

ISSN 3033-5965 (online)

# Transportation and Information Technologies in Russia

## Транспорт и информационные технологии

Vol. 16, No 1, 2026

Том 16, № 1, 2026



# **Transportation and Information Technologies in Russia**

## **Транспорт и информационные технологии**

**Vol. 16, No 1, 2026**

**Том 16, № 1, 2026**

### **Главный редактор**

**А.В. Остроух**

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Российская Федерация)

### **Editor-in-Chief**

**Andrey V. Ostroukh**

Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department 'Automated Control Systems' (Moscow Automobile And Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation)

Шеф-редактор - Максимов Я.А.

Выпускающие редакторы - Доценко Д.В., Максимова Н.А.

Корректор - Зливко С.Д.

Компьютерная верстка, дизайн - Орлов Р.В.

Технический редактор, администратор сайта - Бяков Ю.В.

Ответственный секретарь - Коробцева К.А.

# Transportation and Information Technologies in Russia

## Транспорт и информационные технологии

Специализированный научно-технический рецензируемый журнал  
Peer-reviewed specialized science and technology journal

Периодичность. 4 номера в год / Periodicity. 4 issues per year

Том 16, № 1, 2026 / Vol. 16, No 1, 2026

<p><b>Учредитель и издатель:</b> ООО Научно-инновационный центр</p> <p><b>Журнал основан в 2011 году</b> Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер от 05.09.2025 серии ЭЛ № ФС 77 - 90048)</p> <p>Журнал <b>входит</b> в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук</p> <p><b>Индексирование и реферирование:</b> РИНЦ РЦНИ КиберЛенинка Ulrich's Periodicals Directory Google Scholar DOAJ BASE WorldCat OpenAIRE ЭБС IPRbooks ЭБС Znanium ЭБС Лань</p> <p>Адрес редакции, издателя и для корреспонденции: Россия, 660127, Красноярский край, г. Красноярск, ул. 9 Мая, 5 к. 192 E-mail: <a href="mailto:ijas@ijournal-as.com">ijas@ijournal-as.com</a> <a href="http://ijournal-as.com/">http://ijournal-as.com/</a> +7 (995) 080-90-42</p>	<p><b>Founder and publisher:</b> Science and Innovation Center Publishing House</p> <p><b>Founded 2011</b> The edition is registered by the Federal Service of Intercommunication and Mass Media Control Mass media registration certificate EL № FS 77 - 90048, issued September 05, 2025.</p> <p>Transportation and Information Technologies in Russia is <b>included</b> in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications issued in the Russian Federation, which should publish main scientific results of doctor's and candidate's theses</p> <p><b>Indexing and Abstracting:</b> RISC RCSI CyberLeninka Ulrich's Periodicals Directory Google Scholar DOAJ BASE WorldCat OpenAIRE IPRbooks Znanium Lan'</p> <p>Editorial Board Office: 9 Maya St., 5/192, Krasnoyarsk, 660127, Russian Federation E-mail: <a href="mailto:ijas@ijournal-as.com">ijas@ijournal-as.com</a> <a href="http://ijournal-as.com/">http://ijournal-as.com/</a> +7 (995) 080-90-42</p>
---	--

Свободная цена

© Научно-инновационный центр, 2026

### Editorial Board Members

**Sunil Kumar Yadav**, M.Sc. (Mathematics), Ph.D. (Differential Geometry), Assistant Professor (Alwar Institute of Engineering & Technology, India).

**Yong Lee**, Ph. D., Professor, School of Computer Science and Technology (Harbin Institute of Technology (HIT), China).

**Tatiana V. Avdeenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems, Leading Researcher (Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation).

**Vitaly N. Vasilenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Technology (Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation).

**Alexey V. Voropay**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms and Machines (Kharkiv National Automobile & Highway University, Kharkov, Ukraine).

**Vladimir A. Dresvyannikov**, Doctor of Economics, Assistant Professor, Professor of the Department of Management and Economic Security (Penza State University, Penza, Russian Federation).

**Elena V. Erokhina**, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Production Organization and Management (Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation).

**Sultan V. Zhankaziev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Traffic Organization and Safety, Intelligent Transport Systems (Moscow Automobile And Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation).

**Nikolay S. Zakharov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automotive and Technological Machines Service (Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation).

**Sergey V. Kosyakov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software for Computer Systems (Ivanovo State Energy University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation).

**Andrey V. Kochetkov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Technological Machines (Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation).

**Mikhail N. Krasnyanskiy**, Doctor of Technical Sciences, Rector (Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation).

**Aleksey L. Manakov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Technology of Transport Engineering and Machine Operation", Rector (Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation).

**Oksana D. Pokrovskaya**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Management of Operational Work" (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport, St. Petersburg, Russian Federation).

**Boris Yu. Serbinovskiy**, Doctor of Economics, Professor of the Department of Systems Analysis and Management of the Faculty of High Technologies (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation).

**Ilya A. Khodashinsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Systems in Management and Design (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation).

**Vyacheslav P. Shuvalov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Discrete Communications and Metrology (Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russian Federation).

**Nikolai N. Yakunin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Motor Transport (Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation).

### Члены редакционной коллегии

**Sunil Kumar Yadav**, M.Sc. (Mathematics), Ph.D. (Differential Geometry), Assistant Professor (Alwar Institute of Engineering & Technology, India).

**Yong Lee**, Ph. D., Professor, School of Computer Science and Technology (Harbin Institute of Technology (HIT), China).

**Авдеенко Татьяна Владимировна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры АСУ, вед. науч. сотрудник НОЦ ИИТБ (Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация).

**Василенко Виталий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, декан Технологического факультета (Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Российская Федерация).

**Воропай Алексей Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Деталей машин и теории механизмов и машин (Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина).

**Дресвянников Владимир Александрович**, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность» (Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация).

**Ерохина Елена Вячеславовна**, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры организации и управления производством (Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация).

**Жанказиев Султан Владимирович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой "Организация и безопасность движения, интеллектуальные транспортные системы" (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Российская Федерация).

**Захаров Николай Степанович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сервиса автомобилей и технологических машин (Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация).

**Косяков Сергей Витальевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем (ФГБОУ ВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", Иваново, Российская Федерация).

**Кочетков Андрей Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобиля и технологические машины (ФГАОУ ВО

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация).

**Краснянский Михаил Николаевич**, доктор технических наук, ректор (Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация).

**Манаков Алексей Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», ректор (федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»), г. Новосибирск, Российская Федерация).

**Покровская Оксана Дмитриевна**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация).

**Сербиновский Борис Юрьевич**, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления факультета высоких технологий (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

**Ходашинский Илья Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Российская Федерация).

**Шувалов Вячеслав Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Передачи дискретных сообщений и метрологии (Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация).

**Якунин Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта (Оренбургский государственный университет, Оренбург, Российская Федерация).

## Управление процессами перевозок / Transportation Process Management

Научная статья

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-402](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-402)

УДК 656.259.9

EDN: [EJPKFZ](https://edn.org/EJPKFZ)

Original article



### Технологическая модель организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малоделятельных участках

А.В. Горелик, Е.В. Кузьмина

*Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация*

#### **Аннотация**

**Обоснование.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации эксплуатационных расходов на содержание устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на малоделятельных участках железных дорог. Такие участки, характеризующиеся грузонапряжённостью менее 15 млн. ткм/км в год, составляют значительную часть сети Российской Федерации, однако традиционные системы планово-предупредительного ремонта, ориентированные на интенсивно эксплуатируемые линии, приводят к неоправданно высоким удельным затратам, несоответствию периодичности обслуживания фактическому темпу старения оборудования и избыточному количеству выездов персонала. Современные тенденции требуют перехода к обслуживанию по фактическому состоянию с использованием методов прогнозной аналитики. Отсутствие комплексных технологических моделей, адаптированных к условиям малоделятельных участков, определяет необходимость разработки научно обоснованного подхода, обеспечивающего баланс между экономической эффективностью и требуемым уровнем безопасности движения.

**Цель** – разработка технологической модели организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малоделятельных участках железных дорог, основанной на принципах прогнозирования отказов и рационального распределения ресурсов, позволяющей снизить эксплуатационные затраты при сохранении или повышении надёжности и безопасности движения.

**Материалы и методы.** Исследование базируется на статистическом анализе 2348 записей об отказах устройств СЦБ на малоделятельных участках за период 2020–2023 гг., классифицированных по типам устройств и характеру неисправностей. Для

описания закономерностей возникновения отказов применено модифицированное распределение Вейбулла, учитывающее сезонные колебания и интенсивность эксплуатации. Методы нелинейной и динамической оптимизации использованы для определения рациональных межремонтных интервалов. Разработана имитационная модель системы обслуживания, выполнено 2000 прогонов для различных сценариев (доверительная вероятность 95%). Экономическая эффективность оценивалась методами дисконтирования денежных потоков (NPV, IRR, срок окупаемости). Исходные данные для расчётов соответствуют типовому малоделятельному участку протяжённостью 50 км с конкретным перечнем устройств и стоимостью работ.

**Результаты.** Предложенная технологическая модель, включающая дифференцированный подход к обслуживанию по классам критичности и алгоритм оптимизации межремонтных интервалов, позволяет увеличить средний интервал обслуживания на 57,8% (с 90 до 142 дней), сократить количество внеплановых отказов на 38,9% и среднее время восстановления на 45,2%. Коэффициент готовности системы может повыситься с 0,980 до 0,991, что соответствует снижению времени простоя на 55%. Годовые эксплуатационные затраты могут снизиться на 20,5% (2,7 млн руб. для участка 50 км) при расчётном сроке окупаемости капитальных вложений 1,6 года. Разработанные модели и рекомендации могут быть тиражированы на других малоделятельных участках железных дорог.

**Ключевые слова:** устройства СЦБ; малоделятельные участки; технологическое обслуживание; прогнозирование отказов; оптимизация затрат; адаптивное планирование; коэффициент готовности; экономическая эффективность; железнодорожная автоматика

**Для цитирования.** Горелик, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2026). Технологическая модель организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малоделятельных участках. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 7–29. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-402>

## Technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections

A.V. Gorelik, E.V. Kuzmina

*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation*

### **Abstract**

**Background.** The relevance of the study is due to the need to optimize operating costs for the maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections.

Such sections, characterized by freight intensity of less than 15 million tkm/km per year, constitute a significant part of the network of the Russian Federation. However, traditional scheduled preventive maintenance systems, designed for intensively operated lines, lead to unjustifiably high unit costs, a mismatch between the frequency of maintenance and the actual aging rate of equipment, and an excessive number of personnel trips. Current trends require a transition to condition-based maintenance using predictive analytics methods. The lack of comprehensive technological models adapted to the conditions of low-intensity sections determines the need to develop a scientifically based approach that ensures a balance between economic efficiency and the required level of traffic safety.

**Purpose.** Development of a technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections, based on the principles of failure prediction and rational resource allocation, allowing to reduce operating costs while maintaining or improving reliability and traffic safety.

**Materials and methods.** The research is based on a statistical analysis of 2,348 records of failures of signaling and interlocking devices on low-intensity sections for the period 2020–2023, classified by device types and nature of malfunctions. To describe the patterns of failure occurrence, a modified Weibull distribution was applied, taking into account seasonal fluctuations and operation intensity. Nonlinear and dynamic optimization methods were used to determine rational maintenance intervals. A simulation model of the maintenance system was developed, and 2,000 runs were performed for various scenarios (confidence probability 95%). Economic efficiency was assessed using discounted cash flow methods (NPV, IRR, payback period). The initial data for the calculations correspond to a typical low-intensity section 50 km long with a specific list of devices and work costs.

**Results.** The proposed technological model, including a differentiated approach to maintenance by criticality classes and an algorithm for optimizing maintenance intervals, allows to increase the average maintenance interval by 57.8% (from 90 to 142 days), reduce the number of unscheduled failures by 38.9%, and decrease the average recovery time by 45.2% (according to calculation results). The system availability factor can increase from 0.980 to 0.991, which corresponds to a reduction in downtime by 55%. Annual operating costs can be reduced by 20.5% (2.7 million rubles for a 50 km section) with an estimated payback period for capital investments of 1.6 years. The developed models and recommendations can be replicated on other low-intensity railway sections.

**Keywords:** signaling and interlocking devices; low-intensity sections; technological maintenance; failure prediction; cost optimization; adaptive planning; availability factor; economic efficiency; railway automation and telemechanics

**For citation.** Gorelik, A. V., & Kuzmina, E. V. (2026). Technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 7–29. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-402>

## **Введение**

Малодеятельные участки железных дорог, характеризующиеся грузонапряжённостью менее 15 млн. ткм/км в год, составляют значительную часть железнодорожной сети Российской Федерации, особенно в отдалённых регионах с низкой плотностью населения и промышленной активности. Несмотря на относительно низкую интенсивность движения поездов, данные участки требуют поддержания устройств СЦБ в работоспособном состоянии для обеспечения безопасности движения, что регламентировано соответствующими нормативными документами [2]. Однако традиционные системы планово-предупредительного ремонта (ППР), разработанные для интенсивно эксплуатируемых линий, на малодеятельных участках часто демонстрируют экономическую неэффективность. Это проявляется в неоправданно высоких удельных затратах на обслуживание единицы оборудования, несоответствии периодичности обслуживания фактическому темпу старения аппаратуры, а также в избыточном количестве выездов обслуживающего персонала.

Современные тенденции развития железнодорожного транспорта диктуют необходимость перехода от регламентного обслуживания по фиксированным графикам к обслуживанию по фактическому состоянию (ТОФС) с использованием методов прогнозной аналитики [1]. Особую актуальность этот подход приобретает в условиях малодеятельных участков, где оптимизация эксплуатационных расходов является критически важной для обеспечения рентабельности перевозок и сохранения работоспособности инфраструктуры в условиях бюджетных ограничений.

Целью настоящего исследования является разработка технологической модели организации обслуживания устройств СЦБ на малодеятельных участках, позволяющей существенно снизить эксплуатационные затраты при сохранении или даже повышении требуемого уровня надёжности и безопасности [5]. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

проведён анализ статистики отказов устройств СЦБ на малодетальных участках; разработан математический аппарат для оптимизации интервалов обслуживания; создана имитационная модель для оценки эффективности различных стратегий обслуживания; выполнен расчёт экономического эффекта от внедрения предложенных решений; подготовлены практические рекомендации по внедрению модели в условиях реальной эксплуатации [16].

### 1. Постановка задачи

Задача оптимизации системы обслуживания устройств СЦБ на малодетальных участках формулируется как многокритериальная проблема, требующая нахождения баланса между экономическими показателями и показателями надёжности [6]. Математически задача может быть представлена в следующем виде: для заданного набора устройств СЦБ на малодетальном участке необходимо определить такой режим обслуживания, который минимизирует суммарные приведённые затраты за расчётный период  $T$  при условии выполнения нормативных требований по вероятности безотказной работы системы в целом и её критически важных компонентов.

Формальная постановка задачи:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n (C_{pi} + C_{vi} + C_{pri})$$

при соблюдении ограничений:

$$P_{\text{системы}}(t) \geq P_{\text{норм}}$$

$$T_{\text{восст}_i} \leq T_{\text{доп}_i}$$

$$R_i \geq R_{\text{мин}_i}$$

$$\sum_{i=1}^n B_i \leq B_{\text{макс}}$$

где  $Z$  – суммарные приведённые затраты на обслуживание за период  $T$ ;

$C_{ni}$  – затраты на плановое обслуживание  $i$ -го устройства;  
 $C_{vi}$  – затраты на внеплановый ремонт  $i$ -го устройства;  
 $C_{npi}$  – косвенные потери от простоя  $i$ -го устройства;  
 $P_{системы}(t)$  – вероятность безотказной работы системы СЦБ в момент времени  $t$ ;  
 $P_{норм}$  – нормативное значение вероятности безотказной работы, устанавливаемое отраслевыми стандартами;  
 $T_{восст_i}$  – среднее время восстановления  $i$ -го устройства после отказа;  
 $T_{доп_i}$  – допустимое время восстановления для устройства данного типа;  
 $R_i$  – коэффициент готовности  $i$ -го устройства;  
 $R_{мин_i}$  – минимально допустимый коэффициент готовности;  
 $B_i$  – бюджетные затраты на обслуживание  $i$ -го устройства;  
 $B_{макс}$  – максимально допустимый бюджет на обслуживание системы СЦБ.

## 2. Методика исследования

Для решения поставленной задачи использован комплекс методов, включающий как теоретические исследования, так и практические расчёты на основе реальных эксплуатационных данных.

### 2.1. Методы теории надёжности

Проведён статистический анализ данных об отказах устройств СЦБ на малоделятельных участках железных дорог за период 2020-2023 гг. Всего обработано 2348 записей об отказах, классифицированных по типам устройств, характеру неисправностей, времени восстановления и другим параметрам. Для описания закономерностей возникновения отказов использованы распределения Вейбулла, экспоненциальное и нормальное распределения. Установлено, что для большинства электромеханических устройств СЦБ (стрелки, светофоры) наиболее адекватной является модель Вейбулла с параметром формы  $\beta > 1$ , что свидетельствует о наличии процесса старения и износа. Для электронных устройств (блоки АЛС,

процессорные системы) чаще наблюдается постоянная интенсивность отказов ( $\beta \approx 1$ ), характерная для внезапных отказов [4, 14].

## **2.2. Методы оптимизации**

Для определения рациональных интервалов обслуживания применены методы математического программирования, в частности, методы нелинейной оптимизации с ограничениями. Разработан алгоритм последовательной оптимизации, позволяющий находить локально оптимальные решения для каждого типа устройств с последующей координацией в рамках общей системы. Использование методов динамического программирования позволило учесть взаимное влияние решений, принимаемых для различных устройств, на общие показатели системы. Особое внимание уделено методам целочисленного программирования для решения задач оптимального распределения ограниченных ресурсов (персонала, специального оборудования) [3].

## **2.3. Имитационное моделирование**

Создана имитационная модель системы обслуживания устройств СЦБ, которая позволила оценить эффективность различных стратегий обслуживания в условиях неопределённости и случайных факторов. Модель учитывает такие параметры, как время доезда бригад, наличие запасных частей, приоритетность восстановления различных устройств, зависимость времени ремонта от времени суток и погодных условий, влияние человеческого фактора. Проведено 2000 прогонов модели для различных сценариев, что обеспечило статистическую значимость результатов с доверительной вероятностью 95% [3].

## **2.4. Экономические методы расчёта эффективности**

Для оценки экономического эффекта от внедрения предложенной модели использованы методы дисконтирования денежных потоков, расчёта чистого приведённого дохода (NPV), внутренней нормы доходности (IRR) и срока окупаемости. Учтены как прямые экономические, так и косвенные. Проведён анализ чувствительности результатов к изменениям ключевых параметров [13].

## 2.5. Классификация устройств СЦБ по критичности

На основе анализа нормативных документов и экспертных оценок разработана трёхуровневая классификация устройств СЦБ по степени их критичности для обеспечения безопасности движения и бесперебойности перевозочного процесса [7].

К первому (высшему) классу критичности отнесены устройства, отказ которых непосредственно угрожает безопасности движения и может привести к тяжёлым последствиям. К ним относятся системы автоблокировки, электрической централизации стрелок и системы управления движением поездов. Для данных устройств установлена допустимая вероятность отказа на уровне 0,999, а максимально допустимое время восстановления не должно превышать одного часа. Они имеют наивысший приоритет обслуживания (1), требуют ежедневного мониторинга и обязательного резервирования с организацией непрерывного автоматизированного контроля параметров.

Второй (средний) класс критичности объединяет устройства, влияющие на безопасность, но допускающие несколько большее время восстановления без создания непосредственной угрозы. В эту группу входят переездная сигнализация, устройства автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и средства связи поезда с диспетчером [9]. Для них допустимая вероятность отказа составляет 0,995, а предельное время восстановления увеличено до четырёх часов. Приоритет обслуживания определён как второй, периодичность мониторинга – еженедельная, при этом особые требования предполагают периодический контроль с обязательной регистрацией диагностических параметров [17].

Третий (низкий) класс критичности включает вспомогательное оборудование, технологическую связь и резервные системы, выход из строя которых не оказывает существенного влияния на безопасность движения и может быть устранён в плановом порядке. Для таких устройств допустимая вероятность отказа установлена на уровне 0,990, а максимальное время восстановления

может достигать 24 часов. Они имеют третий (наименьший) приоритет обслуживания, ежемесячную периодичность мониторинга и обслуживаются преимущественно по фактическому состоянию с применением визуального контроля [10].

## 2.6. Математическая модель интенсивности отказов

Для описания процесса старения и возникновения отказов устройств СЦБ предложена модифицированная модель Вейбулла, учитывающая как износ, так и случайные факторы:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} + \lambda_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \sin(\frac{2\pi t}{365} + \varphi)) + \gamma \cdot I_{\text{экспл}}$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов в момент времени  $t$  (отказов/день);

$\beta$  – параметр формы, характеризующий механизм отказа ( $\beta < 1$  для периода приработки,  $\beta = 1$  для периода нормальной эксплуатации,  $\beta > 1$  для периода износа);

$\eta$  – параметр масштаба, связанный со сроком службы устройства;

$\lambda_0$  – постоянная составляющая интенсивности отказов, не зависящая от времени;

$\alpha$  – коэффициент сезонности (учёт влияния климатических факторов);

$\varphi$  – фаза сезонных колебаний;

$\gamma$  – коэффициент влияния интенсивности эксплуатации;

$I_{\text{экспл}}$  – интенсивность эксплуатации;

$t$  – время эксплуатации устройства с момента последнего капитального ремонта (дни).

Данная модель более адекватно описывает реальное поведение устройств СЦБ, чем классическое распределение Вейбулла, так как учитывает наличие постоянного потока случайных отказов, сезонные колебания и зависимость от интенсивности эксплуатации. Параметры модели оценивались методом максимального правдоподобия на основе статистики отказов с использованием алгоритма Expectation-Maximization для обработки цензурированных данных.

### 3. Технологическая модель обслуживания

Предлагаемая технологическая модель (рис. 1) представляет собой комплекс организационно-технических мер, направленных на оптимизацию процесса обслуживания устройств СЦБ на малодеятельных участках [8].

