддерживает инструменты систем управления версиями, включая AccuRev, CVS, Subversion, Git, Mercurial, Perforce, Clearcase и RTC. В приложении существует возможность запуска пайплайна по событию фиксации изменения программного кода в системе управления версиями, а также по расписанию [7]. Вокруг Jenkins образовалось обширное сообщество разработчиков, готовых предоставить поддержку [8].

2. *GitLab CI/CD.* Встроенная в GitLab платформа, которая позволяет автоматизировать сборку, тестирования и развертывания приложений [9]. GitLab CI/CD использует файл конфигурации `.gitlab-ci.yml`, в котором задаются шаги для выполнения пайплайнов. Данная платформа позволяет в некоторой степени автоматизировать создания пайплайнов за счет использования готовых шаблонов, но в большинстве случаев требуется ручная настройка.

3. *GitHub Actions.* Платформа, встроенная в хостинг проектов GitHub, предназначенная для автоматизации рабочих процессов, непрерывной интеграции и развертывания [10]. В GitHub Actions существует возможность запуска пайплайнов на основе определенных событий в репозитории.

Все представленные выше программные решения не позволяют избежать ручной настройки пайплайнов, поэтому возникла необходимость в разработке сервиса, позволяющего если не полностью, то в некоторой степени автоматизировать этот процесс.

## Процесс автоматической генерации пайплайнов на основе метаданных проекта

Автоматизация процесса создания пайплайнов имеет большое значение, так как позволяет, во-первых, освободить разработчиков от рутинной работы и повторяющихся задач, во-вторых, уменьшается вероятность человеческих ошибок при настройке пайплайнов. Также автоматизация позволит стандартизировать процесс разработки и интеграции, что способствует улучшению качества и предсказуемости поставки программного обеспечения.

Автоматическая генерация пайплайнов на основе метаданных представляет собой инновационный метод, который использует различные характеристики автоматизируемого проекта для построения пайплайнов CI/CD. Ниже рассмотрены основные аспекты данного метода и приведен пример пайплайна, созданного на его основе:

1. Определение метаданных проекта. На данном этапе программа определяет ключевые атрибуты проекта, такие как его название, язык программирования, система сборки и используемые технологии, и сохраняет их в виде переменных.

2. Генерация пайплайна. Далее автоматически создается пайплайн CI/CD в виде конфигурационного файла формата YAML. Во время создания в него интегрируются полученные от проекта данные. В рамках данного процесса определяются этапы сборки, тестирования, развертывания и других операций, адаптированные к уникальным характеристикам проекта. Для описания всех этапов и параметров пайплайна в конфигурационном файле используется формат YAML.

3. Сгенерированный пайплайн интегрируется в систему CI/CD, где он становится частью цикла непрерывной доставки и развертывания. На данном этапе определяются события триггера (например, отправка изменений (push) в ветку master удаленного репозитория), которые запускают пайплайны.

На рис. 3 представлена часть пайплайна, созданного автоматически с помощью разработанного сервиса.

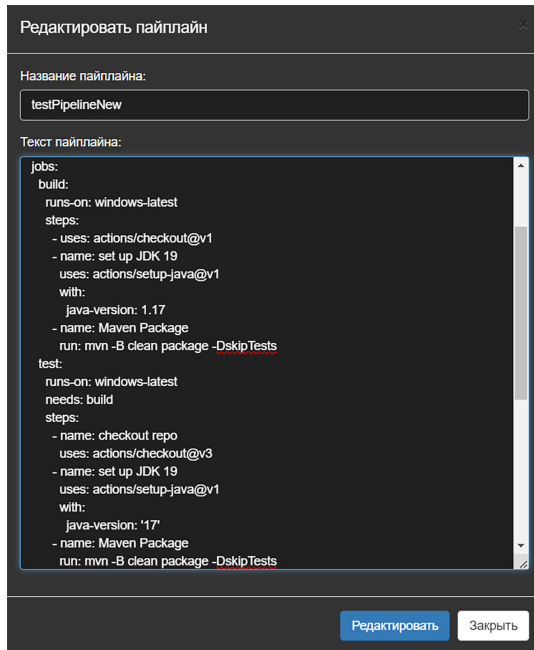


Рис. 3. Пример сгенерированного пайплайна

Из рис. 3 видно, что пайплайн включает в себя этапы `build` (сборка проекта) и `test` (тестирование), в рамках которых происходит выполнение всех необходимых команд. Метаданные, которые были получены в результате анализа проекта: версия JDK, версия Java, система сборки (в данном случае Maven). Эти данные интегрируются в пайплайн на этапе его создания. Параметр `needs` определяет последовательность выполнения этапов. Без успешного выполнения этапа сборки этап тестирования выполняться не будет. Использование данного параметра гарантирует, что последние этапы пай-