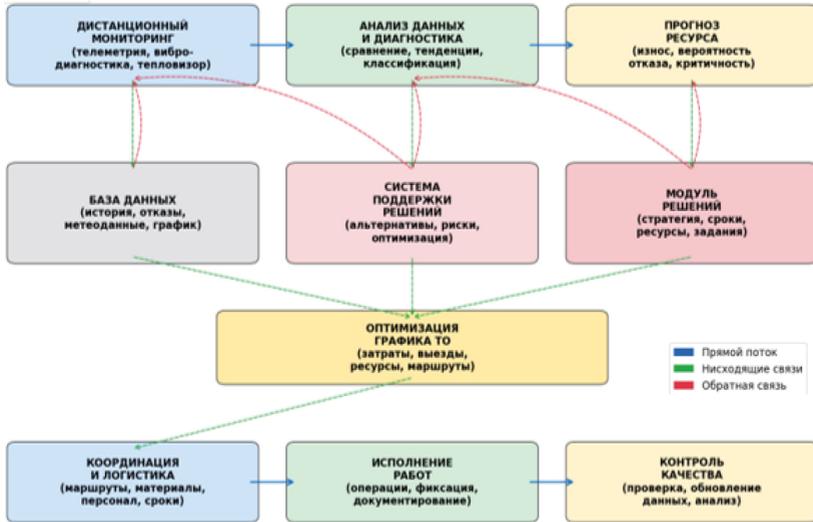


Рис. 1. Блок-схема технологической модели обслуживания  
Fig. 1. Block diagram of the service process model

Модель основана на четырёх ключевых принципах:

1. Дифференциация – различный подход к обслуживанию устройств в зависимости от их критичности и технического состояния.
2. Прогнозность – переход от реактивного к проактивному обслуживанию на основе прогноза остаточного ресурса.
3. Адаптивность – гибкое изменение планов обслуживания в зависимости от фактического состояния оборудования и внешних факторов.
4. Интеграция – объединение данных мониторинга, планирования и исполнения работ в единой информационной системе.

### 3.1. Алгоритм определения оптимального интервала обслуживания

Оптимальный интервал обслуживания  $T$  для каждого типа устройств определяется из решения задачи минимизации суммарных приведённых затрат на единицу времени. Затраты включают как прямые расходы на проведение плановых технических обслуживаний, так и ожидаемые затраты на устранение внеплановых отказов, возникающих в промежутках между обслуживаниями.

Формально задача ставится следующим образом:

Оптимальный интервал обслуживания  $T$  определяется из минимизации суммарных удельных затрат:

$$C_{\text{сум}}(T) = \frac{C_{\text{то}}}{T} + C_{\text{в}} \cdot \int_0^T \lambda(t)dt + C_{\text{в}} \cdot \int_0^T (1 - R(t))dt \rightarrow \min$$

где  $C_{\text{сум}}(T)$  – суммарные удельные затраты на обслуживание (руб./день);

$C_{\text{то}}$  – стоимость одного планового обслуживания (руб.);

$C_{\text{в}}$  – средняя стоимость устранения внепланового отказа (руб.);

$C_{\text{пр}}$  – удельные потери от простоя устройства (руб./день);

$\lambda(t)$  – функция интенсивности отказов (отказов/день);

$R(t)$  – функция готовности устройства;

$T$  – интервал между плановыми обслуживаниями (дни).

Для модели Вейбулла с параметрами  $\beta$  и  $\eta$  решение имеет аналитический вид при  $\beta > 1$ :

$$T_{\text{опт}} = \eta \cdot \left[ \frac{C_{\text{то}}}{C_{\text{в}} \cdot (\beta - 1) + C_{\text{пр}} \cdot \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta)} \right]^{1/\beta}$$

где  $\Gamma()$  – гамма-функция.

Данная формула справедлива при  $\beta > 1$ , что соответствует периоду износа устройств. Для устройств с  $\beta \leq 1$  (период нормальной эксплуатации) оптимальной стратегией является обслуживание по состоянию, а не по календарному графику [15].

### 3.2. Расчёт экономического эффекта

Экономический эффект от внедрения предлагаемой модели складывается из нескольких составляющих:

1. Снижение затрат на плановое обслуживание за счёт увеличения межремонтных интервалов для части устройств.

2. Снижение затрат на внеплановые ремонты за счёт уменьшения количества отказов благодаря более обоснованной периодичности обслуживания.

3. Снижение потерь от простоев за счёт уменьшения времени восстановления благодаря улучшенной логистике и наличию прогноза отказов.

4. Оптимизация логистических затрат за счёт координации выездов бригад и объединения работ по обслуживанию нескольких устройств в одной поездке.

5. Снижение затрат на запасные части за счёт более точного прогнозирования потребности и оптимизации страховых запасов.

Годовой экономический эффект рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \sum_i \Delta Z_i - \Delta K \cdot N_{\text{ам}} - \sum_i \Delta Z_{\text{внедр}_i}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{год}}$  – годовой экономический эффект (руб.);

$\Delta Z_i$  – снижение затрат по  $i$ -й статье (руб.);

$\Delta K$  – дополнительные капитальные вложения, необходимые для внедрения системы мониторинга и прогнозирования (руб.);

$N_{\text{ам}}$  – норма амортизации оборудования системы мониторинга;

$Z_{\text{внедр}_i}$  – затраты на внедрение по  $i$ -й статье.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K + \sum_i \Delta Z_{\text{внедр}_i}}{\sum_i \Delta Z_i}$$

Чистый приведённый доход (NPV) за расчётный период  $n$  лет:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_i \Delta Z_i}{(1+d)^i} - \left( \Delta K + \sum_i \Delta Z_{\text{внедр}_i} \right)$$

где  $d$  – ставка дисконтирования, учитывающая риски и альтернативные возможности использования капитала.

## 4. Результаты расчётов

### 4.1. Исходные данные для расчётов

Для проведения расчётов выбран типовой малодеятельный участок протяжённостью 50 км, расположенный на территории железной дороги с низкой грузонапряжённостью [12]. Структура устройств СЦБ на участке и основные экономические параметры представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

#### Исходные данные для малодеятельного участка длиной 50 км

Table 1. Initial data for a low-activity section 50 km long

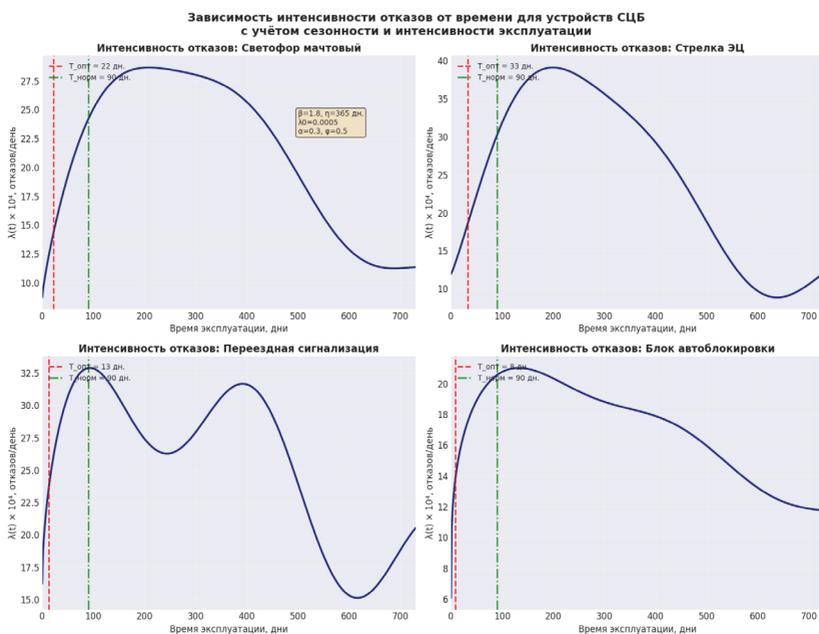
Параметр	Значение
Количество стрелок с ЭЦ	10 шт.
Количество светофоров	24 шт.
Количество переездов	3 шт.
Устройства автоблокировки	4 компл.
Системы АЛС	2 компл.
Устройства связи	6 компл.
Стоимость планового обслуживания одного устройства	16500 руб./ед.
Стоимость внепланового ремонта одного устройства	49500 руб./ед.
Потери от простоя устройства	9500 руб./час
Среднее время прибытия бригады	2,5 час
Стоимость системы мониторинга	3800000 руб.
Годовая инфляция	6,5%
Ставка дисконтирования	11%

### 4.2. Результаты математического моделирования и оптимизации параметров обслуживания

Для визуализации аналитических зависимостей, полученных в ходе исследования, и подтверждения эффективности предложенного математического аппарата были проведены численные эксперименты с использованием разработанной имитационной модели. Расчеты выполнялись на основе исходных данных, характерных для типового малодеятельного участка (Таблица 1), и позволили получить графические интерпретации ключевых законо-

мерностей, влияющих на эффективность обслуживания устройств СЦБ [18].

На рис. 2 представлены кривые изменения интенсивности отказов  $\lambda(t)$  для четырех типов устройств, построенные на основе модифицированной модели Вейбулла с учетом сезонных колебаний. Характер кривых подтверждает наличие периода износа ( $\beta > 1$ ) для электромеханических устройств (стрелки ЭЦ, светофоры), тогда как для электронных компонентов (устройства АЛС) интенсивность отказов остается более стабильной во времени.



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации для различных типов устройств СЦБ

**Fig. 2.** Dependence of failure rate on operating time for various types of signaling devices

Ключевым выводом из графического анализа является соотношение нормативного ( $T_{\text{норм}}$ ) и расчетного оптимального ( $T_{\text{опт}}$ ) межремонтных интервалов. Для всех типов устройств оптимальный

интервал, рассчитанный по критерию минимума удельных затрат, превышает нормативный. Наибольший потенциал увеличения межремонтного периода выявлен для стрелок ЭЦ (параметр формы  $\beta=2,2$ ), что объясняется ярко выраженной зависимостью их технического состояния от наработки и возможностью точного прогнозирования остаточного ресурса.

Анализ структуры затрат (рис. 3) наглядно демонстрирует изменение экономики обслуживания при переходе от традиционной модели к предлагаемой. В традиционной системе доминируют затраты на плановое техническое обслуживание (65%), выполняемое по жесткому графику вне зависимости от фактической потребности. Внедрение прогнозной модели приводит к перераспределению ресурсов: доля прямых затрат на плановое ТО снижается до 45%, при этом появляется новая статья – затраты на диагностику и мониторинг (33%). Такая трансформация обеспечивает смещение акцента с «реактивного» ремонта на «предиктивное» управление состоянием, что позволяет предотвращать отказы, а не устранять их последствия.

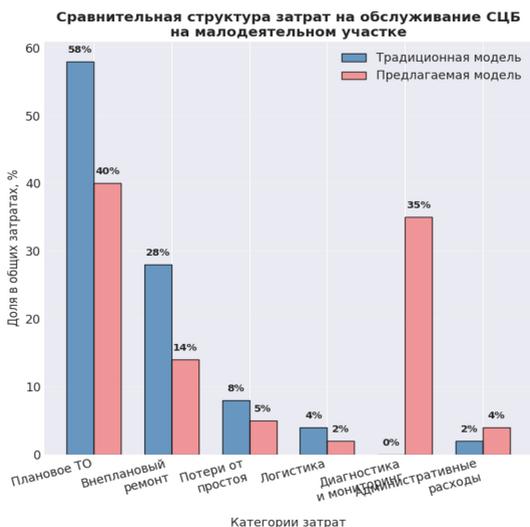


Рис. 3. Сравнительный анализ структуры эксплуатационных затрат  
 Fig. 3. Comparative analysis of operating cost structure

График на рис. 4 иллюстрирует решение ключевой оптимизационной задачи – нахождение интервала обслуживания  $T$ , минимизирующего суммарные удельные затраты  $C_{\text{сум}}$ .



**Рис. 4.** Определение оптимального интервала обслуживания  
**Fig. 4.** Determining the optimal service interval

Кривая имеет явно выраженный параболический характер с точкой минимума при  $T_{\text{опт}} = 142$  дня. Левая ветвь графика (интервал менее 100 дней) соответствует зоне «избыточного обслуживания», где неоправданно высокие расходы на плановые работы не приводят к соразмерному снижению количества отказов. Правая ветвь (интервал более 180 дней) отражает зону риска, где экономия на плановых работах нивелируется ростом затрат на внеплановые ремонты и потерь от простоев. Переход от нормативного интервала (90 дней) к оптимальному (142 дня) обеспечивает расчетное снижение суммарных затрат на 23,4%.

На рис. 5 представлен прогноз изменения эксплуатационных затрат на период 2024–2029 гг. В традиционной системе наблюдается устойчивый рост затрат (в среднем на 5–6% ежегодно), обусловленный инфляцией и старением оборудования. Внедрение

предлагаемой модели позволяет стабилизировать годовые расходы на уровне 10,1–10,5 млн руб. благодаря сокращению потребности в материальных и трудовых ресурсах.



**Рис. 5.** Прогноз экономической эффективности внедрения модели  
**Fig. 5.** Forecast of the economic efficiency of implementing the model

Правая часть рис. 5 демонстрирует накопленный дисконтированный эффект. Несмотря на необходимость первоначальных инвестиций в систему мониторинга и обучение персонала (4,25 млн руб.), проект выходит на точку безубыточности в 2026 году. Чистый приведенный доход (NPV) за 6 лет составляет 8,3 млн руб., что подтверждает инвестиционную привлекательность и экономическую целесообразность масштабирования предложенной технологической модели на другие малодеятельные участки [11].

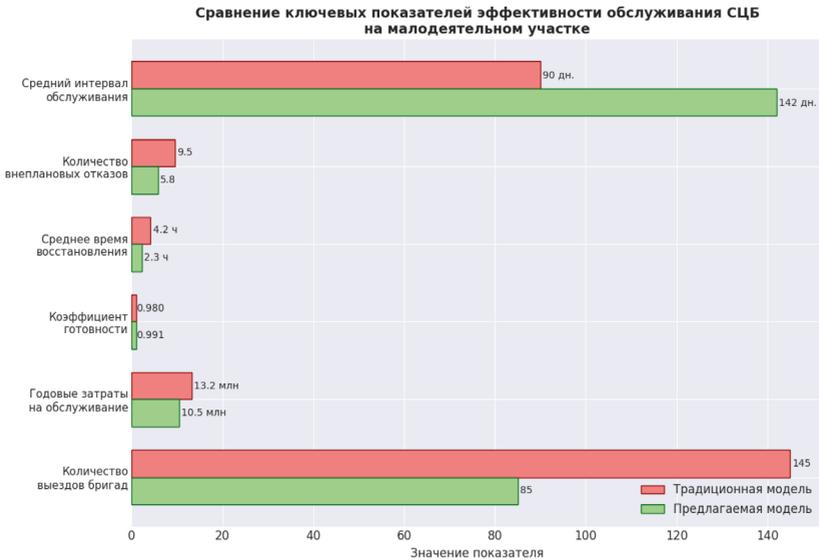
### 4.3. Результаты оптимизации

На основе проведённых расчётов получены сравнительные показатели эффективности традиционной системы обслуживания и предлагаемой модели, которые представлены на рис 6.

Анализ данных, представленных на рис, 6 позволяет сделать следующие выводы:

1. Внедрение предлагаемой модели позволит увеличить время среднего интервала обслуживания на 57,8% (с 90 до 142 дней), приведет к сокращению количества внеплановых отказов на

38,9%, уменьшению среднего времени восстановления на 45,2 %, снижению количества выезда бригад на 58,6%.



**Рис. 6.** Сравнение ключевых показателей эффективности обслуживания СЦБ на малодеятельном участке

**Fig. 6.** Comparison of key performance indicators for signaling system maintenance on a low-traffic section

2. Коэффициент готовности системы повысится с 0,980 до 0,991, что соответствует снижению годового времени простоя на 55 % (со 175 до 79 часов) и напрямую повлияет на пропускную способность участка.

3. Суммарный годовой экономический эффект составит 2,7 млн руб. при сроке окупаемости капитальных вложений (4,25 млн руб.) 1,6 года.

## Заключение

Разработана технологическая модель обслуживания устройств СЦБ на малодеятельных участках, основанная на принципах прогнозирования остаточного ресурса и адаптивного планирования.

Модель интегрирует методы дистанционного мониторинга, прогнозной аналитики и оптимизации ресурсов с учётом удалённости, ограниченной доступности и низкой интенсивности эксплуатации участков.

Создан математический аппарат, включающий модифицированное распределение Вейбулла для описания интенсивности отказов (с учётом сезонности и интенсивности эксплуатации), алгоритмы оптимизации межремонтных интервалов по критерию минимума суммарных затрат и методы оценки экономической эффективности с дисконтированием денежных потоков.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию с системами искусственного интеллекта, разработку цифровых двойников устройств и создание облачных платформ для централизованного управления обслуживанием.

Модель имеет высокий потенциал тиражирования не только на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях с распределёнными техническими системами (метрополитен, энергетика, телекоммуникации). Её реализация может повысить эффективность использования бюджетных средств, способствовать сохранению требуемого уровня безопасности и создать основу для цифровой трансформации системы технического обслуживания.

#### *Список литературы*

1. Armstrong, H. (2008). *The railroad, what it is, what it does* (5th ed.). Omaha: Simmons-Boardman Books.
2. Aubertin, F. J. (2018). *Your guide to railway signals*. Omaha: Simmons-Boardman Books, Inc.
3. Hansen, I., & Pachl, J. (Eds.). (2014). *Railway timetabling & operations – analysis, modelling, optimisation, simulation, performance evaluation*. Hamburg: Eurailpress.
4. Pachl, J. (2009). *Railway operation and control* (4th ed.). Mountlake Terrace: VTD Rail Publishing.
5. Theeg, G., & Vlasenko, S. (Eds.). (2020). *Railway signalling and interlocking – international compendium* (3rd ed.). Hamburg: Eurailpress.

6. Горелик, А. В., & Ермакова, О. П. (2003). *Надёжность информационных систем. Основы надёжности устройств ЖАТС*: учеб. пособие. Москва: РГО-ТУПС, 87 с. ISBN: 5-7473-0146-2. EDN: <https://elibrary.ru/QMМОZF>
7. Горелик, А. В., Веселова, А. С., Журавлёв, И. А., Неваров, П. А., Орлов, А. В., Савченко, П. В., & Тарадин, Н. А. (2015). *Оценка функционального ресурса систем железнодорожной автоматики и телемеханики*. Москва: МИИТ, 27 с.
8. Горелик, А. В., Романов, Н. В., & Щедрина, Т. С. (2024). Организация эффективного технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на малоделятельных участках. *International Journal of Advanced Studies*, 14(4), 169–184. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-329>. EDN: <https://elibrary.ru/WOTLEB>
9. ГОСТ 33893-2016. *Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля*.
10. ГОСТ 33895-2016. *Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегонах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля*.
11. *Инструкция по техническому содержанию устройств инфраструктуры на малоинтенсивных линиях железных дорог* (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 24.01.2019 № 110/р, в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 13.12.2023 № 3167/р).
12. Курбатова, А. В., & Прошкина, Е. С. (2009). Возможные стратегии решения проблемы малоделятельных железнодорожных линий с учётом мирового опыта. В кн.: *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD '2009): Материалы третьей международной конференции (секции 4–6), Москва, 05–07 октября 2009 года* (Т. 2, с. 97–100). Москва: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. EDN: <https://elibrary.ru/WECLGT>
13. Толкачёва, М. М., & Мартынова, Л. А. (2007). *Методика определения расходов и доходов малоинтенсивных железнодорожных линий (участков) ОАО «РЖД»*. Москва: ФГУП ВНИИЖТ, 123 с.
14. Сапожников, В. В., Сапожников, В. В., Ефанов, Д. В., & Шаманов, В. И. (2017). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи*: учеб. пособие для специалистов. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 318 с. ISBN: 978-5-906938-01-5. EDN: <https://elibrary.ru/YOYVNZ>
15. Горелик, А. В., Алешкин, А. М., Миненков, О. С., & Фёдоров, В. С. (2021). О планировании графика технического обслуживания устройств железно-

- дорожной автоматики и телемеханики. В кн.: *Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития: Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Киров, 07 июня 2021 года* (Ч. 1, с. 22–25). Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС». EDN: <https://elibrary.ru/FFREWI>
16. Половко, А. М., & Гуров, С. В. (2006). *Основы теории надёжности*: учеб. пособие. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. ISBN: 5-94157-541-6. EDN: <https://elibrary.ru/QMERHX>
  17. *Положение о системе ведения хозяйства автоматики и телемеханики* (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.02.2022 № 386/р), 24 с.
  18. Сирина, Н. Ф., Смольянинов, А. В., & Юшков, М. Е. (2012). Разработка управленческих решений по эффективному использованию малодеятельных железнодорожных линий. *Транспорт Урала*, (2), 75–80. EDN: <https://elibrary.ru/OXWYUH>

### References

1. Armstrong, H. (2008). *The railroad, what it is, what it does* (5th ed.). Omaha: Simmons Boardman Books.
2. Aubertin, F. J. (2018). *Your guide to railway signals*. Omaha: Simmons Boardman Books, Inc.
3. Hansen, I., & Pachl, J. (Eds.). (2014). *Railway timetabling & operations – analysis, modelling, optimisation, simulation, performance evaluation*. Hamburg: Eurailpress.
4. Pachl, J. (2009). *Railway operation and control* (4th ed.). Mountlake Terrace: VTD Rail Publishing.
5. Theeg, G., & Vlasenko, S. (Eds.). (2020). *Railway signalling and interlocking – international compendium* (3rd ed.). Hamburg: Eurailpress.
6. Gorelik, A. V., & Ermakova, O. P. (2003). *Reliability of information systems. Fundamentals of reliability of railway automation and remote control devices: textbook*. Moscow: RGOTUPS, 87 p. ISBN: 5-7473-0146-2. EDN: <https://elibrary.ru/QMMOZF>
7. Gorelik, A. V., Veselova, A. S., Zhuravlev, I. A., Nevarov, P. A., Orlov, A. V., Savchenko, P. V., & Taradin, N. A. (2015). *Assessment of the functional resource of railway automation and remote control systems*. Moscow: МИИТ, 27 p.
8. Gorelik, A. V., Romanov, N. V., & Shchedrina, T. S. (2024). Organization of efficient maintenance of railway automation and remote control devices on low-activity sections. *International Journal of Advanced Studies*, 14(4), 169–184. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-329>. EDN: <https://elibrary.ru/WOTLEB>

9. GOST 33893-2016. *Railway automation and remote control systems at railway crossings. Safety requirements and control methods.*
10. GOST 33895-2016. *Railway automation and remote control systems on railway line sections. Safety requirements and control methods.*
11. *Instructions for technical maintenance of infrastructure devices on low-intensity railway lines* (approved by Order No. 110/r of JSC “RZD” dated January 24, 2019, as amended by Order No. 3167/r of JSC “RZD” dated December 13, 2023).
12. Kurbatova, A. V., & Proshkina, E. S. (2009). Possible strategies for solving the problem of low-activity railway lines considering global experience. In: *Management of large-scale system development (MLSD '2009): Proceedings of the Third International Conference (Sections 4–6), Moscow, October 5–7, 2009* (Vol. 2, pp. 97–100). Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. EDN: <https://elibrary.ru/WECLGT>
13. Tolkacheva, M. M., & Martynova, L. A. (2007). *Methodology for determining costs and revenues of low-intensity railway lines (sections) of JSC “RZD”*. Moscow: FGUP VNIIZhT, 123 p.
14. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., Efanov, D. V., & Shamanov, V. I. (2017). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems: textbook for specialists*. Moscow: Educational and Methodological Center for Railway Transport Education, 318 p. ISBN: 978-5-906938-01-5. EDN: <https://elibrary.ru/YOYVNZ>
15. Gorelik, A. V., Aleshkin, A. M., Minenkov, O. S., & Fedorov, V. S. (2021). On planning a maintenance schedule for railway automation and remote control devices. In: *New science: history of formation, current state, development prospects: Collection of articles from the International Scientific and Practical Conference. In 2 parts, Kirov, June 7, 2021* (Part 1, pp. 22–25). Ufa: LLC “OMEGA SAINS”. EDN: <https://elibrary.ru/FFREWI>
16. Polovko, A. M., & Gurov, S. V. (2006). *Fundamentals of reliability theory: textbook*. Saint Petersburg: BKhV Petersburg. ISBN: 5-94157-541-6. EDN: <https://elibrary.ru/QMERHX>
17. *Regulations on the railway automation and remote control management system* (approved by Order No. 386/r of JSC “RZD” dated February 17, 2022), 24 p.
18. Sirina, N. F., Smolyaninov, A. V., & Yushkov, M. E. (2012). Developing management decisions for efficient use of low-activity railway lines. *Transport of the Urals*, (2), 75–80. EDN: <https://elibrary.ru/OXWYYH>

#### ДАнные ОБ АВТОРАХ

**Горелик Александр Владимирович**, директор академии «Российская открытая академия транспорта», доктор технических наук

*Российский университет транспорта  
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация  
agorelik@yandex.ru*

**Кузьмина Елена Витальевна**, ассистент

*Российский университет транспорта  
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация  
kuzminaelena96@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Aleksandr V. Gorelik**, Director of the Academy “Russian Open Academy of Transport”, Doctor of Technical Sciences

*Russian University of Transport (MIIT)  
9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation  
agorelik@yandex.ru  
SPIN-code: 9543-4715  
Scopus Author ID: 57200751967*

**Elena V. Kuzmina**, Assistant

*Russian University of Transport (MIIT)  
9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation  
kuzminaelena96@yandex.ru*

Поступила 15.02.2026

После рецензирования 09.03.2026

Принята 15.03.2026

Received 15.02.2026

Revised 09.03.2026

Accepted 15.03.2026

## Управление процессами перевозок / Transportation Process Management

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-412](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-412)

EDN: [GFCYHT](https://www.edn.ru/GFCYHT)

УДК 656.02



### Социальные аспекты оценки эффективности применения брутто-контрактов в отношении пригородных автобусных маршрутов в городских агломерациях

А.С. Головасечева<sup>1</sup>, Д.А. Дрючин<sup>2</sup>, В.М. Кабишева<sup>1</sup>,  
Т.В. Коновалова<sup>1</sup>, С.Л. Надирян<sup>1</sup>, В.И. Рассоха<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кубанский государственный технологический университет,  
Краснодар, Российская Федерация

<sup>2</sup>Оренбургский государственный университет,  
Оренбург, Российская Федерация

#### Аннотация

**Обоснование.** Статья посвящена социальной оценке перехода на брутто-контракты для пригородных автобусных маршрутов в крупных агломерациях на примере Краснодара. Доказано, что для пассажиров пригородных направлений ключевыми факторами являются не комфорт, а регулярность и доступность транспорта в часы пик. На примере типичного маршрута №186б (пос. Лазурный – центр города) проведен детальный анализ пассажиропотока, выявлена его высокая неравномерность (коэффициент 2.75) и рассчитаны основные эксплуатационные показатели. Установлено, что существующие проблемы – невыполнение расписания и недостаток комфорта – могут быть целенаправленно решены через условия брутто-контракта, который задает жесткие требования к подвижному составу и регулярности.

**Цель** – оценка социальной эффективности и обоснование целесообразности перехода на брутто-контракты на примере пригородных автобусных маршрутов городской агломерации Краснодара. Исследование направлено на выявление ключевых социальных требований пассажиров и оценку влияния брутто-модели на качество транспортной услуги.

**Метод и методология проведения работы.** В исследовании использовались системный анализ, натурные обследования и инструментальные методы, аналитико-расчетные методы, анкетирование.

**Результаты.** Установлена высокая социальная значимость и типичная для пригородно-городского маршрута динамика пассажиропотока. Выявлена существенная неравномерность загрузки по направлениям и времени суток, подтвержденная высоким коэффициентом неравномерности (2.75). Установлено, что текущие показатели использования вместимости (коэффициент  $\sim 0.41$ ) указывают на резерв для оптимизации распределения подвижного состава. На основе анкетирования подтверждены ключевые проблемы: недостаточный комфорт и невыполнение расписания, которые могут быть регламентированы в рамках брутто-контракта.

**Область применения результатов.** Результаты исследования могут быть использованы органами управления транспортом крупных городских агломераций для обоснования перевода пригородных и городских маршрутов на брутто-контракты. Исследование демонстрирует инструмент повышения качества жизни, снижения социальной напряженности, улучшения экологии и управления мобильностью населения через реформу транспортного обслуживания.

**Ключевые слова:** брутто-контракт; пригородные автобусные маршруты; городская агломерация; социальная эффективность; пассажиропоток; качество транспортного обслуживания; регулярность движения

**Для цитирования.** Головасечева, А. С., Дрючин, Д. А., Кабишева, В. М., Конавалова, Т. В., Надирян, С. Л., & Рассоха, В. И. (2026). Социальные аспекты оценки эффективности применения брутто-контрактов в отношении пригородных автобусных маршрутов в городских агломерациях. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 30–49. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-412>

## Social aspects of assessing the effectiveness of gross-contract transportation for commuter bus routes in urban agglomerations

A.S. Golovasecheva<sup>1</sup>, D.A. Dryuchin<sup>2</sup>, V.M. Kabisheva<sup>1</sup>,

T.V. Konovalova<sup>1</sup>, S.L. Nadiryan<sup>1</sup>, V.I. Rassokha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

<sup>2</sup>Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

### Abstract

**Background.** This article examines the social transition to gross-contract transportation for commuter bus routes in large metropolitan areas such as Krasnodar. It is shown that the key factors for commuter passengers include inconvenience, regu-

larity, and accessibility of transport during peak hours. Based on the calculations for route 186b (Lazurny settlement – city center), a detailed passenger flow analysis was conducted, identifying its high unevenness (coefficient 2.75), and calculating key performance indicators.

It was established that random issues such as schedule failures and insufficient comfort can be addressed through the use of a gross contract, which sets strict requirements for rolling stock and service frequency.

The **purpose** of this study is to assess social effectiveness and justify the transition to gross contracts using suburban bus routes in Krasnodar’s metropolitan areas as an example. The study aims to identify key social requirements for passengers and evaluate gross models of transport service quality.

**Methodology.** Systems analysis, naturalistic research and instrumental methods, analytical and computational methods, and questionnaires were used.

**Results.** High social innovation and passenger flow dynamics typical for a suburban-urban route were identified. Significant unevenness in load across routes and times of day was revealed, confirmed by a high unevenness coefficient (2.75). Current capacity utilization rates (coefficient ~0.41) were found to indicate potential for optimizing rolling stock distribution. Key issues were confirmed through questionnaires: comfort and schedule delays, which can be regulated under a gross contract.

**Practical implications.** The study’s results can be used to support transport management in commercial agglomerations to justify the transition of suburban and standard routes to gross contracts. A study of electronic tools for improving quality of life, reducing social isolation, improving the environment, and managing population mobility through transport service reform.

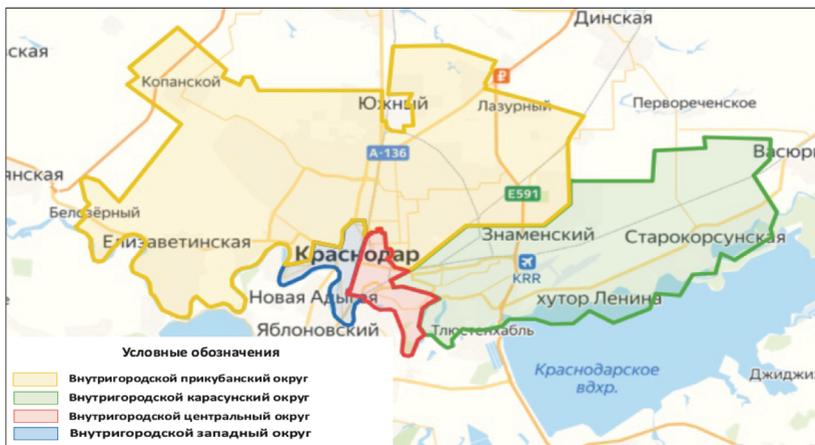
**Keywords:** gross contract; suburban bus routes; urban agglomeration; social efficiency; passenger flow; quality of transport service; regularity of traffic

**For citation.** Golovasecheva, A. S., Dryuchin, D. A., Kabisheva, V. M., Konovalova, T. V., Nadiryan, S. L., & Rassokha, V. I. (2026). Social aspects of assessing the effectiveness of gross-contract transportation for commuter bus routes in urban agglomerations. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 30–49. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-412>

В городских агломерациях, ядром которых являются крупные и крупнейшие города, имеются динамично развивающиеся районы с численностью жителей более 10 тысяч человек, которые обслуживаются городскими и пригородными маршрутами транспорта общего пользования.

Особенности географии перемещений в городе Краснодар определяется пространственной организацией городской среды, в которой селитебные территории и производственные зоны формируют устойчивые маятниковые пассажирские потоки. Краснодар – это город с ярко выраженной радиально-линейной моделью роста, так как основные центры притяжения - административные, деловые, медицинские и образовательные - сосредоточены преимущественно в центральной части города, тогда как жилые массивы активно развиваются на периферии.

В Краснодаре периферийные районы, особенно расположенные вдоль крупных магистралей (Ейское шоссе, Ростовское шоссе, улица Красных Партизан, улица Уральская, и др.), отличаются активной мало и средне этажной застройкой, высокой плотностью населения, и сравнительно низким уровнем обеспеченности рабочими местами. Это приводит к устойчивым маятниковым перемещениям «пригород-центр». Ближе к центру плотность застройки возрастает, что приводит к увеличению частоты остановок и концентрации пересадочных узлов, следовательно, к постепенному нарастанию пассажиропотока в направлении центра города.



**Рис. 1.** Карта агломерации города Краснодар  
**Fig. 1.** Map of the Krasnodar agglomeration

В связи с тем, что производственные, складские и логистические зоны расположены вдоль ряда магистралей – в районах Завода радиоизмерительных приборов, промышленных территорий по улицам Уральской, Ставропольской, Новороссийской, Ростовскому шоссе и др., то здесь формируются собственные трудовые потоки. Они будут отличаться от традиционных утренних и вечерних перемещений жителей тем, что непосредственно зависят от режима сменности предприятий, а также создают дополнительные волны нагрузки в течение дня. Вследствие чего, транспортная система обслуживает как прямые маятниковые связи между жилыми и деловыми районами, так и локальные перемещения в пределах производственных узлов. Это создает неравномерную нагрузку на транспортную сеть в течение дня.

Инфраструктурные и географические и ограничения тоже оказывают большое влияние на развитие маршрутной сети и характер передвижений. Городская улично-дорожная сеть города Краснодара имеет свои «узкие места» связанные с пересечениями крупных магистралей, ограничениями, создаваемыми железнодорожными путями, мостами через реку Кубань. Зависимостью от единственного транспортного коридора характеризуется Северо-восточное направление, южное – узкими местами в районе привокзальной и центральной части, а западное – концентрацией промышленных зон и логистических центров. Все это приводит к тому, что любая перегрузка магистралей, а также локальная задержка значительно увеличивает время перемещения и ухудшает регулярность движения общественного транспорта.

Основным ограничивающим (сдерживающим) фактором повышения эффективности транспортной системы города и перераспределения пассажиропотоков с личного транспорта на муниципальный являются социально-экономические аспекты, такие как комфорт, время перемещения, которое может сократиться за счет организации выделенных полос движения, количество пересадок, стоимость проезда. Учет качества транспортного обслуживания –

это не дополнительная опция, а основа современной транспортной политики. Без этого транспорт общего пользования не сможет конкурировать с личным автомобилем, что приводит к росту затрат, ухудшению экологии и снижению мобильности населения. Главный сдвиг в мышлении: нужно планировать не просто «маршруты», а «транспортную услугу», где пассажир и его потребности находятся в центре всех решений.

Эффективность перехода на брутто-контракты в крупных городах как социально значимый аспект заключается:

Для населения – комфортным транспортом (автобусами Евро класс 5 и выше), оборудованным кондиционером, доступной средой для маломобильных групп населения, оснащённый камерами видео наблюдения, бесконтактной оплатой проезда, установленной на каждой входной двери. Соблюдение расписания движения, которое позволит более эффективно использовать свое время.

Для перевозчика – стимулом для замены подвижного состава более высокого экологического класса и отвечающим всем современным требованиям. Стабильное финансовое положение, улучшение условий труда водителей пассажирского транспорта, ремонтных рабочих и обслуживающего персонала.

Для города – улучшением экологической обстановки, снижением социальной напряжённости среди населения и снижением нагрузки на улично-дорожную сеть.

Крупному городу, стремящемуся к устойчивому развитию, поощрение брутто-модели – это не просто тренд, а инструмент повышения качества жизни и социального благополучия своих жителей. Это шаг от модели «выживания» в условиях непредсказуемой экономической ситуации, к модели «планирования», определенности и комфорта.

Для пригородных маршрутов регулярность и доступность подвижного состава действительно являются ключевыми, доминирующими факторами. Их можно назвать основными требованиями пассажира.

Это отличает пригородное сообщение от междугородного или городского транспорта, где другие факторы могут быть важнее.

Почему именно эти факторы – доминанта?

1. Своевременность:

Жесткая привязка к графику: Люди используют пригородный транспорт для регулярных поездок «дом–работа–дом», на учёбу, в больницу. Их расписание зависит от графика движения транспорта.

Минимизация времени ожидания: Непредсказуемость интервалов (задержки, отмены) — это стресс, потеря времени и риск опоздания. Пассажир готов терпеть некоторый дискомфорт, но не сбой в расписании.

Взаимосвязь с другими видами транспорта: Пригородные маршруты часто интегрированы с городской сетью (трамваи, троллейбусы, автобусы). Сбой в одном звене ведет к каскадным опозданиям.

2. Доступность подвижного состава:

«Уехать в нужный час»: Это означает достаточную провозную способность в часы пик, чтобы пассажир не остался на остановке из-за переполненного состава.

Частота движения: Чем чаще ходит общественный транспорт, тем гибче становится график пассажира. Длинные интервалы (более 30-40 минут) резко снижают привлекательность маршрута.

Равномерность распределения: Расписание должно быть составлено так, чтобы покрывать пиковые нагрузки, а перерывы, пересменки предусматривать в межпиковое время.

По данным Департамента транспорта и дорожного хозяйства администрации муниципального образования город Краснодар на 01.10.2025г. в муниципальном образовании насчитывается 92 автобусных маршрута, из них 59 городских и 33 пригородных. На сегодняшний день, в городе Краснодаре 17 маршрутов полностью перешли на брутто-контракты и рассматривается распространение данной модели на всю транспортную сеть Кубани. В результате анализа совокупности пригородных маршрутов, в качестве объ-

екта исследования был выбран маршрут 186б. Такой выбор обусловлен его типичностью, отсутствием особенностей, оказывающих заметное влияние на параметры пассажиропотоков и условия работы транспортных средств. В отношении выбранного маршрута определены закономерности формирования пассажиропотоков, социально-экономические факторы и транспортно-эксплуатационные показатели подвижного состава.

Формирование пассажиропотока на маршруте 186б определяется совокупностью пространственных, временных и социальных факторов. В утренние часы наблюдается высокий поток в сторону города, в вечерние - в обратном направлении. Это типично для маршрутов, соединяющих жилые пригородные районы с городскими центрами занятости. Неравномерное распределение нагрузки на общественный транспорт наблюдается в близи крупных транспортных узлов и остановок, расположенных вблизи образовательных, торговых и медицинских учреждений, об этом свидетельствуют значительные колебания числа вошедших и вышедших пассажиров на остановочных пунктах «ТРЦ Галерея», «ул. Хакурате», «Дом Союзов». Помимо традиционных пиков, дополнительный спрос формируется в обеденные часы, за счёт поездок в город по социально-бытовым нуждам.

На примере маршрута № 186б установлено, что параметры пассажиропотоков пригородных маршрутов определяются такими факторами, как: структура занятости населения, проживающего в пригородной зоне; плотность и тип застройки пригородных жилых массивов.

По результатам комплексного обследования установлено, что коэффициент неравномерности пассажиропотока по перегонам пригородных маршрутов составляет 2,75; что указывает на необходимость корректировки частоты движения или перераспределения подвижного состава в часы пик.

Средняя дальность поездки, рассчитанная как отношение пассажирооборота к общему количеству вошедших и вышедших пас-

сажиров, составила 15,9 км. При этом протяжённость маршрута в прямом направлении равна 29,8 км и в обратном 29,6 км. Такой показатель указывает на преобладание поездок средней протяжённости, что характерно для периферийно-центральных связей.

Коэффициент сменности, отражающий частоту обновления пассажирского состава вдоль маршрута, по результатам наблюдений равен 5,29. Это говорит о высокой динамике посадки и высадки пассажиров и подтверждает интенсивное использование маршрута на различных участках.

Эффективность использования номинальной вместимости определена через статический и динамический коэффициенты. Статический коэффициент использования вместимости равен 0,41, что свидетельствует о среднем уровне загрузки автобусов по числу перевезённых пассажиров. Динамический коэффициент также составляет 0,41, что говорит о сопоставимости фактической загрузки подвижного состава с учётом пройденного расстояния и подтверждает равномерность использования вместимости на протяжении движения. Полученные значения коэффициентов указывают на необходимость оптимизации распределения автобусов и повышения эффективности загрузки в часы пик.

На основании результатов выполненных расчётов установлено, что для обслуживания пассажиропотока на наиболее загруженном перегоне маршрута в часы пик требуется 12 автобуса. Эта величина подтверждает высокую интенсивность спроса и необходимость регулярного и частого движения автобусов по маршруту №186б.

Анализ транспортно-эксплуатационных показателей маршрута №186б позволяет сделать вывод о его высокой социальной значимости в плане удовлетворения транспортных потребностей населения городской агломерации.

Результаты обследования пассажиропотоков маршрута № 186б отражены в таблицах 1 и 2. Анализ представленных данных позволяет сделать заключение о неравномерности загрузки выполняемых рейсов как по периодам суток, так и по направлениям.

Таблица 1.

**Пассажиропоток на маршруте 186б в прямом направлении**
**ЦКР - пос. 2-го отделения учхоза «Краснодарское»**

 Table 1. Passenger traffic on route 186b in the direct direction  
 of the KSC – settlement of the 2nd division ‘Krasnodarskoye’

Направление		В прямом направлении: ЦКР - пос. 2-го отделения учхоза «Краснодарское»								
№ п/п	Остановочные пункты	Перевезено пассажиров, чел.								
		Рейс 1 вт 13:00			Рейс 3 ср 16:50			Рейс 5 чт 18:30		
		вошло	вышло	наполненность	вошло	вышло	наполненность	вошло	вышло	наполненность
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ЦКР	16	0	16	15	0	15	10	0	10
2	ТРЦ «Галерея»	1	0	17	4	0	19	3	0	13
3	Ул.им.Хакурате	7	0	24	5	0	24	5	0	18
4	Дом Союзов	2	0	26	5	0	29	3	1	20
5	Ул.Одесская	1	0	27	3	0	32	3	0	23
6	Ул.им.Гаврилова П.М.	8	0	35	10	0	42	14	0	37
7	Екатерининский зал	10	0	45	12	0	54	8	0	45
8	Ул.Солнечная	2	2	45	3	1	56	4	0	49
9	Техносклад	0	1	44	0	0	56	0	0	49
10	Краснодар-Сталь	0	0	44	0	0	56	5	0	54
11	Бауцентр	2	1	43	1	2	57	2	0	56
12	Ул.им.Ягодина	0	0	43	0	2	55	1	1	56
13	Ул.Геологическая	3	4	44	2	5	52	3	2	57
14	Ул.пригородная	1	1	44	1	7	46	2	0	58
15	Лукойл	0	0	44	0	0	46	2	5	56
16	Ул.Большевитская	1	3	42	0	0	46	0	0	56
17	Ипподром	6	5	43	2	5	43	0	0	56
18	9 км РШ	0	6	37	0	7	36	2	5	53
19	10 км РШ	0	6	31	0	5	31	2	6	49
20	11 км РШ	2	5	28	0	9	22	1	12	38
21	12 км РШ	0	4	24	0	2	20	1	15	24
22	13 км РШ	0	7	17	0	4	16	1	14	11
23	Поворот в лазурный	2	9	10	3	0	19	1	0	12
24	Ул.Мира	4	0	14	0	0	0	0	1	11
25	Сквер Лазурный	2	7	9	0	9	10	0	1	10
26	Пос.Лазурный	2	2	9	0	3	7	0	8	2
27	Ул.Октябрьская	0	4	5	0	5	2	0	2	0

28	Ул.Магистральная	0	0	5	0	0	0	0	0	
29	пос. 2-го отделения уч-хоза «Краснодарское»	0	5	0	0	2	0	0	0	
<b>Итого</b>		72	72	28.1	66	66	30.7	73	73	31.8

Таблица 2.