плайна будут запущены только после успешного выполнения всех предыдущих этапов.

Далее в статье подробнее рассматривается разработанный сервис, реализующий предложенный подход к созданию пайплайнов.

### Разработанный сервис для автоматической генерации пайплайнов

Сервис, использующий представленный в статье подход к созданию пайплайнов, представляет собой веб-сервис, написанный на языке программирования Java с использованием фреймворка Spring и его надстройки Spring Boot. На рис. 4 представлена архитектура приложения.

Из рис. 4 видно, что приложение использует паттерн проектирования MVC (Model-View-Controller), в рамках которого реализуется принцип разделения ответственности между 3 компонентами:

- 1) контроллер — отвечает за обработку запросов на создание, изменение и удаление пайплайнов;
- 2) модель — отвечает за данные приложения и методы работы с ними;
- 3) представление — отвечает за визуализацию данных, полученных из моделей.

Разработанный сервис обеспечивает быстрое создание пайплайнов с акцентом на минимизацию изменений, которые вносит пользователь для обеспечения работоспособности. На рис. 5 представлено окно создания пайплайна.

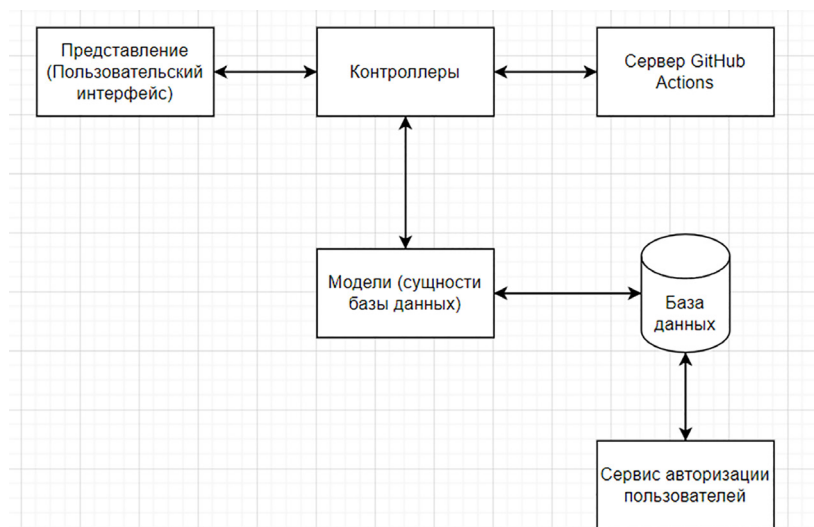


Рис. 4. Архитектура разработанного приложения

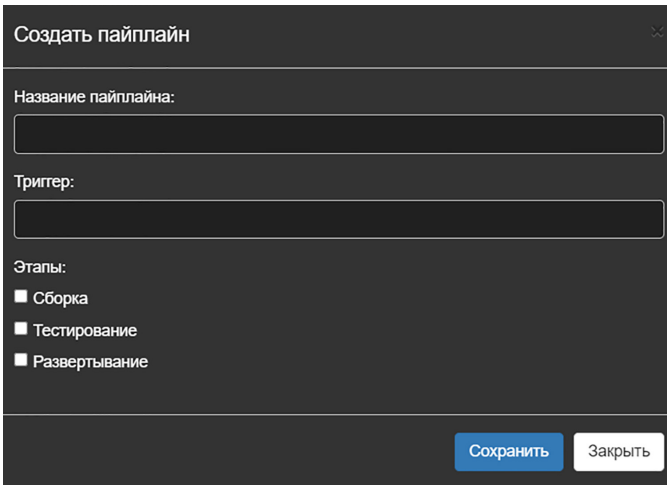


Рис. 5. Окно создания пайплайна

Для создания пайплайна пользователь указывает название, триггер (условие срабатывания) и этапы. Для проверки работоспособности сервиса был выбран проект, который представляет собой чат, написанный на Spring с использованием технологии WebSocket. Чтобы наглядно продемонстрировать работу пайплайна и в целом преимущество методологии CI/CD, необходимо показать, как выглядел развертываемый проект до и как он выглядит после внесения изменений и сколько времени занимает доставка новой версии приложения до конечного пользователя. На рис. 6 представлено окно проекта до внесения в его программный код изменений.