**Пассажиропоток на маршруте 186б в обратном направлении  
пос. 2-го отделения учхоза «Краснодарское» - ЦКР**

Table 2. Passenger traffic on route 186b in the opposite direction:  
settlement of the 2nd division 'Krasnodarskoye' - KSC

Направление		В обратном направлении: пос. 2-го отделения учхоза «Краснодарское» - ЦКР								
№ п/п	Остановочные пункты	Перевезено пассажиров, чел.								
		Рейс 2 вт 14:40			Рейс 4 ср 18:20			Рейс 6 чт 19:50		
		вошло	вышло	наполнен-ность	вошло	вышло	наполнен-ность	вошло	вышло	наполнен-ность
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	пос. 2-го отделения уч-хоза «Краснодарское»	0	0	0	1	0	1	2	0	2
2	Ул.Магистральная	1	0	1	0	0	0	3	0	5
3	Ул.Октябрьская	14	1	14	5	0	6	1	0	6
4	Пос.Лазурный	15	0	29	6	0	12	0	0	6
5	Сквер Лазурный	2	0	31	10	0	22	1	0	7
6	Ул.Мира	2	0	33	1	0	23	3	0	10
7	Поворот в лазурный	3	11	25	3	4	22	1	0	11
8	13 км РШ	3	5	23	1	6	17	2	1	12
9	12 км РШ	1	0	24	1	3	15	0	0	12
10	11 км РШ	1	7	18	3	2	16	2	0	14
11	10 км РШ	2	1	19	0	1	15	2	0	16
12	9 км РШ	1	4	16	2	6	11	1	0	17
13	Ипподром	0	2	14	1	3	9	0	1	16
14	Ул.Большевитская	0	1	13	0	0	9	0	0	16
15	Лукойл	0	0	13	0	0	9	0	0	16
16	Ул.пригородная	0	1	12	0	0	9	0	0	16
17	Ул.Геологическая	0	6	6	1	0	10	0	0	16
18	Ул.им.Ягодина	0	0	0	0	0	10	0	0	16
19	Бауцентр	1	3	4	0	3	6	0	1	15
20	Краснодар-Сталь	0	0	4	0	0	0	0	0	15

21	Техносклад	0	0	4	0	0	0	1	1	15
22	Ул.Солнечная	1	1	4	0	1	5	0	0	15
23	Екатерининский зал	0	2	2	0	1	4	0	7	8
24	Ул.им.Гаврилова П.М.	1	1	2	0	1	3	0	5	3
25	Ул.Одесская	0	0	0	1	2	2	2	0	5
26	Дом Союзов	0	2	0	0	2	0	0	3	2
27	Ул.им.Хакурате	0	0	0	0	0	0	0	0	2
28	ТРЦ «Галерея»	0	0	0	0	0	0	0	2	0
29	ЦКР	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Итого</b>		48	48	10.7	36	36	8.1	30	30	1.03

Таким образом, результаты анализа пассажиропотоков на маршруте 186б в различные интервалы времени в прямом и обратном направлении показывают их зависимость от пространственно-временных и социально-экономических факторов.

Маршрут 186б – это пригородно-городской маршрут, соединяющий жилой массив поселка Лазурный и прилегающие районы с центральной частью Краснодара. Длина автобусного маршрута составляет 29,7 км и включает 29 остановочных пунктов, что обеспечивает охват значительной части транспортно зависимых территорий. Средняя продолжительность поездки достигает 1,5 часа, что обусловлено как протяженностью линии, так и прохождением через участки улично-дорожной сети с переменной пропускной способностью. Указанные параметры характеризуют маршрут как протяженный и социально значимый, обеспечивающий связь пригородных и внутригородских зон при умеренной скорости транспортного сообщения. Схема маршрута в прямом и обратном направлении приведена на рисунке 2.

Дополнительно, в рамках данного исследования проведено анкетирование пассажиров (450 человек). Выявлены наиболее значимые факторы, определяющие привлекательность транспорта общего пользования. Внедрение брутто-контракта в отношении маршрута 186б позволит обеспечить решение ряда системных проблем выявленных в рамках анкетирования. К числу таких проблем следует отнести:

- Не достаточный уровень комфорта: В контракте целесообразно указать требования к подвижному составу (низкопольные автобусы не старше двух лет, кондиционеры, безналичная оплата). В настоящее время на маршруте 186б работают автобусы возраст 1,5 года, полу низкопольные с кондиционером.

- Невыполнение заявленного расписания. Выполнение заявленного расписания является одним из обязательных пунктов брутто-контракта.

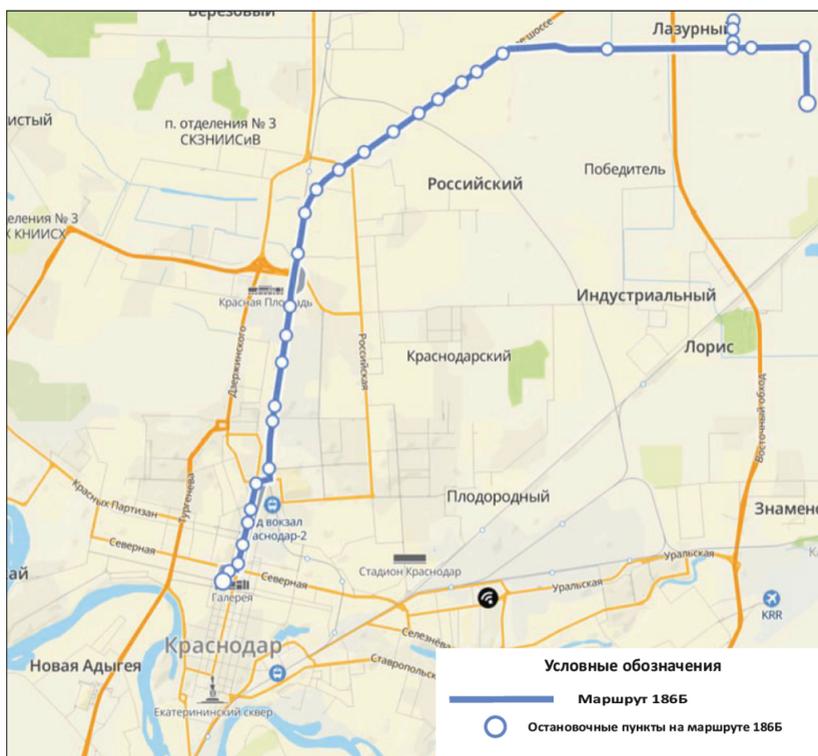


Рис. 2. Маршрут 186Б

Fig. 2. Route 186B

Условия брутто-контракта способствуют повышению стабильности и социальной направленности деятельности перевозчика.

Обеспечиваются экономические условия обслуживания социально значимых пригородных маршрутов, которые невыгодны при реализации коммерческой модели.

Создается долгосрочная и предсказуемая система, позволяющая городу централизованно планировать развитие маршрутной сети, обновлять подвижной состав и участвовать в федеральных программах субсидирования.

Для динамично развивающихся крупных агломераций недостаточно просто изменения городских маршрутов. Успех пригородной системы определяется не роскошью, а надежностью и пропускной способностью. Все остальные улучшения (комфорт, цифровизация, экология) являются надстройкой над этим фундаментом. Если система ненадежна или недоступна в час пик, пассажиры будут искать альтернативы, несмотря на любые другие преимущества. Необходимо создавать интегрированную маршрутную сеть с четкой иерархией, где каждый тип маршрута выполняет свою функцию, а их работа синхронизирована. Только так можно обеспечить качество транспортного обслуживания, которое будет стимулировать людей пользоваться городским пассажирским транспортом, а не увеличивать число личных автомобилей на дорогах агломерации. Для решения задачи соблюдения расписания движения необходимо внедрять выделенные полосы для движения транспорта общего пользования.

#### *Список литературы*

1. Концепция «умного города» в Российской Федерации. (2022). Москва: Минстрой России, 65 с.
2. Стратегия развития транспортной системы Краснодарского края до 2030 года. (2021). Краснодар: Министерство транспорта и дорожного хозяйства Краснодарского края, 120 с.
3. Иноземцева, А. Ю., & Коновалова, Т. В. (2019). Цифровая трансформация пассажирского транспорта. В кн.: *Механика, оборудование, материалы и технологии: электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, Краснодар, 29–30 октября 2019 года* (с. 613–616). Краснодар: ООО «Принт Терра». EDN: <https://elibrary.ru/JIXMJD>

4. Изюмский, А. А., Надирян, С. Л., Леонова, И. О., & Гонтарук, А. В. (2025). Цифровые трансформации транспорта в городе Краснодар. В кн.: *Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств: Сборник научных трудов по материалам XX Международной научно-технической конференции, Саратов, 24 июня 2025 года* (с. 40–46). Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А. EDN: <https://elibrary.ru/VYJTDY>
5. Изюмский, А. А., Надирян, С. Л., & Коцурба, С. В. (2023). Цифровизация – единственный путь развития автомобильных перевозок. *International Journal of Advanced Studies*, 13(4), 118–127. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-4-118-127>. EDN: <https://elibrary.ru/DTCBRL>
6. Надирян, С. Л., Коновалова, Т. В., Гонтарук, А. В., & Рынкova, П. А. (2025). Совершенствование организации пассажирских перевозок на примере регулярного маршрута в г. Краснодаре. *Вестник Донецкой академии транспорта*, (2), 50–60. EDN: <https://elibrary.ru/XJBOEZ>
7. *Аналитический обзор «Mobility as a Service (MaaS): мировой и российский опыт»*. (2021). Москва: Агентство стратегических инициатив, 45 с.
8. Надирян, С. Л. (2024). *Методика оптимизации численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городского пассажирского транспорта*: дис. ... канд. техн. наук, 140 с. EDN: <https://elibrary.ru/KLNFNI>
9. Дрючин, Д. А., Коновалова, Т. В., Лебедев, Е. А., Надирян, С. Л., & Рассоха, В. И. (2024). *Оптимизация численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городских агломераций*: монография. Краснодар: Издательский Дом — Юг, 178 с.
10. Коновалова, Т. В., Надирян, С. Л., & Котенкова, И. Н. (2024). *Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса*: учеб. пособие. Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «КубГУ», 256 с. ISBN: 978-5-8333-1355-8. EDN: <https://elibrary.ru/SZMALB>
11. Надирян, С. Л., Дрючин, Д. А., & Рассоха, В. И. (2023). *Программа расчёта себестоимости перевозки пассажиров по муниципальным маршрутам регулярных перевозок*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023668943, 06.09.2023 (заявка № 2023667650 от 25.08.2023).
12. Надирян, С. Л., Дрючин, Д. А., Рассоха, В. И., & Изюмский, А. А. (2024). *Программа расчёта технико-экономических показателей работы автобусов на регулярном маршруте городского пассажирского транспорта при обеспечении оптимальной наполняемости салона*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024619554, 24.04.2024 (заявка от 18.04.2024).

13. Надирян, С. Л., Дрючин, Д. А., Рассоха, В. И., & Изюмский, А. А. (2024). *Программа расчёта численности транспортных средств, обслуживающих регулярный маршрут городского пассажирского транспорта при обеспечении оптимальной наполняемости салона*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024660023, 02.05.2024 (заявка от 18.04.2024).
14. Рассоха, В. И. (2010). Ситуационное управление автотранспортными системами. Схема и сценарии управления городским пассажирским транспортом. *Вестник Оренбургского государственного университета*, (4), 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/MLZQRX>
15. Бочаров, И. А., Власов, Ю. Л., & Рассоха, В. И. (2011). Модель определения оптимального количества маршрутных транспортных средств. *Вестник Оренбургского государственного университета*, (10), 49–53. EDN: <https://elibrary.ru/PDRBUX>
16. Regirer, S. A., Smirnov, N. N., & Chenchik, A. E. (2007). Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers. *Automation and Remote Control*, 68(7), 1225–1238. <https://doi.org/10.1134/S0005117907070107>. EDN: <https://elibrary.ru/LKGOXF>
17. Mao, B.-H., Wang, M., Ho, T.-K., & Chen, H.-B. (2022). A review and prospect of urban public transit level-of-service research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 22(1), 2–13.
18. Dahim, M. (2021). Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(12), 2030–2042. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091776>. EDN: <https://elibrary.ru/ATRZWP>

### References

1. Concept of a “smart city” in the Russian Federation. (2022). Moscow: Ministry of Construction of Russia, 65 p.
2. Strategy for the development of the transport system of Krasnodar Krai until 2030. (2021). Krasnodar: Ministry of Transport and Road Facilities of Krasnodar Krai, 120 p.
3. Inozemtseva, A. Yu., & Konovalova, T. V. (2019). Digital transformation of passenger transport. In: *Mechanics, equipment, materials and technologies: electronic collection of scientific articles based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, October 29–30, 2019* (pp. 613–616). Krasnodar: LLC “Print Terra”. EDN: <https://elibrary.ru/JIXMJD>
4. Izyumsky, A. A., Nadiryanyan, S. L., Leonova, I. O., & Gontaruk, A. V. (2025). Digital transformations of transport in the city of Krasnodar. In: *Topical issues of organiz-*

- ing road transportation, traffic safety and vehicle operation: Collection of scientific papers based on the materials of the XX International Scientific and Technical Conference, Saratov, June 24, 2025* (pp. 40–46). Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. EDN: <https://elibrary.ru/VYJTDY>
5. Izyumsky, A. A., Nadiryan, S. L., & Kotsurba, S. V. (2023). Digitalization – the only path for the development of road transportation. *International Journal of Advanced Studies*, 13(4), 118–127. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-4-118-127>. EDN: <https://elibrary.ru/DTCBRL>
  6. Nadiryan, S. L., Konovalova, T. V., Gontaruk, A. V., & Rynkova, P. A. (2025). Improving the organization of passenger transportation using the example of a regular route in Krasnodar. *Bulletin of Donetsk Transport Academy*, (2), 50–60. EDN: <https://elibrary.ru/XJBOEZ>
  7. Analytical review “Mobility as a Service (MaaS): global and Russian experience”. (2021). Moscow: Agency for Strategic Initiatives, 45 p.
  8. Nadiryan, S. L. (2024). *Methodology for optimizing the number of motor vehicles serving regular urban passenger transport routes: PhD thesis*, 140 p. EDN: <https://elibrary.ru/KLNFNI>
  9. Dryuchin, D. A., Konovalova, T. V., Lebedev, E. A., Nadiryan, S. L., & Rassokha, V. I. (2024). *Optimization of the number of motor vehicles serving regular routes in urban agglomerations: monograph*. Krasnodar: Publishing House “Yug”, 178 p.
  10. Konovalova, T. V., Nadiryan, S. L., & Kotenkova, I. N. (2024). *Organization of transportation services and transport process safety: textbook*. Krasnodar: Kuban State Technological University Publishing House, 256 p. ISBN: 978-5-8333-1355-8. EDN: <https://elibrary.ru/SZMALB>
  11. Nadiryan, S. L., Dryuchin, D. A., & Rassokha, V. I. (2023). *Program for calculating the cost of passenger transportation on municipal regular routes*. Certificate of computer program registration RU 2023668943, September 06, 2023 (application No. 2023667650 dated August 25, 2023).
  12. Nadiryan, S. L., Dryuchin, D. A., Rassokha, V. I., & Izyumsky, A. A. (2024). *Program for calculating technical and economic performance indicators of buses on a regular urban passenger transport route while ensuring optimal cabin occupancy*. Certificate of computer program registration RU 2024619554, April 24, 2024 (application dated April 18, 2024).
  13. Nadiryan, S. L., Dryuchin, D. A., Rassokha, V. I., & Izyumsky, A. A. (2024). *Program for calculating the number of vehicles serving a regular urban passenger transport route while ensuring optimal cabin occupancy*. Certificate of computer program registration RU 2024660023, May 02, 2024 (application dated April 18, 2024).

14. Rassokha, V. I. (2010). Situational management of motor transport systems. Scheme and scenarios for managing urban passenger transport. *Bulletin of Orenburg State University*, (4), 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/MLZQRX>
15. Bocharov, I. A., Vlasov, Yu. L., & Rassokha, V. I. (2011). Model for determining the optimal number of route vehicles. *Bulletin of Orenburg State University*, (10), 49–53. EDN: <https://elibrary.ru/PDRBUX>
16. Regirer, S. A., Smirnov, N. N., & Chenchik, A. E. (2007). Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers. *Automation and Remote Control*, 68(7), 1225–1238. <https://doi.org/10.1134/S0005117907070107>. EDN: <https://elibrary.ru/LKGOXF>
17. Mao, B.-H., Wang, M., Ho, T.-K., & Chen, H.-B. (2022). A review and prospect of urban public transit level of service research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 22(1), 2–13.
18. Dahim, M. (2021). Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(12), 2030–2042. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091776>. EDN: <https://elibrary.ru/ATRZWP>

#### ДАнные ОБ АВТОРАХ

**Головасечева Алина Сергеевна** студент кафедры «Транспортных процессов и технологических комплексов»  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»  
ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация  
[alinagolovasecheva@gmail.com](mailto:alinagolovasecheva@gmail.com)

**Дрючин Дмитрий Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации и ремонта автомобилей  
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»  
пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация  
[dmi-dryuchin@yandex.ru](mailto:dmi-dryuchin@yandex.ru)

**Кабишева Вероника Михайловна** студент кафедры «Транспортных процессов и технологических комплексов»  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»  
ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация  
[kabisheva173@gmail.com](mailto:kabisheva173@gmail.com)

**Коновалова Татьяна Вячеславовна**, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортных процессов и технологических комплексов»

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»  
ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация  
tan\_kon@mail.ru*

**Надирян София Леоновна**, кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Транспортных процессов и технологических комплексов»  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»  
ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация  
sofi008008@yandex.ru*

**Рассоха Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, декан  
Транспортного факультета  
*ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»  
пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация  
cabin2012@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Alina S. Golovasycheva**, Student of the Department of “Transport Processes and  
Technological complexes”  
*Kuban State Technological University  
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
alinagolovasecheva@gmail.com*

**Dmitry A. Dryuchin**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the  
Department of Technical Operation and Repair of Automobiles  
*Orenburg State University  
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation  
dmi-dryuchin@yandex.ru*

**Veronika M. Kabisheva**, Student of the Department of “Transport Processes and  
Technological complexes”  
*Kuban State Technological University  
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
kabisheva173@gmail.com*

**Tatiana V. Konovalova**, PhD in Economics, Associate Professor, Head of the Depart-  
ment of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*

*2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
tan\_kon@mail.ru*

**Sofia L. Nadiryan**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University  
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
sofi008008@yandex.ru*

**Vladimir I. Rassokha**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Transport  
*Orenburg State University  
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation  
cabin2012@yandex.ru*

Поступила 11.12.2025  
После рецензирования 10.01.2026  
Принята 20.01.2026

Received 11.12.2025  
Revised 10.01.2026  
Accepted 20.01.2026

## Управление процессами перевозок / Transportation Process Management

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-413](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-413)

EDN: [DSIJNQ](https://edn.ras.ru/DSIJNQ)

УДК 656.2



### Автоматизация операций с тормозными башмаками для улучшения качества работы станции

Е.К. Иванов, Г.И. Никифорова

*Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

#### Аннотация

**Обоснование.** Обосновывается необходимость совершенствования работы станций для повышения эффективности доставки грузов с использованием железнодорожного транспорта. Исследуются возможные способы улучшения существующих стеллажей, предназначенных для хранения тормозных башмаков в пределах железнодорожной станции, используемых для закрепления железнодорожного подвижного состава на путях станции. В статье анализируется система учета и хранения тормозных башмаков. Текущие условия позволяют говорить о необходимости поиска эффективных решений в существующей технологии хранения тормозных башмаков, имеющей ряд недостатков. Анализируются безопасность движения поездов и маневровая работа. Описаны основные операции, выполняемые при работе со стеллажами и тормозными башмаками. Подробно описана предлагаемая технология модернизации стеллажей, которая позволит обеспечить контроль правильности закрепления железнодорожного подвижного состава на путях железнодорожной станции, снизить число случаев несанкционированного ухода подвижного состава, движения состава «на башмаках» и последующего схода, а также случаев хищения тормозных башмаков.

**Цель.** Автоматизация операций с тормозными башмаками для улучшения качества работы станции.

**Методология.** В работе проведен анализ технологических операций с тормозными башмаками, разработана автоматизированная конструкция стеллажа, проведен SWOT-анализ проекта.

**Результаты.** Разработана модернизированная конструкция стеллажа для хранения тормозных башмаков, оснащенная RFID-считывателем, электромагнитным замком и концевыми датчиками, показывающими наличие или отсутствие башмака в стеллаже. Предложена система удаленного мониторинга, позволяющая контролировать состояние башмаков в режиме реального времени.

**Область применения результатов.** Поездная и маневровая работа железнодорожных станций.

**Ключевые слова:** стеллаж; тормозные башмаки; подвижной состав; железнодорожная станция; безопасность; несанкционированный уход; хищение

**Для цитирования.** Иванов, Е. К., & Никифорова Г. И. (2026). Автоматизация операций с тормозными башмаками для улучшения качества работы станции. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 50–63. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-413>

## Automation of operations with brake shoes to improve the quality of station work

E.K. Ivanov, G.Is. Nikiforova

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
St. Petersburg, Russian Federation*

### *Abstract*

**Background.** The article substantiates the need to improve the operation of railway stations in order to increase the efficiency of cargo delivery using rail transport. It explores possible ways to improve the existing racks used to store brake shoes within the railway station, which used to secure railway rolling stock on the station's tracks. The article analyzes the system of accounting and storage of brake shoes. The current conditions highlight the need to find effective solutions for the existing technology of storing brake shoes, which has several drawbacks. The article analyzes the safety of train traffic and shunting operations. It describes the main operations performed when working with racks and brake shoes. The article also provides a detailed description of the proposed technology for upgrading racks, which will help ensure that railway rolling stock is properly secured on the railway station tracks, reduce the number of unauthorized departures of rolling stock, "brake-on" movements, and subsequent derailments, as well as the theft of brake shoes.

**Purpose.** Automation of operations with brake shoes to improve the quality of the station's work.

**Methodology.** The paper analyzes technological operations with brake shoes, develops an automated rack design, and conducts a SWOT analysis of the project.

**Results.** An upgraded rack design for storing brake shoes has been developed, equipped with an RFID reader, an electromagnetic lock, and end sensors that indicate the presence or absence of a shoe in the rack. A remote monitoring system has been proposed, allowing for real-time monitoring of the shoe's condition.

**Practical implications.** Train and maneuvering operations at railway stations.

**Keywords:** rack; brake shoes; rolling stock; railway station; safety; unauthorized leaving; theft

**For citation.** Ivanov, E. K., & Nikiforova, G. Is. (2026). Automation of operations with brake shoes to improve the quality of station work. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 50–63. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-413>

В современных условиях на железнодорожном транспорте особое внимание уделяется повышению безопасности и эффективности эксплуатации подвижного состава, что положительно отражается на логистических цепях доставки с использованием железнодорожного сообщения [1]. Стоит отметить, что возрастающее значение имеет и качество работы железнодорожного транспорта, который должен быть конкурентоспособным на рынке транспортных услуг не только для внутреннего потребителя, но и на международном уровне [2; 3]. Скорость и качество выполнения технологических операций с поездами и вагонами остается основой безопасной и эффективной работы железнодорожной станции [4]. Одним из ключевых элементов обеспечения безопасности являются тормозные башмаки, используемые для закрепления подвижного состава на путях. Существующие методы хранения и контроля наличия тормозных башмаков в стеллажах не позволяют обеспечить достаточный уровень контроля, что создает угрозу безопасности движения на железнодорожном транспорте. В научной литературе рассматриваются различные подходы к организации хранения и учета тормозных башмаков, включая механические и электронные системы контроля [5-7]. Тем не менее, большинство существующих решений не предусматривает комплексного подхода, включающего автоматизированное управ-

ление доступом и мониторинг наличия башмаков в стеллажах в реальном времени [9]. Практическая значимость данной работы заключается в разработке и внедрении усовершенствованной системы хранения тормозных башмаков, основанной на использовании RFID-меток, электромагнитных замков и концевых датчиков [5; 6]. Предлагаемые решения по модернизации стеллажей, предназначенных для хранения тормозных башмаков, позволит повысить уровень безопасности, минимизировать финансовые потери, улучшить и значительно упростить учёт тормозных башмаков. В качестве нового подхода предлагается интеграция системы контроля доступа (СКУДОПП) с датчиками, определяющими наличие или отсутствие башмаков в стеллажах и передачей данных на автоматизированное рабочее место дежурного по железнодорожной станции в уже существующую программу «автоматизированная система управления станцией нового поколения» (АСУ СТ НП). Это позволит в режиме реального времени отслеживать количество башмаков, находящихся в стеллажах, контролировать доступ сотрудников и обеспечивать автоматизированную отчетность.