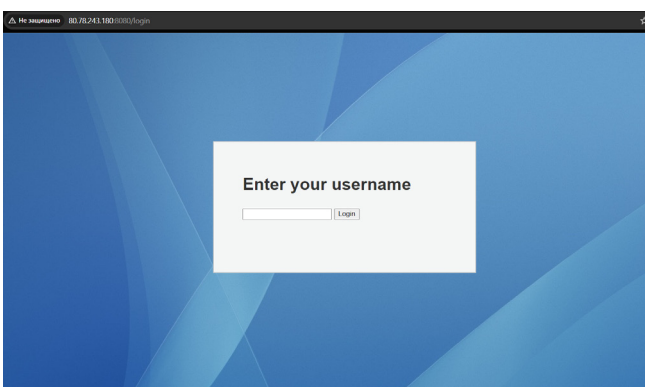


Рис. 6. Окно проекта до внесения изменений

В нем была изменена надпись Enter your username на «Введите ваше имя» и надпись кнопки входа с Login до «Войти». На рис. 7 показан код страницы входа с внесенным изменением.

```

1  <!DOCTYPE html>
2  <html>
3  <head>
4    <title>Login</title>
5    <link rel="stylesheet" href="/css/style2.css" />
6  </head>
7  <body>
8    <div id="login-container">
9      <h1 class="title">Введите ваше имя</h1>
10     <form id="loginForm" name="loginForm" method="POST">
11       <input type="text" name="username" />
12       <button type="submit">Войти</button>
13     </form>
14   </div>
15 </body>
16 </html>

```

Рис. 7. Внесенное изменение

После фиксации и отправки изменения на удаленный репозиторий пайплайн автоматически запускается (рис. 8).

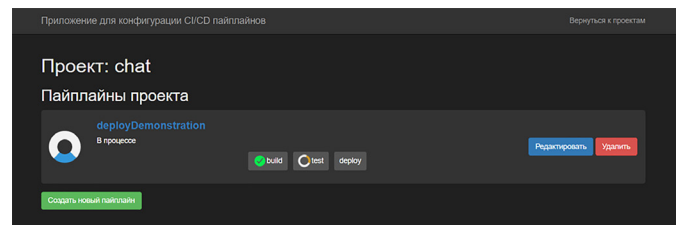


Рис. 8. Запущенный пайплайн

Приложение периодически отправляет запросы для определения состояния проекта. Таким образом отслеживаются изменения, которые разработчики вносят в программный код.

После выполнения всех этапов новая версия приложения развернута на сервере и готова к работе (рис. 9).

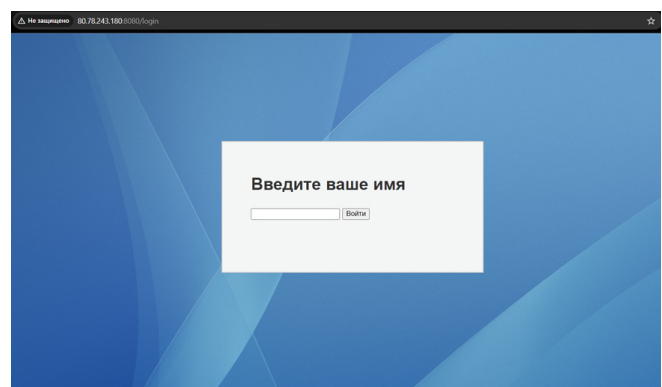


Рис. 9. Окно проекта после внесения изменений

Рис. 9 показывает развернутую на сервере новую версию приложения. Весь процесс от внесения изменения в код до появления новой версии приложения на сервере занял 5 минут 37 секунд,



тогда как при ручном написании пайплайна этот процесс занял бы гораздо большее время. При этом работа приложения на сервере не прерывалась и процесс интеграции новой версии был для пользователей незаметным. И каждое дальнейшее изменение, которое будет вноситься разработчиками в программный код, будет интегрироваться сразу на сервер.

## Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что использование метаданных для автоматической генерации CI/CD пайплайнов значительно упрощает процессы настройки и уменьшает вероятность ошибок. В рамках работы был предложен подход, который позволяет значительно упростить процесс создания пайплайнов, повысить их адаптивность и уменьшить вероятность ошибок, связанных с ручной конфигурацией.

В рамках исследования был разработан сервис, реализующий предложенный подход. Он доказал свою эффективность на практике, сократив

время от внесения изменений до их появления в производственной среде. Полученные результаты подтверждают достижение поставленной цели исследования: предложенный метод успешно интегрирует метаданные в процесс создания пайплайнов. Научная новизна работы заключается в использовании метаданных проекта для создания пайплайнов, что ранее не применялось в таком широком формате. Это открывает возможности для дальнейшего усовершенствования подхода, включая адаптацию подхода для различных технологий и языков программирования. В перспективе возможна интеграция дополнительных функций, таких как анализ производительности пайплайнов и их оптимизация в реальном времени.

Использование предложенного метода может быть полезным как для крупных команд разработчиков, так и для небольших проектов. Таким образом, проведенное исследование имеет значение для развития практик CI/CD и способствует улучшению процессов разработки и развертывания программного обеспечения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уилсон К. Грокаем Continuous Delivery / пер. с англ. Н. Ю. Григорьевой. СПб.: Питер, 2024. 400 с.
2. Что такое непрерывная интеграция? // JetBrains. URL: <http://www.jetbrains.com/ru-ru/teamcity/ci-cd-guide/continuous-integration> (дата обращения: 29.11.2024).
3. CI/CD системы / Р. А. Мухутдинов, А. А. Мухутдинов, Р. И. Гильмуллин, С. В. Чернова // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 12-2 (68). С. 82–85.
4. Что такое непрерывная доставка? // JetBrains. URL: <http://www.jetbrains.com/ru-ru/teamcity/ci-cd-guide/continuous-delivery> (дата обращения: 29.11.2024).
5. Что такое CI/CD-пайплайн // Руцентр. URL: [http://www.nic.ru/help/что-такое-cicd-pajplajn\\_11681.html](http://www.nic.ru/help/что-такое-cicd-pajplajn_11681.html) (дата обращения: 30.12.2024).
6. Что такое YAML? // JetBrains. URL: <http://www.jetbrains.com/ru-ru/teamcity/ci-cd-guide/faq/yaml> (дата обращения: 04.01.2025).
7. Jenkins (software) // Wikipedia. Обновлено 29.11.2024. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Jenkins\\_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Jenkins_(software)) (дата обращения: 07.01.2025).
8. Что такое Jenkins // AppTractor. URL: <http://apptractor.ru/info/articles/jenkins.html> (дата обращения: 08.01.2025).
9. Мулдакаев М. А. Развертывание и непрерывная интеграция приложений с помощью GitLab CI/CD // Научный аспект. 2024. № 5, Т. 13. С. 1704–1708.
10. Туманова М. Б., Мороз А. В. GitHub Actions: автоматизация рабочих процессов для более эффективной разработки // Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности: XXV Международная конференция, XXIII Международный конкурс научных и научно-методических работ, IX Международный конкурс «Научное школьное сообщество»: сборник трудов (Мытищи, Россия, 27–28 апреля 2023 г.). М.: Экон-Информ, 2023. С. 124–128.