*Цель исследования* – разработка и внедрение автоматизированной системы хранения тормозных башмаков, снижение числа случаев несанкционированного ухода подвижного состава путём обеспечения контроля правильности закрепления подвижного состава, а также упрощение учёта тормозных башмаков. Методы исследования включают анализ существующих решений, проектирование аппаратно-программного комплекса, проведение экспериментальных испытаний и анализ эффективности предложенной системы.

Разработка системы автоматизированного контроля тормозных башмаков базируется на нескольких фундаментальных принципах, лежащих в основе современных методов учета, идентификации и управления техническими средствами железнодорожного транспорта. Современные системы учета и контроля доступа к объектам критической инфраструктуры используют радиочастот-

ную идентификацию (RFID) как надежный и эффективный инструмент [5; 6]. RFID-метки обеспечивают возможность уникальной идентификации объекта, что исключает дублирование данных и снижает вероятность ошибок. Согласно работам в области логистики и складского учета, применение RFID-технологий позволяет повысить точность контроля до 99,9%. В контексте хранения тормозных башмаков RFID-считыватель, установленный в стеллаже, позволяет автоматически фиксировать его открытие и закрытие, что критически важно для предотвращения хищения и несанкционированного использования тормозных башмаков.

В системах безопасности широко применяется концепция многоуровневого контроля доступа [7]. В предлагаемой системе реализован двухфакторный принцип аутентификации: идентификация сотрудников посредством RFID-карт Mifare 13,56 МГц (высокозащищенный стандарт); контроль наличия башмаков с использованием механических концевых выключателей. Этот подход исключает возможность несанкционированного получения башмаков без соответствующей авторизации. Автоматизированные системы, работающие в условиях открытого воздуха, требуют повышенной надежности как механических, так и электронных компонентов [8]. Исследования в области промышленной автоматизации показывают, что электромагнитные замки обладают высокой долговечностью и надежностью при эксплуатации в агрессивной среде. Использование механических концевых выключателей также оправдано, так как они не требуют питания для фиксации состояния, что повышает надежность системы при возможных сбоях в энергоснабжении. Удаленный контроль технических средств становится стандартом в транспортной отрасли [9]. В предлагаемом решении предусмотрена передача данных о наличии башмаков и доступе к ним в реальном времени на удаленный сервер. Это позволяет вести централизованный контроль, анализировать эксплуатационные данные и оперативно реагировать на нештатные ситуации. На основе

рассмотренных теоретических положений можно утверждать, что предлагаемая система представляет собой комплексное решение, объединяющее современные технологии идентификации, контроля доступа и удаленного мониторинга. Использование RFID, электромагнитных замков и механических концевых выключателей позволяет достичь высокой надежности и эффективности при минимальных затратах.

На рис. 1 представлена усовершенствованная конструкция стеллажа для хранения тормозных башмаков, оснащенная RFID-считывателем, электромагнитным замком и концевыми датчиками, показывающими наличие или отсутствие башмака в стеллаже [9; 10].



**Рис. 1.** Предлагаемая конструкция модернизированного стеллажа  
**Fig. 1.** Proposed design of the modernized rack

Такая конструкция позволит учитывать наличие и отсутствие тормозных башмаков, контролировать изъятие или прием тормозных башмаков. На рабочем месте дежурного по станции возможно отображение состояния стеллажей и башмаков. Схема системы удаленного мониторинга, позволяющая контролировать состояние башмаков в режиме реального времени, может быть представлена в виде «окна» автоматизированной системы (рис. 2).

	1П		2П		3П
1	✓	7	✗	13	✗
2	✓	8	✗	14	✗
3	✓	9	✗	15	✗
4	✓	10	✗	16	✗
5	✓	11	✓	17	✗
6	✓	12	✓	18	✗

**Рис. 2.** Предлагаемое отображение стеллажей на каждом конкретном пути с учётом наличия в них башмаков на рабочем месте дежурного по железнодорожной станции

**Fig. 2.** Proposed display of racks on each specific route, taking into account the presence of shoes in them at the workplace of the railway station duty officer

Предлагаемая система автоматизации хранения и учета тормозных башмаков должна быть проанализирована на предмет возможных неисправностей и способов их предотвращения и устранения. С этой целью для выявления вида рисков, анализа вероятности их возникновения и возможных последствий была составлена карта рисков и предложены методы предотвращения (табл. ниже).

*Таблица.*

**Анализ рисков**  
Table. Risk analysis

Риск	Описание	Вероятность	Последствия	Методы предотвращения
Отказ RFID-считывателя	Возможен выход из строя из-за погоды или износа	Низкая	Невозможность авторизации сотрудников	Использование защищённых моделей, резервный доступ
Отключение электропитания	Потеря питания может привести к блокировке замков и потере контроля	Средняя	Стеллажи могут не открываться, система не работает	Использование блоков бесперебойного питания, возможность аварийного открытия с автоматизированного рабочего места дежурного по станции

Сбой электромагнитных замков	Замки могут не сработать из-за перегрева, влаги или поломки	Средняя	Доступ может быть заблокирован или неконтролируем	Установка защитных кожухов, регулярное техническое обслуживание
Сбой связи с ПК	Потеря связи между контроллером и ПК из-за сетевых проблем	Средняя	Логирирование операций может не работать	Резервный канал связи, автономная работа контроллеров
Кража или повреждение оборудования	Вандализм или кража компонентов системы	Средняя	Неисправность системы, финансовые потери	Физическая защита (металлические кожухи), видеонаблюдение
Ошибки сотрудников	Неправильное использование системы (утера карт, несанкционированный доступ)	Средняя	Потеря контроля над стеллажами	Инструктаж сотрудников, регистрация действий со стеллажом, замена карт браслетом
Выход из строя концевых выключателей	Поломка механики из-за частого использования или погодных условий	Высокая	Невозможность контролировать наличие башмаков	Использование качественных выключателей, плановая замена
Засорение механики концевых выключателей	Грязь, снег, лёд могут мешать срабатыванию	Высокая	Ложные срабатывания, ошибки в системе	Регулярное обслуживание, защитные кожухи

Для возможности реализации проекта в рамках настоящего исследования был также составлен SWOT-анализ, что позволило выявить сильные и слабые стороны, определиться с угрозами и возможностями (рис. 3).

Практическое применение возможно после тестирования предлагаемой системы. Эксперимент может быть проведен с целью проверки работоспособности разработанной системы автоматизированного хранения и контроля тормозных башмаков, а также оценки её надежности в реальных условиях эксплуатации.

Сильные стороны	Слабые стороны
Высокая надежность и безопасность системы	Необходимость в резервном питании
Упрощённый контроль и учёт	Необходимость технического обслуживания
Централизованный доступ через RFID	Требуется обучение персонала
Исключение случаев хищения	Риски ложных срабатываний датчиков
Мониторинг в реальном времени	
Возможности	Угрозы
Интеграция с другими системами безопасности	Вандализм
Расширение функционала за счет ПО	Влияние погодных условий на работу оборудования
Удалённое управление	Сопrotивление персонала (излишний контроль)
Интеграция с RFID-метками на самих башмаках	Киберугрозы

**Рис. 3.** SWOT-анализ проекта  
**Fig. 3.** SWOT analysis of the project

Эксперимент может включать в себя следующие этапы:

- монтаж системы: установка модернизированного стеллажа с интегрированными RFID-считывателями, электромагнитными замками и механическими концевыми выключателями;
- функциональные испытания: проверка корректности работы системы доступа, идентификации и фиксации наличия башмаков;
- испытания на устойчивость к внешним факторам: тестирование системы в условиях низких температур, высокой влажности и возможных механических воздействий;
- нагрузочные испытания: моделирование интенсивной эксплуатации системы с многократными циклами выдачи и возврата башмаков;
- тестирование удаленного мониторинга: проверка стабильности передачи данных на сервер и анализа работы системы в онлайн-режиме.

Оценить предлагаемый проект автоматизации операций с тормозными башмаками можно путем расчета интегрального показателя ка-

чества. Здесь возможна оценка через отношение показателей свойств к стоимости [11]. Однако для целей исследования подходит метод определения интегрального показателя как частного от деления суммарного полезного эффекта от автоматизации на затраты на производство, внедрение и функционирование предлагаемой системы:

$$I_{\text{авт.хр.}} = \frac{T_{\text{эк.}}}{Z_{\text{вн.}}},$$

где  $T_{\text{эк.}}$  – суммарный полезный эффект от эксплуатации (например, экономия трудозатрат);

$Z_{\text{вн.}}$  – затраты на производство, внедрение и функционирование предлагаемой системы.

Учитывая выше сказанное, стоит отметить, что анализ существующих решений показал: традиционные методы хранения башмаков недостаточно эффективны, так как не позволяют отслеживать их наличие в режиме реального времени и требуют значительных затрат времени на контроль. В отличие от них, предложенная система, основанная на RFID-идентификации, электромагнитных замках и механических концевых выключателях, позволяет автоматизировать процессы хранения, выдачи и возврата тормозных башмаков.

Автоматизация учета и контроля тормозных башмаков повысит качество технологических процессов и позволит улучшить функционал железнодорожной станции как объекта логистической цепи доставки грузов, например, в развитие методического аппарата, предложенного в работах [12-15].

В ходе исследования была разработана автоматизированная система хранения и контроля доступа к стеллажам, предназначенных для хранения тормозных башмаков, обеспечивающая их учет, защиту от несанкционированного использования и удаленный мониторинг. Внедрение данной системы позволит повысить безопасность эксплуатации тормозных башмаков, снизить вероятность их хищения и последующего несанкционированного применения, а также сократить временные затраты сотрудников на их учет и контроль.

### Список литературы

1. Покровская, О. Д. (2025). О логистике тяжеловесного движения. В кн.: *Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры): Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 21 ноября 2024 года* (с. 273–278). Москва: Государственный университет управления. EDN: <https://elibrary.ru/LVACME>
2. Паршин, П. К., & Никифорова, Г. И. (2024). Повышение безопасности движения и эффективности управления транспортно-логистическими процессами на железных дорогах. *Транспортное дело России*, (2), 254–256. EDN: <https://elibrary.ru/OUTXCH>
3. Мороз, Ю. А., & Никифорова, Г. И. (2024). Анализ клиентоориентированности как элемента антикризисного управления в сфере транспортно-логистических услуг. *Транспортное дело России*, (5), 78–80. EDN: <https://elibrary.ru/NWUJSA>
4. Паршин, П. К., Шевердова, М. В., & Марченко, М. А. (2024). Алгоритм проведения факторного анализа на железнодорожной станции. В кн.: *Логистика: современные тенденции развития: Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 04–05 апреля 2024 года* (с. 96–100). Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. EDN: <https://elibrary.ru/APMNHX>
5. Кузнецов, А. В., & Смирнов, И. П. (2021). Автоматизированные системы учёта и идентификации на железнодорожном транспорте. *Транспортные технологии*, (4), 35–42.
6. Иванов, П. С., & Петров, А. Н. (2020). Применение RFID-технологий в логистике и складских системах. *Вестник транспортной безопасности*, 8(2), 15–22.
7. Сидоров, М. В. (2019). *Контроль доступа и системы безопасности: теория и практика*. Москва: Транспорт, 256 с.
8. Беляев, В. Л. (2022). Надёжность электронных и механических систем безопасности в условиях низких температур. *Инженерные системы*, (3), 54–61.
9. Фёдоров, А. Е., & Захаров, Н. П. (2023). Технологии IoT для мониторинга объектов железнодорожного транспорта. *Журнал автоматизации и цифровых технологий*, (1), 78–85.
10. Иванкова, А. А., Роднева, Е. С., Худайберганов, С. К., & Никифорова, Г. И. (2024). Применение инструментов RFID при обеспечении безопасности на железнодорожном транспорте. В кн.: *Прогрессивные технологии в эксплуатации наземных транспортно-технологических комплексов и логистических*

- транспортных систем: Сборник трудов международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой 110-летию юбилею со дня рождения профессора Каракулева А. В., Санкт-Петербург, 26 февраля 2024 года* (с. 218–223). Казань: ООО «Бук». EDN: <https://elibrary.ru/DYGCQE>
11. Салимова, Т. А. (2001). *Теория и практика управления качеством*. Саранск: Издательство Мордовского университета, 172 с. ISBN: 5-7103-0618-5. EDN: <https://elibrary.ru/WGVDOD>
  12. Покровская, О. Д., Меликов, М. И., & Касьянов, И. В. (2023). Система управления экспортными грузопотоками на базе логистических принципов и информационных технологий. *Вестник транспорта*, (3), 18–26. EDN: <https://elibrary.ru/HYPCHP>
  13. Полиэктов, Д. А., & Покровская, О. Д. (2022). Цифровые технологии на сети железных дорог России. В кн.: *Управление эксплуатационной работой на транспорте: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 года* (с. 132–137). Под ред. А. Ю. Паньчева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС. EDN: <https://elibrary.ru/XJNGVW>
  14. Куренков, П. В., & Нехаев, М. А. (2012). Моделирование работы сортировочной станции в интеллектуальной системе управления перевозками. *Железнодорожный транспорт*, (9), 20–22. EDN: <https://elibrary.ru/PEMRKL>
  15. Мохоныко, В. П., Исаков, В. С., & Куренков, П. В. (2005). Система поддержки принятия экономически обоснованных решений. *Экономика железных дорог*, (1), 18. С. 18-26.

### References

1. Pokrovskaya, O. D. (2025). On the logistics of heavy-haul traffic. In: *Transport and logistics for sustainable development of territories, business, and the state (growth drivers, trends, and barriers): Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 21, 2024* (pp. 273–278). Moscow: State University of Management. EDN: <https://elibrary.ru/LVACME>
2. Parshin, P. K., & Nikiforova, G. I. (2024). Improving traffic safety and efficiency of transport and logistics process management on railways. *Transport Business of Russia*, (2), 254–256. EDN: <https://elibrary.ru/OUTXCH>
3. Moroz, Yu. A., & Nikiforova, G. I. (2024). Analysis of customer orientation as an element of crisis management in transport and logistics services. *Transport Business of Russia*, (5), 78–80. EDN: <https://elibrary.ru/NWUJSA>

4. Parshin, P. K., Sheverdova, M. V., & Marchenko, M. A. (2024). Algorithm for conducting factor analysis at a railway station. In: *Logistics: modern development trends: Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference, Saint Petersburg, April 04–05, 2024* (pp. 96–100). Saint Petersburg: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. EDN: <https://elibrary.ru/APMIHX>
5. Kuznetsov, A. V., & Smirnov, I. P. (2021). Automated accounting and identification systems in railway transport. *Transport Technologies*, (4), 35–42.
6. Ivanov, P. S., & Petrov, A. N. (2020). Application of RFID technologies in logistics and warehouse systems. *Bulletin of Transport Security*, 8(2), 15–22.
7. Sidorov, M. V. (2019). *Access control and security systems: theory and practice*. Moscow: Transport, 256 p.
8. Belyaev, V. L. (2022). Reliability of electronic and mechanical security systems under low-temperature conditions. *Engineering Systems*, (3), 54–61.
9. Fedorov, A. E., & Zakharov, N. P. (2023). IoT technologies for monitoring railway transport facilities. *Journal of Automation and Digital Technologies*, (1), 78–85.
10. Ivankova, A. A., Rodneva, E. S., Khudayberganov, S. K., & Nikiiforova, G. I. (2024). Application of RFID tools to ensure railway transport safety. In: *Advanced technologies in operation of ground transport and technological complexes and logistics transport systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates, and young scientists dedicated to the 110th anniversary of Professor A. V. Karakulev, Saint Petersburg, February 26, 2024* (pp. 218–223). Kazan: LLC “Buk”. EDN: <https://elibrary.ru/DYGCQE>
11. Salimova, T. A. (2001). *Theory and practice of quality management*. Saransk: Mor-dovia University Publishing House, 172 p. ISBN: 5-7103-0618-5. EDN: <https://elibrary.ru/WGVDOD>
12. Pokrovskaya, O. D., Melikov, M. I., & Kasyanov, I. V. (2023). Export cargo flow management system based on logistics principles and information technologies. *Bulletin of Transport*, (3), 18–26. EDN: <https://elibrary.ru/HYPCHP>
13. Poliektov, D. A., & Pokrovskaya, O. D. (2022). Digital technologies on the Russian railway network. In: *Operational management in transport: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Saint Petersburg, March 15–16, 2022* (pp. 132–137). Ed. by A. Yu. Panychev, T. S. Titova, O. D. Pokrovskaya. Saint Petersburg: FGBOU VO PGUPS. EDN: <https://elibrary.ru/XJNGVW>
14. Kurenkov, P. V., & Nekhaev, M. A. (2012). Modeling the operation of a marshalling yard in an intelligent transportation management system. *Railway Transport*, (9), 20–22. EDN: <https://elibrary.ru/PEMRKL>

15. Mokhonko, V. P., Isakov, V. S., & Kurenkov, P. V. (2005). System for supporting economically sound decision-making. *Economics of Railways*, (1), 18–26.

#### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Иванов Егор Константинович**, аспирант

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация  
novegor@yourvideographer.ru*

**Никифорова Гузель Ислямовна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация  
guzel.spb@mail.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Egor K. Ivanov**, Postgraduate Student

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation  
novegor@yourvideographer.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3093-1890>*

**Guzel Is. Nikiforova**, PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of Operational Management

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation  
guzel.spb@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4908-3225>*

Поступила 18.12.2025

После рецензирования 15.01.2026

Принята 01.02.2026

Received 18.12.2025

Revised 15.01.2026

Accepted 01.02.2026

## Эксплуатация автомобильного транспорта / Operation of Road Transport

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-419](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-419)

EDN: QNHITF

УДК 656.136



### Диагностика автомобильных двигателей с помощью вакуумметра

О.Ю. Гончаров

*Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального  
университета, Пятигорск, Российская Федерация*

#### **Аннотация**

**Обоснование.** Для диагностики технического состояния автомобильных двигателей активно применяются разные методы, но основные из них требуют сложного оборудования и высокой квалификации. Метод вакуумной диагностики, основанный на измерении разрежения во впускном коллекторе, представляет собой доступный и эффективный способ оценки состояния двигателя и вспомогательных систем.

**Цель** – исследовать возможности применения механического вакуумметра для диагностики технического состояния цилиндропоршневой группы, систем газораспределения, клапанов и других элементов двигателя различных конструкций.

**Материалы и методы.** В работе использован механический стрелочный вакуумметр для замеров разрежения в различных точках вакуумных систем бензиновых и дизельных двигателей. Проведен анализ динамики показаний прибора, моделирование неисправностей и сравнительный анализ с диагностикой компрессии, компьютерной диагностикой и осциллографическими методами.

**Результаты.** Методика показала высокую информативность для выявления подсосов воздуха, нарушений работы клапанов, фаз газораспределения, проблем зажигания и других неисправностей. Представлены практические рекомендации по интерпретации показаний вакуумметра и таблица эталонных значений разрежения для различных типов двигателей.

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт; двигатель; вакуум; вакуумметр; герметичность; магистраль; метод; надежность; привод; пневмокамера; разрежение; система

**Для цитирования.** Гончаров, О. Ю. (2026). Диагностика автомобильных двигателей с помощью вакуумметра. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 64–82. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-419>

## Car engine diagnostics using a vacuum gauge

**O.Yu. Goncharov**

*North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Institute (branch),  
Pyatigorsk, Russian Federation*

### **Abstract**

**Background.** Various methods are widely used in diagnosing the technical condition of automotive engines, but most require highly skilled personnel and sophisticated equipment. Vacuum diagnostics, based on measuring the vacuum in the intake manifold, is an accessible and effective way to assess the condition of the engine and auxiliary systems.

**Purpose.** To explore the potential of using a mechanical vacuum gauge to diagnose the technical condition of the cylinder-piston group, valve timing systems, valves, and other engine components of various designs.

**Materials and methods.** A mechanical pointer vacuum gauge was used in this study to measure the vacuum at various points in the vacuum systems of gasoline and diesel engines. The dynamics of the instrument readings were analyzed, faults were modeled, and a comparative analysis was conducted with compression diagnostics, computer diagnostics, and oscillographic methods.

**Results.** The method demonstrated high information yield for identifying air leaks, valve malfunctions, valve timing issues, ignition problems, and other faults. Practical recommendations for interpreting vacuum gauge readings and a table of reference vacuum values for various engine types are provided.

**Keywords:** automotive; engine; vacuum; vacuum gauge; leak tightness; line; method; reliability; drive; pneumatic chamber; depressurization; system

**For citation.** Goncharov, O. Yu. (2026). Car engine diagnostics using a vacuum gauge. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 64–82. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-419>

### **Введение**

Существует достаточно большое количество методов оценки технического состояния автомобильных двигателей. Для этого

применяется различная измерительная аппаратура с разной трудоемкостью методов, но из-за неоднозначных результатов основное количество методов требуют достаточно высокой квалификации мастера-диагноста. Для примера, измерение компрессии цилиндров дает достоверный результат. Существует несколько способов замеров компрессии на прогретом до рабочей температуры 90-95°C – с использованием вакуумметра, пневмотестера, компрессометра, датчиков давления-разряжения для осциллографа [1-4] или расходомера картерных газов. На СТО чаще всего проводится замер компрессии в двигателе компрессометром – как наиболее доступный, простой и эффективный способ [5; 6]. Сначала удаляются все свечи зажигания в цилиндрах бензинового двигателя (воздушная и дроссельная заслонка полностью открыты при этом) или удаляются все форсунки в дизельном двигателе, затем производится установка компрессометра. Одним компрессометром производится последовательно оценка компрессии каждого цилиндра, но для упрощения задачи требуется помощник при выполнении этой работы и много времени на диагностику. По значениям пульсаций тока стартера при прокручивании коленчатого вала в отсутствии подачи топлива или искры от свечей зажигания [7] более оперативно получают информацию о компрессионных свойствах цилиндров двигателя.

В дизельных двигателях, где топливо подается к топливному насосу высокого давления за счет разряжения, создаваемого подкачивающим насосом, диагностирование контура низкого давления происходит по замеру разряжения [6]. Как правило, вакуумметр подключается между насосом и фильтром. Если отсутствует разряжение, это указывает на неисправность насоса или негерметичность магистрали. Если разряжение повышено, то это говорит о загрязнении магистрали трубопроводов [8] или фильтра. Можно определить относительное разрежение, сравниваемое с аналогичной величиной, установленной для исправных двигателей при том же режиме работы, по показаниям вакуумметра. По результатам

регистрации кривой пульсирующего разрежения во впускном трубопроводе.<sup>1</sup> По амплитудным значениям кривой пульсирующего разрежения можно определить герметичность клапанов, что удобнее делать с помощью осциллографа, это подробно описано в работе [9]. По фазовым сдвигам определяется состояние привода механизма газораспределения. Безусловно, популярны современные методы оценки технического состояния ЦПГ, клапанов и стенок камер сгорания с помощью видеоэндоскопа, что требует дополнительного оборудования и вложений [10].

Хотя ссылки в литературе на метод диагностики по разрежению во впускном коллекторе присутствуют, и прибор общедоступен, практических значений, эталонных величин разрежения для разных конструкций двигателей недостаточно, необходимо искать данные в разных источниках, информация от заводов-изготовителей в специализированных справочных системах (например, Elsa Etka, AutoData, Mitchell OnDemand, Toyota TechDoc), также отсутствует. Это и обусловило написание данной работы по результатам практического опыта.

### **Основная часть**

В данной работе рассмотрим применение вакуумметра при диагностике состояния двигателей и вспомогательных систем двигателей, обобщим результаты собственных экспериментов и опыта других исследователей.

На рис. 1 показан общий вид механического стрелочного вакуумметра, который мы применяем при диагностике.

На основании полученных вакууметром данных мы можем узнать следующие неисправности и параметры:

- общее состояние цилиндропоршневой группы<sup>2</sup>;
- правильность регулировки системы питания;

---

<sup>1</sup> Ключев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. Технические средства диагностирования: Справочник М.: Машиностроение 1989, 672 с., С. 343.

<sup>2</sup> Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобилей. Теоретические основы: учеб пособие в 3-х томах. Т 2. Неисправности, параметры и средства диагностики. Харьков: «Майдан», 2014. С. 207.

- правильность регулировки системы зажигания;<sup>3</sup>
- проверка герметичности прокладок головки блока цилиндров;
- наличие залипших или прогоревших клапанов,
- проверка клапанных пружин на усталость;
- проверка системы выхлопа на целостность;
- правильность функционирования системы газораспределения агрегата.



**Рис. 1.** Общий вид вакуумметра  
**Fig. 1.** General view of the vacuum gauge

Данные, которые мы получаем в результате диагностики, сложно обработать диагностам, не владеющим большим опытом, и это может привести к ошибкам в итоге диагностики. Чаще всего диагностика с помощью вакуумметра объединяют вместе с проверкой угла опережения зажигания, компьютерной диагностикой двигателя<sup>4</sup>, проверкой компрессии двигателя.

При работе данным прибором мы рассматриваем его абсолютное показание и темп, с которым движется стрелка - динамика показаний вакуумметра. Шкала вакуумметра помечена зна-

<sup>3</sup> Вакуумная диагностика двигателя [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://carextra.ru/obzory/vakuumnaya-diagnostika-dvigatelya.html>

<sup>4</sup> Емелькин Г. А. Вдох – выдох // За рулем. 2002. № 4. С. 186-187.

чениями в миллиметрах ртутного столба и разделена. Если мы увеличим высоту на 300 метров относительно уровня моря, то соответственно показания прибора также увеличиваются на 25 единиц [11].

При диагностике прибор мы подсоединяем напрямую к впускному коллектору, также возможно подключение к любым другим точкам вакуумных магистралей для того, чтобы проверить правильность работы отдельных элементов систем двигателей или дополнительного оборудования. Необходимо чтобы колеса автомобиля должны быть заторможены стояночным тормозом, двигатель, прогретый до рабочей температуры, работал на холостом ходу. Согласно данным, которые мы получили опытным путем, для V-образных атмосферных бензиновых 6 цилиндровых двигателей разрежение должно быть около 450 миллиметров ртутного столба (60 Кпа), при этом показатели должны быть стабильны и стрелка вакуумметра не должна быть подвержена ощутимым колебаниям.

Если значение разрежения выдает данные значительно ниже 450 мм рт. ст., вероятнее всего это означает:

- отсутствует герметичность между дроссельной заслонкой и впускным коллектором;
- повреждение вакуумного шланга;
- подсос воздуха из-за того, что между элементами отсутствует плотность;
- момент хода клапанов не совпадает с моментом хода поршней, что означает нарушение фазы ГРМ;
- позднее зажигание.

Необходимо проверить зажигание с помощью стробоскопа, фазы ГРМ, снять осциллограммы датчиков распределительного вала и коленчатого вала, необходимо проверить метки валов. Если метки не совпадают, то нужно снять ремень или цепь ГРМ для того, чтобы выставить по меткам по инструкции к двигателю.

Если показания составляют 380-250 единиц и стрелка дергается, то нужно проверить прокладку впускного коллектора и форсунки – возможен подсос воздуха<sup>5</sup>.

Если мы замечаем периодическое отклонение стрелки до 400-300 мм рт. ст. – скорее всего клапана не полностью закрываются. Чтобы это проверить, следует измерить значение компрессии в двигателе.

Если показания прибора плавают в большом диапазоне, то нужно проверить прокладки дроссельного узла и коллектора, а также качество смеси, которая поступает в цилиндры.

Если при работе двигателя на холостых оборотах из выхлопной трубы идет синеватый дым и мы видим быстрое колебание стрелки в пределах 100 единиц, это означает, что существует проблема с сальниками клапанов [12] или направляющими клапанов. Для того, чтобы это проверить, необходимо провести испытания поршневой группы, накачав для этого воздух [13]. Если стрелка прибора быстро колеблется и увеличиваются обороты мотора, то необходимо проверить клапанные пружины на упругость и прокладку впускного коллектора. Но похожие признаки мы можем наблюдать, если имеются проблемы с зажиганием<sup>6</sup> или прогорел какой-то клапан ГРМ.

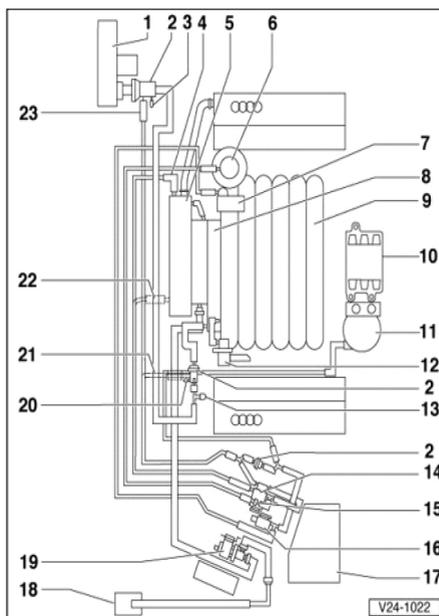
Если стрелка сильно дрожит, то необходимо проверить, герметична ли прокладка под ГБЦ и значение компрессии в поршневой. Возможно неработающий цилиндр является причиной.

Признаком неисправного зажигания является небольшое дрожание или колебание стрелки вакуумметра с интервалом в 25 мм. Нужно проверить угол опережения зажигания с помощью использования диагностического сканера или стробоскопа.

После этого нужно резко нажать на газ и после набора 2,5 тысяч оборотов отпустить педаль. Стрелка вакуумметра в таком случае упадет до нуля, потом поднимется, и должна превысить средние показания при холостом ходе около 120–130 единиц (до 580 мм рт. ст.), после этого медленно вернется на средний уровень.

<sup>5</sup> Береснев А.Л., Береснев М.А. Диагностика двигателя автомобиля. М.: Физматлит, 2011. 311 с.

<sup>6</sup> Справочник по диагностике неисправностей автомобиля. М.: Технар. 2015. 693 с.



**Рис. 2.** Вакуумная схема двигателя ААН 2.8 AUDI А6 С45:

1- Вакуумный усилитель тормозов; 2- Обратный клапан; 3- Штуцер подключения пневмоблокировки дифференциала; 4- Линия продувки клапана рециркуляции отработавших газов (EGR); 5- Воздушный ресивер; 6- Клапан рециркуляции отработавших газов (EGR); 7- Вакуумный клапан изменения геометрии впускного коллектора; 8- Корпус дроссельной заслонки; 9- Впускной коллектор; 10- Катушки зажигания; 11- Вакуумный ресивер клапана изменения геометрии впускного коллектора; 12- Регулятор давления топлива; 13- Т-образное соединение; 14- Электроклапан управления клапаном EGR; 15- Ограничитель; 16- Электроклапан управления геометрией впускного коллектора; 17- Воздушный фильтр; 18- Адсорбер (EVAP); 19- Клапан адсорбера; 20- Не задействованная линия; 21- Не задействованная линия; 22- Не задействованная линия; 23- Вакуумная магистраль к электроклапанам

**Fig. 2.** Vacuum system diagram for the AAN 2.8 engine in the Audi A6 C45:

1- Vacuum brake booster; 2- Check valve; 3- Connection fitting for the differential lock; 4- Exhaust gas recirculation (EGR) valve bleed line; 5- Air receiver; 6- Exhaust gas recirculation (EGR) valve; 7- Vacuum valve for variable intake manifold geometry; 8- Throttle body; 9- Intake manifold; 10- Ignition coils; 11- Intake manifold geometry control valve vacuum reservoir; 12- Fuel pressure regulator; 13- T-fitting; 14- EGR valve control solenoid; 15- Restrictor; 16- Intake manifold geometry control solenoid; 17- Air filter; 18- Adsorber (EVAP); 19- Adsorber valve; 20- Inactive line; 21- Inactive line; 22- Inactive line; 23- Vacuum line to solenoid valves

Если полученные показания отличаются от приведенных выше, вероятнее всего забился катализатор или износились поршневые кольца. В таком случае сначала нужно проверить выхлопную систему, отсоединив подвижную гофру или катализатор, и сделать замер без него [4].

Необходимо рассмотреть примеры вакуумных схем двигателей разных производителей (показаны на рис. 2, 3 и 4).<sup>7</sup> Для того, чтобы проверить величину разрежения в разных точках данных систем нужно использовать вакуумметр с набором переходников, их примеры конструкций показаны на рисунке 5.

В V-образном шестицилиндровом двигателе ААН 2.8 AUDI A6 C45 (рис. 2) проводилась проверка работы системы изменения геометрии впускного коллектора. Для этого проводился замер вакуума в точке 13 схемы на T-образном тройнике.

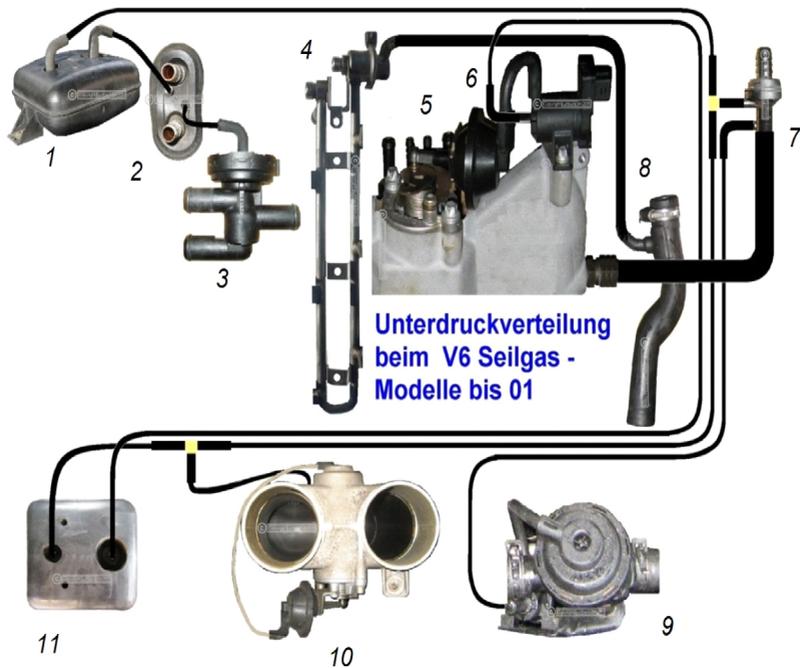
Система изменения геометрии впускного коллектора приводится в действие вакуумной мембраной 7, электроклапаном 16 на оборотах свыше 4200 об/мин. Таким образом вакуум на повышенных оборотах составил 500 мм.рт.ст., а при открытии электроклапана 16, срабатывании вакуумного клапана изменения геометрии впускного коллектора 7 до 450 мм.рт.ст. В данный момент видно, что заслонки системы изменения геометрии впускного коллектора поворачиваются относительно оси. Это указывает на исправную работу системы вакуумного управления двигателем, а также двигателя в целом.

Также было проведено моделирование неисправностей вакуумной системы [17]. При отключении вакуумного шланга от ресивера 11, разрежение снижалось до 370мм рт.ст. на холостом ходу, внутренний диаметр указанного шланга составляет 3 мм. При отключении вакуумной магистрали (внутренний диаметр 6 мм) от вакуумного усилителя тормозов в точке 2 наблюдался

---

<sup>7</sup> Audi 100 /A6 Сервисное обслуживание и эксплуатация. Диагностика с помощью вакуумметра. Проверка компрессии в цилиндрах [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://automn.ru/audi-100/audi-42714-10.m\\_id-2271.m\\_id2-5907.html](http://automn.ru/audi-100/audi-42714-10.m_id-2271.m_id2-5907.html)

трудный пуск двигателя, неустойчивый холостой ход и показания вакуумметра 120 мм рт.ст. что означает чрезвычайно большой подсос воздуха.

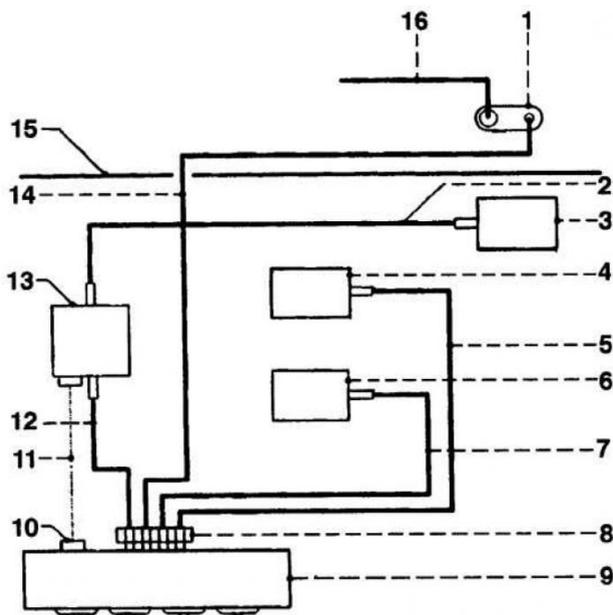


**Рис. 3.** Вакуумная схема двигателя X25XE автомобиля Opel Omega B:

1 – Вакуумный ресивер; 2 – перегородка моторного щита; 3 – вакуумный клапан отопителя салона; 4 – регулятор давления топлива; 5 – мембрана заднего клапана впускного коллектора; 6 – электроклапан впускного коллектора; 7 – обратный клапан вакуумного усилителя тормозов; 8 – шланг системы вентиляции картерных газов; 9 – мембрана клапана продувки катализатора; 10 – мембрана переднего клапана впускного коллектора (электроклапан не показан); 11 – дополнительный вакуумный ресивер (устанавливался не на все автомобили).

**Fig. 3.** Vacuum system diagram for the X25XE engine in the Opel Omega B:

1 – Vacuum reservoir; 2 – Engine compartment partition; 3 – Cabin heater vacuum valve; 4 – Fuel pressure regulator; 5 – Rear intake manifold valve diaphragm; 6 – Intake manifold solenoid valve; 7 – Vacuum brake booster check valve; 8 – Crankcase ventilation system hose; 9 – Catalytic converter purge valve diaphragm; 10 – front intake manifold valve diaphragm (solenoid valve not shown); 11 – auxiliary vacuum reservoir (not installed on all vehicles).



**Рис. 4.** Схема вакуумной системы управления обогревом и вентиляцией автомобиля Opel Omega B (все двигатели).

1 – Вакуумный резервуар; 2 – Синий вакуумный шланг; 3 – Вакуумный блок, клапан рециркуляции воздуха – Отсоедините кабельные разъемы, сжав, снимите петли крепления и удалите проводку от лицевого панели – Открепите и удалите воздухопроводы; 4 – Вакуумный блок, клапан лобового стекла; 5 – Коричневый вакуумный шланг; 6 – Вакуумный блок, клапан воздуха к ногам; 7 – Зеленый вакуумный шланг; 8 – Коллектор вакуумных шлангов; 9 – Управление отопителем; 10 – Выключатель рециркуляции воздуха; 11 – Проводка соленоидов клапанов, клапан рециркуляции воздуха; 12 – Синий вакуумный шланг; 13 – Соленоид клапана, клапан рециркуляции воздуха; 14 – Желтый вакуумный шланг; 15 – Перегородка моторного отсека; 16 – Шланг снабжений вакуумом.

**Fig. 4.** Schematic of the vacuum-controlled heating and ventilation system for the Opel Omega B (all engines).

1 – Vacuum reservoir; 2 – Blue vacuum hose; 3 – Vacuum manifold, air recirculation valve – Disconnect the cable connectors, squeeze them, remove the retaining clips, and remove the wiring from the dashboard – Unclip and remove the air ducts; 4 – Vacuum unit, windshield valve; 5 – Brown vacuum hose; 6 – Vacuum unit, footwell air valve; 7 – Green vacuum hose; 8 – Vacuum hose manifold; 9 – Heater control; 10 – Air recirculation switch; 11 – Solenoid valve wiring, air recirculation valve; 12 – Blue vacuum hose; 13 – Solenoid valve, air recirculation valve; 14 – Yellow vacuum hose; 15 – Engine compartment partition; 16 – Vacuum supply hose.



Вакуум в точке 4 составил 430 мм.рт.ст – это говорит о работе регулятора давления топлива и системы вентиляции картерных газов. При повышении оборотов происходило изменение значения вакуума от 300 до 500 мм.рт.ст. – также как и в точке 7 (рисунок 2)

Вакуум в точке 10 (передний клапан системы изменения длины впускного коллектора) отсутствовал, таким образом было выявлена неправильная работа системы изменения геометрии впускного коллектора в части режимов.

При диагностике системы управления отопителем и вентиляции салона проводилась проверка работы системы рециркуляции. Вакуум в точке 3 (рисунок 4) составил 410 мм.рт.ст. при включении режима рециркуляции воздуха, это говорит об исправности блока управления отопителем и электроклапана. Так как шток вакуумного клапана не перемещался и не перемещалась заслонка – был сделан вывод о порванной мембране клапана, клапан впоследствии заменен и система стала работать исправно.

Для сравнения с указанными V-образными моторами было проведено исследование зависимости разряжения во впускном коллекторе от различных неисправностей у рядного четырехцилиндрового двигателя ЗМЗ-406 объемом 2,3 литра. При работе исправного двигателя на холостом ходу разряжение в точке подключения вакуумного усилителя тормозов составляет 520 мм рт. ст (69,3 Кпа), при подсосе воздуха через систему адсорбера (сечение шланга 3 мм, площадь отверстия  $7\text{мм}^2$ ) разряжение на холостом ходу падало до 250 мм рт. ст. наблюдалась вибрация двигателя. Также моделировался незначительный подсос воздуха (при негерметичном соединении) порядка 3 мм<sup>2</sup> площадь сечения пробоины – наблюдалось разряжение 320-330 мм рт.ст. При имитации отказа системы зажигания одного цилиндра (отключение высоковольтного провода) – наблюдались колебания стрелки порядка 35 мм рт.ст. При имитации снижения компрессии в одном цилиндре на было замечено колебание стрелки вакуумметра на 100мм рт.ст.

При наличии датчика разряжения и минимум двухканального осциллографа можно провести анализ правильности установ-

ки фаз ГРМ, оценить исправность гидрокомпенсаторов клапанов. Подробно данные изложены в работе [9].

### Заключение

На данных примерах можно сделать вывод о том, что однозначные показатели метода вакуумной диагностики вспомогательных систем двигателей, которые связаны вакуумными трубками с вакуумным насосом или впускным коллектором – система изменения геометрии впускного коллектора, механический привод турбины, вакуумные краны отопителя, регулятор давления топлива, системы вентиляции картера.

Таблица 1.

**Значения разрежения во впускном коллекторе при возможных неисправностях атмосферных бензиновых двигателей, мм рт. ст.**

Table 1. Intake manifold vacuum values for possible malfunctions in naturally aspirated gasoline engines, mmHg

Неисправность	Рядный двигатель 4цил.	V-образный бцил.
Исправное состояние	520 - 500	460-440
Небольшой подсос воздуха (площадь отверстия 3 мм <sup>2</sup> )	320	370
Сильный подсос воздуха (площадь отверстия 7 мм <sup>2</sup> )	250 Наблюдается вибрация	120 Трудный пуск, неустойчивая работа
Отказ свечи зажигания или пробой высоковольтного провода	Колебания стрелки амплитудой 35 мм рт.ст.	Колебания стрелки амплитудой 25 мм рт.ст.
Снижение компрессии в одном цилиндре	Колебания стрелки амплитудой 100 мм рт.ст.	Колебания стрелки амплитудой 70 мм рт.ст.
Неисправность поршневых колец (снижение компрессии во всех цилиндрах)	При снижении оборотов с повышенных наблюдается снижение разрежения до 400 мм.рт.ст.	При снижении оборотов с повышенных не наблюдается увеличение разрежения до 550-580мм.рт.ст
Прогорел выпускной клапан	Колебание стрелки 80-120 мм рт.ст.	Колебание стрелки 70-100 мм рт.ст.
Неплотное закрытие впускного клапана	Колебание стрелки 70-100 мм рт.ст.	Колебание стрелки 50-70 мм рт.ст.

По итогам проделанной практической работы есть основания говорить о состоятельности предлагаемой методики диагностики автомобильных двигателей с помощью вакуумметра. Плюс данного метода в недорогом приборе и небольшой трудоемкости работ. Безусловно, при глубокой диагностике или неоднозначности показателей данного метода при проверке состояния ЦПГ и ГРМ могут потребоваться дополнительные проверка компрессии двигателя, компьютерной диагностикой двигателя, применение осциллографа с рядом датчиков.

По абсолютным значениям разряжения во впускном коллекторе можно сделать выводы о возможных неисправностях атмосферных двигателей различных конструкций – данные обобщены в таблице 1.