Дата поступления: 17.02.2025

Решение о публикации: 18.02.2025

# Automatic Generation of CI/CD Pipelines Based on Project Metadata: A New Approach to Accelerating Software Development

**Nikita I. Dyachenko** — 1st year Master's Degree Student of the 09.04.02 direction "Information systems and technologies".  
Research interests: information systems, databases. E-mail: dacenkonikita439@gmail.com

**Andrey V. Zabrodin** — PhD in History, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department.  
Research interests: information technology. E-mail: zabrodin@pgups.ru

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

**For citation:** Dyachenko N. I., Zabrodin A. V. Automatic Generation of CI/CD Pipelines Based on Project Metadata: A New Approach to Accelerating Software Development. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 74–82. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-74-82. (In Russian)

**Abstract.** *The article addresses the issue of automating the configuration processes of CI/CD pipelines for software development and deployment. The authors analyze the existing challenges of manual configuration and propose an innovative approach based on utilizing project metadata for automatic pipeline generation. Purpose: to develop a method for automatic pipeline generation using metadata and to assess the impact of this approach on software development within CI/CD practices. To achieve this goal, a service implementing the proposed approach has been developed. Results: to demonstrate that automating pipeline configuration enhances development efficiency and reduces software delivery time. Practical significance: a potentially wide application of the proposed method across various software development domains would contribute to increased standardization and reduce labor costs. The discussion presents recommendations for further improvements to the developed service, explores its application prospects, and highlights areas requiring further research and development.*

**Keywords:** *CI/CD, automation, pipeline, DevOps, software development*

## REFERENCES

1. Wilson C. Grokaem Continuous Delivery [Grokking Continuous Delivery]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2024, 400 p. (In Russian)
2. Chto takoe nepreryvnaya integratsiya? [What is Continuous Integration?], *JetBrains*. Available at: <http://www.jetbrains.com/ru-ru/teamcity/ci-cd-guide/continuous-integration> (accessed: 29.11.2024). (In Russian)
3. Mukhutdinov R. A., Mukhutdinov A. A., Gilmullin R. I., Chernova S. V. CI/CD sistemy [CI/CD Systems], *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire [Actual Scientific Research in the Modern World]*, 2020, No. 12-2 (68), Pp. 82–85. (In Russian)
4. Chto takoe nepreryvnaya dostavka? [What is Continuous Delivery?], *JetBrains*. Available at: <http://www.jetbrains.com/ru-ru/teamcity/ci-cd-guide/continuous-delivery> (accessed: 29.11.2024). (In Russian)
5. Chto takoe CI/CD-payplayn [What is CI/CD-pipeline], *Rutsentr [Rucenter]*. Available at: [http://www.nic.ru/help/chto-takoe-cicd-pajplajn\\_11681.html](http://www.nic.ru/help/chto-takoe-cicd-pajplajn_11681.html) (accessed: 30.12.2024). (In Russian)
6. Chto takoe YAML? [What is YAML?], *JetBrains*. Available at: <http://www.jetbrains.com/ru-ru/teamcity/ci-cd-guide/faq/yaml> (accessed: 04.01.2025). (In Russian)
7. Jenkins (software), *Wikipedia*. Last updated November 29, 2024. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Jenkins\\_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Jenkins_(software)) (accessed: 07.01.2025).

8. Chto takoe Jenkins [What is Jenkins], *AppTractor*. Available at: <http://apptractor.ru/info/articles/jenkins.html> (accessed 08 Jan 2025). (In Russian)

9. Muldakaev M. A. Razvertyvanie i nepreryvnaya integratsiya prilozheniy s pomoshchyu GitLab CI/CD [Deploying and Continuously Integrating Applications with GitLab CI/CD], *Nauchnyy Aspekt*, 2024, No. 5, Vol. 13, Pp. 1704–1708. (In Russian)

10. Tumanova M. B., Moroz A. V. GitHub Actions: avtomatizatsiya rabochikh protsessov dlya bolee effektivnoy razrabotki [GitHub Actions: Workflow Automation for More Efficient Development], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i promyshlennosti: XXV Mezhdunarodnaya konferentsiya, XXIII Mezhdunarodnyy konkurs nauchnykh i nauchno-metodicheskikh rabot, IX Mezhdunarodnyy konkurs «Nauchnoe shkolnoe soobshchestvo»: sbornik trudov* [Modern Information Technologies in Education, Science and Industry: Proceedings of the XXV International Conference, XXIII International Competition of Scientific and Scientific and Methodological Works, IX International Competition “Scientific School Community”], Mytishchi, Russia, April 27–28, 2023. Moscow, Econ-Inform Publishing House, 2023, Pp. 124–128. (In Russian)

Received: 17.02.2025

Accepted: 18.02.2025