#### **Список литературы**

1. Гребенников, А. С. (2002). *Диагностирование автотракторных двигателей динамическим методом*. Саратов: Саратовский государственный технический университет. 196 с.
2. Корчагин, В. А., Ризаева, Ю. Н., Горбань, М. В., & Гончаров, О. Ю. (2013). Сравнительная оценка уровня экологической опасности автотранспортных средств. В: А. Н. Новиков (Ред.), *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: материалы 3-й Международной научно-практической конференции* (с. 261–265). EDN: <https://elibrary.ru/UNGVRH>
3. Сулейманова, З. Ф., & Гужин, И. Н. (2021). Современное оборудование для диагностики автомобилей. В: *Проблемы технического сервиса в АПК: сборник научных трудов* (с. 302–306). Кинель: Издательский центр Самарского ГАУ. EDN: <https://elibrary.ru/APPTNY>
4. Рытиков, Д. С., & Юхин, И. А. (2017). Диагностика цилиндропоршневой группы дизельных и газовых двигателей автобусов. *Новая наука: стратегии и векторы развития*, 2(2), 144–151. EDN: <https://elibrary.ru/XVGYZZ>
5. Гребенников, С. А., Гребенников, А. С., Киселев, Г. О., Рогожин, А. В., & Усов, А. Н. (2020). Методология бестормозного диагностирования кривошипно-шатунного механизма ДВС. *Техническое регулирование в транспортном строительстве*, (3/42), 147–155. EDN: <https://elibrary.ru/XBHUII>
6. Лемешева, Е. В., Митин, С. С., & Кондрико, А. Ю. (2015). Анализ известных способов диагностирования двигателей внутреннего сгорания. *Альтернатив-*

- ные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования, 2(2), 445–449. <https://doi.org/10.12737/19307>. EDN: <https://elibrary.ru/LVSBZX>
7. Крашенинников, С. В. (2013). Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания. *Вестник Новосибирского государственного педагогического университета*, (2/12), 59–68. EDN: <https://elibrary.ru/PYVTPZ>
  8. Дрожневский, А. Г., Вандакурова, А. С., & Курносов, А. Ф. (2018). Анализ современных методов диагностирования цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. В: *Материалы X региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой памяти доцента М. А. Анфиногенова* (с. 88–91). Новосибирский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/YPKELR>
  9. Бабошин, А. А., Косарев, А. С., & Малышев, В. С. (2013). Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по давлению во впускном и выпускном коллекторах. *Вестник МГТУ*, 16(1), 23–32. EDN: <https://elibrary.ru/RHMBMF>
  10. Медведева, Е. В., Каледа, В. Н., & Каледа, И. А. (2022). Методы и приборы для диагностирования цилиндропоршневой группы ДВС. В: *Транспорт. Экономика. Социальная сфера (актуальные проблемы и их решения): сборник статей IX Международной научно-практической конференции* (с. 156–161). Пенза. EDN: <https://elibrary.ru/RZJWAS>
  11. Морозов, А. А., Гужин, И. Н., & Толокнова, А. Н. (2021). Современные методы диагностирования автомобилей. В: *Проблемы технического сервиса в АПК: сборник научных трудов* (с. 369–371). Кинель: Издательский центр Самарского ГАУ. EDN: <https://elibrary.ru/YSNXIZ>
  12. Бойков, А. Ю. (2008). *Повышение информативности компрессионно-вакуумного метода диагностирования цилиндропоршневой группы автотракторных ДВС* (Автореферат кандидатской диссертации, Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина). 16 с. EDN: <https://elibrary.ru/NQDSVN>
  13. Халиуллин, Ф. Х., Ахметзянов, И. Р., Шириязданов, Р. Р., & Халиуллин, А. Ф. (2016). *Прибор для диагностики двигателя внутреннего сгорания по переходным характеристикам* (Патент RU 160474 U1). EDN: <https://elibrary.ru/VXVNSR>
  14. Обозов, А. А., & Таричко, В. И. (2012). Развитие методов и систем технического диагностирования ДВС. *Двигателестроение*, (4/250), 30–34. EDN: <https://elibrary.ru/PNPXZX>

15. Sklyarov, M., & Yarita, O. (2010). Theoretical research of vacuum strengtheners of one chamber motor-car brakes. *Автомобильный транспорт (Харьков)*, (26), 12–16. EDN: <https://elibrary.ru/NDWZZL>
16. Сазонов, Д. С., Журавлева, Е. А., & Гордеев, И. Е. (2022). Технические средства диагностирования топливной системы Commonrail. В: *Проблемы технического сервиса в АПК: сборник научных трудов* (с. 49–52). Кинель: Издательский центр Самарского ГАУ. EDN: <https://elibrary.ru/QORACA>
17. Шкилев, Д. А., Семькина, А. С., & Загородний, Н. А. (2018). Способы определения технического состояния вакуумного усилителя тормозов. *Современные материалы, техника и технологии*, (2/17), 123–128. EDN: <https://elibrary.ru/UPLJGI>

### References

1. Grebennikov, A. S. (2002). *Diagnostics of automotive and tractor engines using the dynamic method*. Saratov: Saratov State Technical University. 196 p.
2. Korchagin, V. A., Rizaeva, Yu. N., Gorban, M. V., & Goncharov, O. Yu. (2013). Comparative assessment of the environmental hazard level of motor vehicles. In A. N. Novikov (Ed.), *Current issues of innovative development of the transport complex: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference* (pp. 261–265). EDN: <https://elibrary.ru/UNGVRH>
3. Suleymanova, Z. F., & Guzhin, I. N. (2021). Modern equipment for vehicle diagnostics. In *Problems of technical service in the agro-industrial complex: Collection of scientific papers* (pp. 302–306). Kinel: Publishing Center of Samara State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/APPTHY>
4. Rytikov, D. S., & Yukhin, I. A. (2017). Diagnostics of the cylinder-piston group of diesel and gas engines in buses. *New Science: Strategies and Development Vectors*, 2(2), 144–151. EDN: <https://elibrary.ru/XVGYZZ>
5. Grebennikov, S. A., Grebennikov, A. S., Kiselev, G. O., Rogozhin, A. V., & Usov, A. N. (2020). Methodology of brake-free diagnostics of the crank mechanism of internal combustion engines. *Technical Regulation in Transport Construction*, (3/42), 147–155. EDN: <https://elibrary.ru/XBHUII>
6. Lemesheva, E. V., Mitin, S. S., & Kondriko, A. Yu. (2015). Analysis of known methods for diagnosing internal combustion engines. *Alternative Energy Sources in the Transport and Technology Complex: Problems and Prospects of Rational Use*, 2(2), 445–449. <https://doi.org/10.12737/19307>. EDN: <https://elibrary.ru/LVSBZX>
7. Krashennnikov, S. V. (2013). Modern approaches to diagnosing diesel internal combustion engines. *Bulletin of Novosibirsk State Pedagogical University*, (2/12), 59–68. EDN: <https://elibrary.ru/PYVTPZ>

8. Drozhnevsky, A. G., Vandakurova, A. S., & Kurnosov, A. F. (2018). Analysis of modern methods for diagnosing the cylinder-piston group of an internal combustion engine. In *Proceedings of the 10th Regional Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Researchers, dedicated to the memory of Associate Professor M. A. Anfinogenov* (pp. 88–91). Novosibirsk State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/YPKELR>
9. Baboshin, A. A., Kosarev, A. S., & Malyshev, V. S. (2013). Assessment of the technical condition of internal combustion engines based on pressure in the intake and exhaust manifolds. *Bulletin of MSTU*, 16(1), 23–32. EDN: <https://elibrary.ru/RHMBMF>
10. Medvedeva, E. V., Kaleda, V. N., & Kaleda, I. A. (2022). Methods and instruments for diagnosing the cylinder-piston group of internal combustion engines. In *Transport. Economy. Social sphere (urgent problems and their solutions): Collection of papers from the 9th International Scientific and Practical Conference* (pp. 156–161). Penza. EDN: <https://elibrary.ru/RZJWAS>
11. Morozov, A. A., Guzhin, I. N., & Toloknova, A. N. (2021). Modern methods of vehicle diagnostics. In *Problems of technical service in the agro-industrial complex: Collection of scientific papers* (pp. 369–371). Kinel: Publishing Center of Samara State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/YSNXIZ>
12. Boykov, A. Yu. (2008). *Improving the informativeness of the compression-vacuum method for diagnosing the cylinder-piston group of automotive and tractor internal combustion engines* (PhD thesis abstract, Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin). 16 p. EDN: <https://elibrary.ru/NQDSVN>
13. Khaliullin, F. Kh., Akhmetzyanov, I. R., Shiriyazdanov, R. R., & Khaliullin, A. F. (2016). *Device for diagnosing an internal combustion engine based on transient characteristics* (Patent RU 160474 U1). EDN: <https://elibrary.ru/VXVNSR>
14. Obozov, A. A., & Tarichko, V. I. (2012). Development of methods and systems for technical diagnostics of internal combustion engines. *Engine Building*, (4/250), 30–34. EDN: <https://elibrary.ru/PNPXZX>
15. Sklyarov, M., & Yarita, O. (2010). Theoretical research of vacuum strengtheners of one-chamber motor car brakes. *Avtomobilnyy Transport (Kharkov)*, (26), 12–16. EDN: <https://elibrary.ru/NDWZZL>
16. Sazonov, D. S., Zhuravleva, E. A., & Gordeev, I. E. (2022). Technical means for diagnosing the Common Rail fuel system. In *Problems of technical service in the agro-industrial complex: Collection of scientific papers* (pp. 49–52). Kinel: Publishing Center of Samara State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/QORACA>
17. Shkilev, D. A., Semykina, A. S., & Zagorodniy, N. A. (2018). Methods for determining the technical condition of a vacuum brake booster. *Modern Materials, Equipment, and Technologies*, (2/17), 123–128. EDN: <https://elibrary.ru/UPLJGI>

**ДАнные ОБ АВТОРЕ****Гончаров Олег Юрьевич**, преподаватель колледжа*Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета**ул. Московская, 31, г. Пятигорск, Российская Федерация**smart30001@yandex.ru***DATA ABOUT THE AUTHOR****Oleg Yu. Goncharov**, College Lecturer*North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Institute (branch)**31, Moskovskaya Str., Pyatigorsk, Russian Federation**smart30001@yandex.ru*

Поступила 19.12.2025

После рецензирования 25.02.2026

Принята 01.03.2026

Received 19.12.2025

Revised 25.02.2026

Accepted 01.03.2026

## Эксплуатация автомобильного транспорта / Operation of Road Transport

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-398](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-398)

EDN: AICXYP

УДК 631.372



### Исследование влияния интеграции механизма Уатта в роли стабилизатора в тракторомобиль сельского назначения

Ю.В. Жилин, В.Н. Сидоров

*КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация*

#### **Аннотация**

**Обоснование.** Статья посвящена изучению динамики механизма Уатта в качестве устройства стабилизации подвески колесной машины на базе экспериментальной модели легкового мобильного малогабаритного транспортного средства НАМИ-2339. Ключевая проблема при проектировании независимых подвесок – минимизация нежелательных паразитных перемещений колеса в горизонтальной плоскости (изменение колеи, схождения, продольного перемещения) при его вертикальном ходе. В качестве альтернативы предлагается кинематическая схема, основанная на параллелограммном механизме Уатта (известном как механизм для воспроизведения приближенно прямолинейного движения).

**Цель** – получение результатов исследования под воздействием возникающих сил и усилий в результате работы подвески.

**Методология.** Исследования движения механизма Уатта проводились в среде SolidWorks Motion.

**Результаты.** Получены зависимости перемещения центра масс основных элементов механизма и их числовые параметры под воздействием приложенных сил.

**Область применения результатов.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке и производстве колесных машин.

**Ключевые слова:** автомобиль; механизм; исследование; гармоническое колебание

**Для цитирования.** Жилин, Ю. В., & Сидоров, В. Н. (2026). Исследование влияния интеграции механизма Уатта в роли стабилизатора в тракторомобиль сельского назначения.

мобиль сельского назначения. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 83–95. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-398>

## Study of the impact of integrating the Watt linkage as a stabilizer in an agricultural tractor-vehicle

Yu.V. Zhilin, V.N. Sidorov

*Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch),  
Kaluga, Russian Federation*

### *Abstract*

**Background.** The article is devoted to the study of the dynamics of the Watt mechanism as a suspension stabilization device for a wheeled vehicle based on an experimental model of a passenger mobile small-sized vehicle NAMI-2339. The key problem in the design of independent suspensions is the minimization of undesirable parasitic movements of the wheel in the horizontal plane (track change, convergence, longitudinal displacement) during its vertical course. As an alternative, a kinematic scheme based on the Watt parallelogram mechanism (known as a mechanism for reproducing approximately rectilinear motion) is proposed.

**Purpose.** To obtain results under the influence of emerging forces and efforts as a result of suspension operation.

**Methodology.** Studies of the movement of the Watt mechanism were conducted in the SolidWorks Motion environment.

**Results.** The dependences of the displacement of the center of mass of the main elements of the mechanism and their numerical parameters under the influence of applied forces are obtained.

**Practical implications.** The results can be used in the development and production of wheeled vehicles.

**Keywords:** vehicle; mechanism; study; harmonic oscillation

**For citation.** Zhilin, Yu. V., & Sidorov, V. N. (2026). Study of the impact of integrating the Watt linkage as a stabilizer in an agricultural tractor-vehicle. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 83–95. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-398>

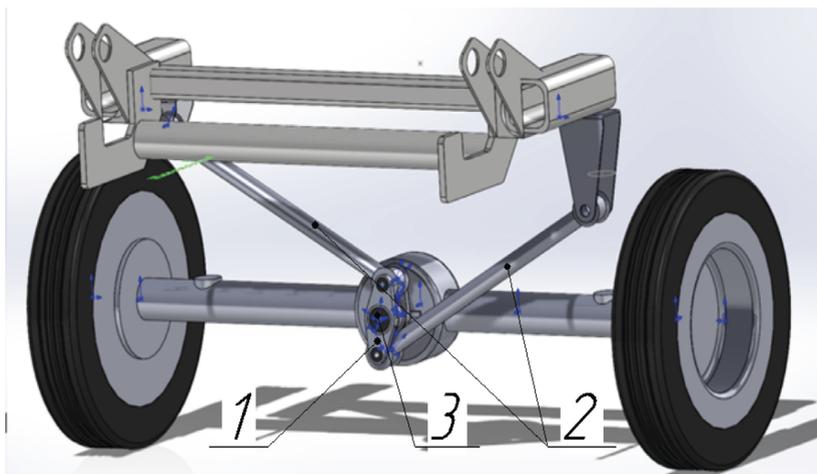
### **Введение**

Механизм Уатта – это плоский шарнирный механизм с двумя степенями свободы, состоящий из трех жестких звеньев, соединен-

ных между собой и с основанием (стойкой) четырьмя вращательными кинематическими парами пятого класса, предназначенный для приближенного воспроизведения прямолинейного движения заданной точки (точки Уатта) на его центральном звене [1; 2].

Основная задача данного механизма – обеспечить строго вертикальное (или близкое к заданному) перемещение центра заднего моста (или неразрезной балки) относительно кузова при работе подвески, минимизируя боковые смещения [3]. Он создает приближенно прямолинейную траекторию центра моста, сводя паразитные боковые перемещения к минимуму.

Механизм состоит из трех жестких звеньев [4], соединенных шарнирными связями (Рис. 1).



**Рис. 1.** 3D Модель подвески с механизмом Уатта  
1 – центральное звено; 2 – два боковых рычага; 3 – шарнир

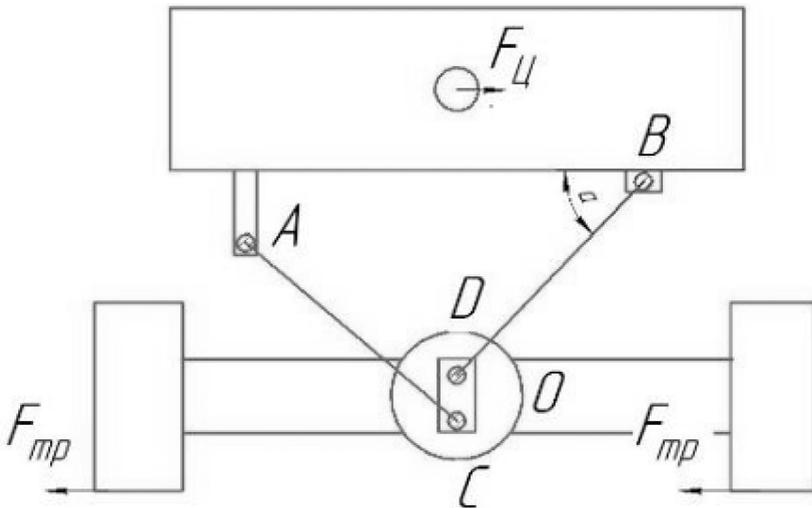
**Fig. 1.** 3D model of a suspension with a Watt mechanism  
1 – central link; 2 – two side links; 3 – hinge

Центральное (вертикальное) звено (Center Link / Floating Link) - это жесткая тяга, шарнирно соединенная с серединой оси моста, которая является контрольной точкой (tracing point траекторию которой необходимо обеспечить вертикальной [5]).

Два боковых рычага (Lateral Links / Watt's Arms) имеют равную длину. Рычаги расположены горизонтально или под небольшим углом. Один конец каждого рычага шарнирно закреплен на кузове (chassis). Вторые концы рычагов шарнирно соединены с верхним или нижним концом центрального звена. Два боковых рычага и линия, соединяющая их точки крепления к кузову, образуют воображаемую равнобедренную трапецию. Центральное звено движется внутри этого треугольника (Рис. 2) [6; 7].

### Материалы и методы

Все шарнирные соединения сферические (шаровые опоры) или резинометаллические сайлент-блоки, позволяющие звеньям вращаться в плоскости механизма и компенсировать небольшие перекосы [8; 9].



**Рис. 2.** Кинематическая схема механизма Уатта

$F_{ц}$  – центробежная сила, действующая в центре масс;  $F_{тр}$  – сила трения, удерживает шины на дороге;  $\alpha$  – угол наклона тяг

**Fig. 2.** Kinematic diagram of Watt's mechanism

$F_{ц}$  – centrifugal force acting at the center of mass;  $F_{тр}$  – frictional force keeping the tires on the road;  $\alpha$  – angle of inclination of the tie rods

Механизм Уатта является приближенной реализацией прямолинейно-направляющего механизма Чебышева. Траектория контрольной точки описывается кривой, близкой к лемнискате (figure-eight), но на рабочем участке хода подвески ( $\sim \pm 50-70$  мм) ее отклонение от вертикали составляет миллиметры [10].

При сжатии тяги АС кузов в точке А поднимается под действием силы  $F1$ :

$$F1 = \frac{1}{2} \cdot F_{\psi} \cdot \sin(\varphi).$$

где  $\varphi$  – угол крена кузова автомобиля.

При растягивании тяги ВD кузов в точке В прижимается с такой же силой. Возникает довольно большой момент крена, равный:

$$M_{кр} = F_{\psi} \cdot CO.$$

При этом добавляется момент:

$$M = \frac{1}{2} AB \cdot F_{\psi} \cdot \sin(\alpha).$$

За счет этого тяга СВ сжимается и поднимает кузов в т. О. Тяга AD разжимается и поднимает левое колесо под действием силы  $F2$ :

$$F2 = \frac{1}{2} \cdot F_{\psi} \cdot \sin(\alpha).$$

После превышения силы тяжести левого колеса, сила  $F2$  будет прижимать кузов в т. О, но в это же время с такой же силой тяга ОВ будет поднимать его, минимизируя крен кузова [11; 12].

Используя технические характеристики транспортного средства НАМИ-2339, было произведено исследование в среде SolidWorks ситуации наезда колеса на неровность дорожного покрытия. Изначально была спроектирована кинематическая схема в 3D в среде SolidWorks, к которой были приложены нагрузки, соответствующие массам моста и подрессоренной части [13-15].

Демпферы и пружины были созданы функциями доступными в дополнении SolidWorks Motion, которые соответствуют техническим характеристикам реального амортизатора и упругого элемента [16-18]. Используя функцию “Пружина” было проведено

исследование упругого элемента подвески. Ход упругого элемента составил 200 мм, а угол закручивания центрального звена –  $68^\circ$ .

Анализ является статическим без учета динамического воздействия на подвеску транспортного средства, так же не были учтены степень износа и повреждения элементов (исследования проводилось в идеальной среде, имитируя вибростенд) [19; 20]. В ходе исследования были получены значения поступательного момента  $\pm 10\text{кН/м}$  и амплитуды продольных колебаний рамы автомобиля.

### Результаты

Под воздействие гармонического нагружения подвески (учитываются боковые силы и вертикальная нагрузка на одно колесо) [20, 21] были получены следующие эпюры (Рис. 3 – 6).

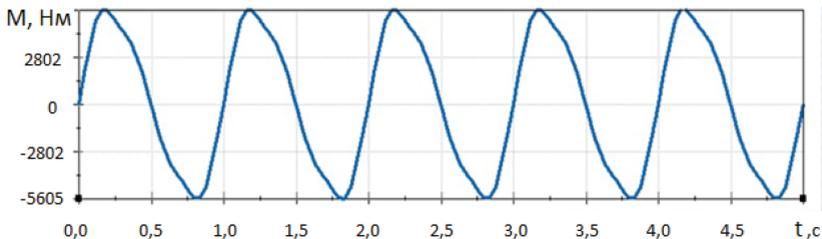


Рис. 3. Эпюра гармонического поступательного момента  
Fig. 3. Diagram of harmonic torque

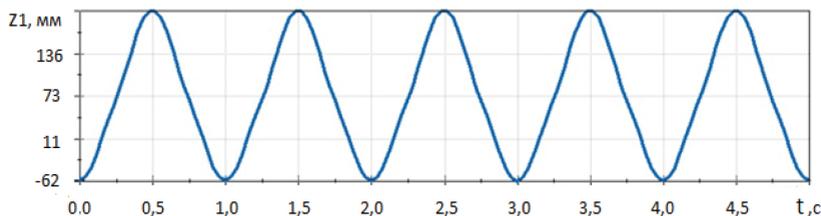
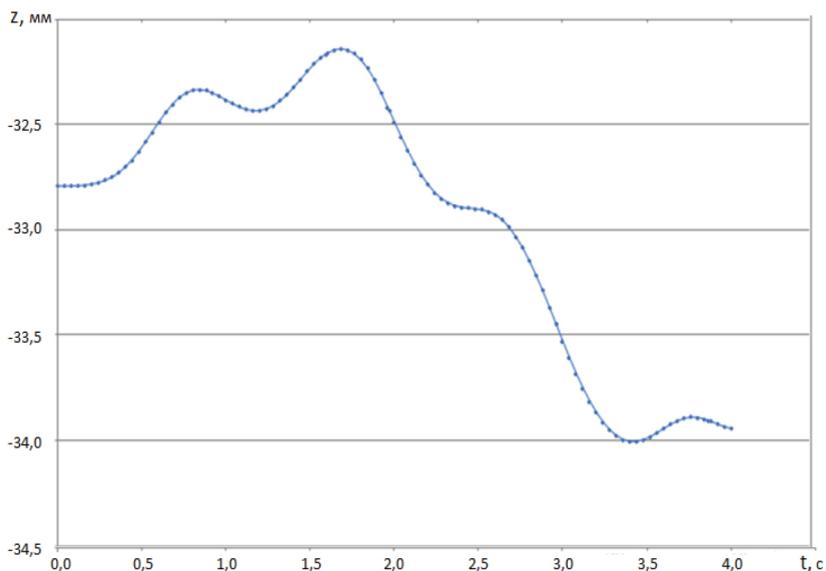


Рис. 4. Эпюра вертикального хода амортизатора  
Fig. 4. Diagram of the shock absorber's vertical travel

Анализируя график поступательного момента, можно отметить, что подвески подвергается гармоническому воздействию с

амплитудой момента равной 5605 Нм и периодом равным 1 с, который совпадает с периодом вертикальных колебаний амортизатора (рис.4). Амплитуда вертикальных колебаний амортизатора составила 89 мм.

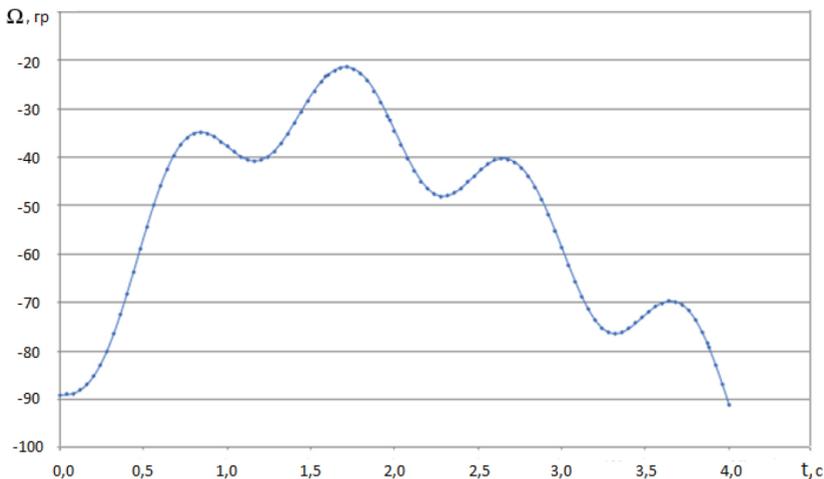
Анализируя график вертикального перемещения центра масс рамы колесной машины, можно отметить, что при вертикальном колебании амортизатора с амплитудой равной 89 мм, максимальное колебание центра масс рамы составило всего 2 мм. Это свидетельствует о положительном влиянии интегрированного механизма на стабилизацию вертикальных колебаний центра масс рамы.



**Рис. 5.** Эпюра вертикального перемещения центра масс рамы КМ

**Fig. 5.** Diagram of the vertical displacement of the center of mass of the KM frame

Из графика угла закручивания центрального звена (рис.6) можно отметить, что центральное звено делает оборот равный  $70^\circ$ . Это обеспечивает практически стабильное положение центра масс рамы в вертикальной плоскости.



**Рис. 6.** Эпюра угла закручивания центрального звена при заданной нагрузке  
**Fig. 6.** Diagram of the twist angle of the center link under a given load

## Выводы

1. Динамические исследования показали, что при гармоническом воздействии, вызывающем вертикальный ход амортизатора с амплитудой – 89 мм вертикальное перемещение центра масс моста составляет всего 2 мм за счет закручивания центрального звена на угол до  $70^\circ$ .

2. Применение интегрированного механизма в подвеске заднего моста тракторомобиля в качестве стабилизирующего устройства позволит снизить вертикальные колебания центра масс рамы.

## Список литературы

1. Гольд, Б. В. (1959). *Конструкция и расчёт автомобиля. Т. 1: Шасси*. Москва: Машгиз. 487 с.
2. Резников, Н. А. (1988). *Автомобильные подвески. Конструкция и расчёт*. Москва: Машиностроение. 143 с.
3. Синицкий, С. А., Хафизов, К. А., Нурмиев, А. А., Хафизов, Р. Н., Медведев, В. М., & Лушнов, М. А. (2019). *Учебное пособие по дисциплине «Конструкция автомобилей и тракторов»* [Электронный ресурс]. Получено из электронно-библиотечной системы «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/202586>. ISBN: 978-5-7043-4751-9

4. Поливаев, О. И., Костиков, О. М., Ворохобин, А. В., & Ведринский, О. С. (2022). *Конструкция тракторов и автомобилей: учебное пособие* [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: Лань. Получено из электронно-библиотечной системы «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/211322>. ISBN: 978-5-8114-1442-0. EDN: <https://elibrary.ru/MMZOSQ>
5. Болтинский, В. Н., & Панов, Ю. В. (1973). *Теория и конструкция автомобиля: учебник для вузов* (2-е изд., перераб. и доп.). Москва: Машиностроение. 488 с.
6. Кутьков, Г. М. (2014). *Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства*. Москва: Инфа-М. 506 с.
7. Волков, Е. В. (2022). *Теория эксплуатационных свойств автомобиля: учебник для вузов* [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: Лань. Получено из электронно-библиотечной системы «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/197455>. ISBN: 978-5-8114-8745-X
8. Афанасьев, Б. А., Жеглов, Л. Ф., & Крохин, Н. А. (1976). *Конструкция. Основы теории и расчёта автомобиля: учебное пособие для вузов*. Москва: Машиностроение. 350 с.
9. Полунгян, А. А. (2003). Математическая модель динамики трансмиссии колёсной машины при движении по твёрдой неровной дороге. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, (4), 15–25.
10. Вайсман, В. М. (1984). Исследование кинематики направляющего механизма Уатта автомобильной подвески. *Автомобильная промышленность*, (7), 12–14.
11. Хачатуров, А. А., Афанасьев, В. Л., Васильев, В. С., и др. (1976). *Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель*. Москва: Машиностроение. 535 с.
12. Певзнер, Я. М., Гридасов, Г. Г., Конев, А. Д., и др. (1979). [Название работы не указано]. Москва: Машиностроение. 208 с.
13. Скрынников, А. В., Шихин, А. В., Попов, А. А., & Сидоров, В. Н. (2022). Моделирование взаимодействия шины колеса с опорным основанием опорно-ходового модуля. *Инженерный вестник Дона*, (6). Получено с: <http://ivdon.ru/gu/magazine/archive/n6y2022/7695>. EDN: <https://elibrary.ru/RIGKUW>
14. Фадеева, М. Э., Чудаков, Д. А., Маташнев, А. А., Сидоров, В. Н., & Пономарев, А. И. (2022). Моделирование механической трансмиссии колёсной машины 4×2 с задней ведущей осью. *Инженерный вестник Дона*, (12). Получено с: [ivdon.ru/gu/magazine/archive/n12y2022/8090](http://ivdon.ru/gu/magazine/archive/n12y2022/8090). EDN: <https://elibrary.ru/KEDQQI>
15. Судейко, О. В., Сидоров, В. Н., & Сидоров, М. В. (2021). Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий. *«АгроЭкоИнфо»*, 1–11.

16. Жилейкин, М. М., Котиев, Г. О., & Сарач, Е. Б. (2018). *Математические модели систем транспортных средств: методические указания* [Электронный ресурс]. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. Получено из электронно-библиотечной системы «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/103321>. ISBN: 978-5-7038-4761-9
17. Сидоров, В. Н., & Осиненко, П. В. (2010). Разработка усовершенствованной методики моделирования входных воздействий МТА. В: *Сборник научных докладов ВИМ* (Т. 1, с. 284–291). EDN: <https://elibrary.ru/OZABNB>
18. Сидоров, В. Н., Тинт, Н. В., & Алакин, В. М. (2023). Математическое моделирование процесса комбинированной рычажно-электромагнитной системы поперечной стабилизации. *Мир транспорта и технологических машин*, (3–4/82), 18–25. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4\(82\)-18-25](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-18-25). EDN: <https://elibrary.ru/FKUKGU>
19. Кутьков, Г. М., Сидоров, В. Н., & Сидоров, М. В. (2015). Исследование демпфирующих свойств транспортно-технологического модуля сельскохозяйственного трактора. *Современные проблемы науки и образования*, (2–1), 197. EDN: <https://elibrary.ru/UHWZOL>
20. Корнюшин, Ю. П., & Сидоров, М. В. (2025). Влияние динамических свойств технологического модуля на вертикальные колебания оси колеса. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(2), 161–176. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-2-341>. EDN: <https://elibrary.ru/GJGBJR>
21. Кислицын, С. Г. (2009). Математическое моделирование кинематики и динамики направляющего аппарата подвески с механизмом Уатта. *Труды НАМИ*, (254), 56–67.

### References

1. Gold, B. V. (1959). *Construction and calculation of automobiles. Vol. 1: Chassis*. Moscow: Mashgiz. 487 p.
2. Reznikov, N. A. (1988). *Automotive suspensions: Construction and calculation*. Moscow: Mashinostroenie. 143 p.
3. Sinitzky, S. A., Khafizov, K. A., Nurmiev, A. A., Khafizov, R. N., Medvedev, V. M., & Lushnov, M. A. (2019). *Textbook on the discipline “Construction of automobiles and tractors”* [Electronic resource]. Retrieved from the Lan electronic library system: <https://e.lanbook.com/book/202586>. ISBN: 978-5-7043-4751-9
4. Polivaev, O. I., Kostikov, O. M., Vorokhobin, A. V., & Vedrinsky, O. S. (2022). *Construction of tractors and automobiles: textbook* [Electronic resource]. Saint Petersburg: Lan. Retrieved from the Lan electronic library system: <https://e.lanbook.com/book/211322>. ISBN: 978-5-8114-1442-0. EDN: <https://elibrary.ru/MMZOSQ>

5. Boltinsky, V. N., & Panov, Yu. V. (1973). *Theory and construction of automobiles: textbook for universities* (2nd ed., rev. and enl.). Moscow: Mashinostroenie. 488 p.
6. Kutkov, G. M. (2014). *Tractors and automobiles: Theory and technological properties*. Moscow: Infra-M. 506 p.
7. Volkov, E. V. (2022). *Theory of automobile operational properties: textbook for universities* [Electronic resource]. Saint Petersburg: Lan. Retrieved from the Lan electronic library system: <https://e.lanbook.com/book/197455>. ISBN: 978-5-8114-8745-X
8. Afanasyev, B. A., Zheglov, L. F., & Krokhin, N. A. (1976). *Construction. Fundamentals of theory and calculation of automobiles: textbook for universities*. Moscow: Mashinostroenie. 350 p.
9. Polungyan, A. A. (2003). Mathematical model of transmission dynamics of a wheeled vehicle when moving on a hard uneven road. *Bulletin of Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, (4), 15–25.
10. Vaysman, V. M. (1984). Study of the kinematics of the Watt guiding mechanism of an automotive suspension. *Automotive Industry*, (7), 12–14.
11. Khachaturov, A. A., Afanasyev, V. L., Vasilyev, V. S., et al. (1976). *Dynamics of the road-tire-vehicle-driver system*. Moscow: Mashinostroenie. 535 p.
12. Pevzner, Ya. M., Gridasov, G. G., Konev, A. D., et al. (1979). [Title not specified]. Moscow: Mashinostroenie. 208 p.
13. Skrynnikov, A. V., Shikhin, A. V., Popov, A. A., & Sidorov, V. N. (2022). Modeling the interaction of a wheel tire with the supporting base of a running gear module. *Engineering Bulletin of the Don*, (6). Retrieved from: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n6y2022/7695>. EDN: <https://elibrary.ru/RIGKUW>
14. Fadeeva, M. E., Chudakov, D. A., Matashnev, A. A., Sidorov, V. N., & Ponomarev, A. I. (2022). Modeling of the mechanical transmission of a 4×2 wheeled vehicle with a rear driving axle. *Engineering Bulletin of the Don*, (12). Retrieved from: [ivdon.ru/magazine/archive/n12y2022/8090](http://ivdon.ru/magazine/archive/n12y2022/8090). EDN: <https://elibrary.ru/KEDQQI>
15. Sudeiko, O. V., Sidorov, V. N., & Sidorov, M. V. (2021). Simulation modeling of vibration load on passenger seats of a bus for intra-farm transportation of agricultural enterprises. *AgroEcoInfo*, 1–11.
16. Zhileykin, M. M., Kotiev, G. O., & Sarach, E. B. (2018). *Mathematical models of vehicle systems: guidelines* [Electronic resource]. Moscow: Bauman MSTU. Retrieved from the Lan electronic library system: <https://e.lanbook.com/book/103321>. ISBN: 978-5-7038-4761-9
17. Sidorov, V. N., & Osinenko, P. V. (2010). Development of an improved methodology for modeling input effects of an MTA. In *Collection of scientific papers of VIM* (Vol. 1, pp. 284–291). EDN: <https://elibrary.ru/OZABNB>

18. Sidorov, V. N., Tint, N. V., & Alakin, V. M. (2023). Mathematical modeling of the process of a combined lever-electromagnetic lateral stabilization system. *World of Transport and Transport Machines*, (3–4/82), 18–25. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4\(82\)-18-25](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-18-25). EDN: <https://elibrary.ru/FKUKGU>
19. Kutkov, G. M., Sidorov, V. N., & Sidorov, M. V. (2015). Study of damping properties of the transport and technological module of an agricultural tractor. *Modern Problems of Science and Education*, (2–1), 197. EDN: <https://elibrary.ru/UHWZOL>
20. Korniyushin, Yu. P., & Sidorov, M. V. (2025). Influence of dynamic properties of a technological module on vertical oscillations of a wheel axle. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(2), 161–176. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-2-341>. EDN: <https://elibrary.ru/GJGBJR>
21. Kislitsyn, S. G. (2009). Mathematical modeling of kinematics and dynamics of a suspension guiding apparatus with a Watt mechanism. *Proceedings of NAMI*, (254), 56–67.

#### ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Жилин Юрий Витальевич**, студент, кафедра «Колесные машины и прикладная механика»

*КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*ул. Университетский Городок, 1, г. Калуга, Калужская область, 248002, Российская Федерация*

*yudjil22112003@yandex.ru*

**Сидоров Владимирович Николаевич**, профессор кафедры «Колесные машины и прикладная механика», доктор технических наук

*КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*ул. Университетский Городок, 1, г. Калуга, Калужская область, 248002, Российская Федерация*

*sidorov-kaluga@yandex.ru*

#### DATA ABOUT THE AUTHORS

**Yuri V. Zhilin**, Student, Department ‘Wheeled Vehicles and Applied Mechanics’

*Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)*

*1, Universitetsky Gorodok Str., Kaluga, Kaluga Region, 248002, Russian Federation*

*yudjil22112003@yandex.ru*

**Vladimir N. Sidorov**, Professor, Department ‘Wheeled Vehicles and Applied Mechanics’, Doctor of Technical Sciences

*Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)*

*1, Universitetsky Gorodok Str., Kaluga, Kaluga Region, 248002, Russian Federation*

*sidorov-kaluga@yandex.ru*

*SPIN-code: 6162-2659*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0214-1373>*

*Scopus AuthorID: 57222472914*

Поступила 15.12.2025

После рецензирования 02.02.2026

Принята 27.02.2026

Received 15.12.2025

Revised 02.02.2026

Accepted 27.02.2026

## Логистические транспортные системы / Logistic Transport Systems

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-414](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-414)

EDN: [DWQXTH](https://www.edn.ru/DWQXTH)



УДК 656.2

### Разработка алгоритма системы поддержки принятия решения при планировании и управлении контейнерными перевозками в мультимодальном сообщении

М.А. Марченко<sup>1</sup>, Г.И. Никифорова<sup>1</sup>, Д.С. Халтуринская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*АО «Евросиб СПб-транспортные системы», Санкт-Петербург,  
Российская Федерация*

#### *Аннотация*

**Обоснование.** В статье произведён обзор текущего состояния рынка железнодорожных контейнерных перевозок, выполнен анализ статистических данных динамики рынка железнодорожных контейнерных перевозок по видам перевозок и отдельным транспортно-логистическим компаниям. Произведён обзор работ, направленных на совершенствование организации перевозки контейнерной продукции железнодорожным транспортом. Выполнен обзор цифровых систем, применяемых в настоящее время на сети ОАО «РЖД» и транспортно-логистических компаниях при осуществлении контейнерных перевозок, рассмотрены их функционал и возможности. Выявлены ключевые задачи, направленные на обеспечение надёжности доставки контейнерной продукции. Предложена система поддержки принятия решения, функционирующая на основе оценки загруженности транспортной и терминальной инфраструктур и позволяющая подобрать оптимальный маршрут, обеспечивающий доставку контейнера. Сделаны выводы о перспективе реализации алгоритма системы в качестве программного продукта в качестве цифрового сервиса, пригодного для использования в транспортно-логистических компаниях.

**Цель** – разработка алгоритма системы поддержки принятия решения при планировании и управлении контейнерными перевозками в мультимодальном сообщении.

**Метод и методология проведения работы.** В статье использовались анализ существующего положения в сфере контейнерных перевозок, математическое моделирование целевой функции управления контейнеропотоками, сформулирован алгоритм системы поддержки принятия решения в управлении доставкой.

**Результаты.** Выполнен анализ статистических данных контейнерных перевозок, разработан алгоритм системы поддержки принятия решения управления контейнеропотоком.

**Область применения результатов.** Полученные результаты целесообразно применять в системе автомобильных и железнодорожных контейнерных перевозок, в работе экспедиторских, операторских и транспортно-логистических компаний.

**Ключевые слова:** контейнерные перевозки; коэффициент загрузки инфраструктуры; пропускная способность; время доставки; время перегрузки

**Для цитирования.** Марченко, М. А., Никифорова, Г. И., & Халтуринская, Д. С. (2026). Разработка алгоритма системы поддержки принятия решения при планировании и управлении контейнерными перевозками в мультимодальном сообщении. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 96–114. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-414>

## **Development of an algorithm for a decision support system for planning and managing container transportation in a multimodal communication**

**M.A. Marchenko<sup>1</sup>, G.Is. Nikiforova<sup>1</sup>, D.S. Khalturinskaya<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
St. Petersburg, Russian Federation*

*<sup>2</sup>JSC Eurosis SPb-Transport Systems, St. Petersburg, Russian Federation*

### **Abstract**

**Background.** The article provides an overview of the current state of the railway container transportation market, analyzes statistical data on the dynamics of the railway container transportation market by type of transportation and individual transport and logistics companies. An overview of the work aimed at improving the organization of transportation of container products by rail has been made. The review of digital systems currently used on the network of Russian Railways and transport and logistics companies in the implementation of container transportation is carried out, their functionality and capabilities are considered. The key tasks aimed at ensuring the reliability of container product delivery have been identified. A decision support system is proposed that operates based on an assessment of the workload of transport and terminal

infrastructures and allows choosing the optimal route for container delivery. Conclusions are drawn about the prospect of implementing the system algorithm as a software product as a digital service suitable for use in transport and logistics companies.

**Purpose.** Development of an algorithm for a decision support system for planning and managing container transportation in multimodal transport.

**Methodology.** The article uses an analysis of the current situation in the field of container transportation, mathematical modeling of the objective function of container traffic management, and an algorithm for a decision support system in delivery management.

**Results.** The analysis of container transportation statistics has been performed, and an algorithm for a decision support system for container traffic management has been developed.

**Practical implications.** It is advisable to apply the obtained results in the system of automobile and railway container transportation, in the work of forwarding, operator and transport and logistics companies.

**Keywords:** container transportation; infrastructure load factor; throughput; delivery time; reloading time

**For citation.** Marchenko, M. A., Nikiforova, G. Is., & Khalturinskaya, D. S. (2026). Development of an algorithm for a decision support system for planning and managing container transportation in a multimodal communication. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 96–114. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-414>

Основными задачами стратегического развития транспорта Российской Федерации являются улучшение качества транспортного обслуживания населения и сбалансированное развитие транспортной инфраструктуры для обеспечения связанности территории и освоения заданных объёмов перевозок. Особая важность их реализации обусловлена развитием экономической независимости и ростом объёма валового внутреннего продукта государства [1]. Действующие санкционные ограничения создают условия, диктующие повышенные требования к качеству транспортных услуг, оказываемых российскими перевозчиками [2].

Сократить время на перегрузку продукции при смене видов транспорта позволяет применение контейнерных технологий. В настоящее время практически любой груз может быть перевезён

в контейнере. При этом увеличивается сохранность груза в процессе перевозки и хранения, а перегрузка осуществляется лишь за счёт перемещения контейнера, между транспортными средствами, что обеспечивает сокращение времени перегрузки и способствует развитию схем доставок, подразумевающих перегрузку по прямому варианту, без промежуточного хранения. Таким образом, развитие контейнерных технологий позволят сохранить и укрепить конкурентную позицию транспортно-логистического комплекса в современных геополитических условиях.

В 2025 году наблюдается активное развитие контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте с учётом изменения геополитической обстановки и внедрения технических инноваций в перевозочный процесс. Наиболее значимым фактором оптимизации контейнерных перевозок является цифровая трансформация. Транспортно-логистические компании осуществляют активное внедрение информационных технологий с применением искусственного интеллекта, облачные платформы, системы интернета вещей и блокчейна, позволяющие повысить эффективность планирования перевозок и маршрутов перевозок, систематизации цепочек поставок, возможности отслеживания изменений внешней среды в режиме реального времени. Активно развиваются технологии мультимодальных перевозок, чему способствует укрепление взаимодействия операторов различных видов транспорта. Ярким примером является рост объёмов перевезённых контейнеров с применением технологий мультимодальных перевозок по международному транспортному коридору «Север-Юг», где присутствует взаимодействие операторов железнодорожного, автомобильного, внутреннего водного и морского видов транспорта. Параллельно ведутся работы по модернизации специализированных контейнеров, предназначенных для транспортировки скоропортящихся и опасных грузов, направленные на повышение безопасности контейнерных перевозок и сохранности перевозимых грузов [3].

Вопросы развития транспортного обслуживания, контейнерных технологий и мультимодальных перевозок отражены в ряде работ [4-16], где рассматривались вопросы оптимизации перевозочного процесса при осуществлении перевозок различными видами транспорта с перегрузкой/перевалкой груза на терминалах. В ходе исследований предложены математические модели и методы оптимизации маршрутизации, в том числе при осуществлении бесшовных перевозок. Также в научных работах рассмотрены примеры внедрения технологий машинного обучения в программных комплексах, используемых отделами управления перевозками транспортно-логистических компаний, которые свидетельствуют о тенденции расширения применения искусственного интеллекта при планировании и осуществлении мультимодальных перевозок. Однако в рассмотренных работах наблюдается дефицит исследований на тему развития мультимодальных перевозок с осуществлением контейнерных технологий непосредственно до склада грузополучателя – «на последней миле».

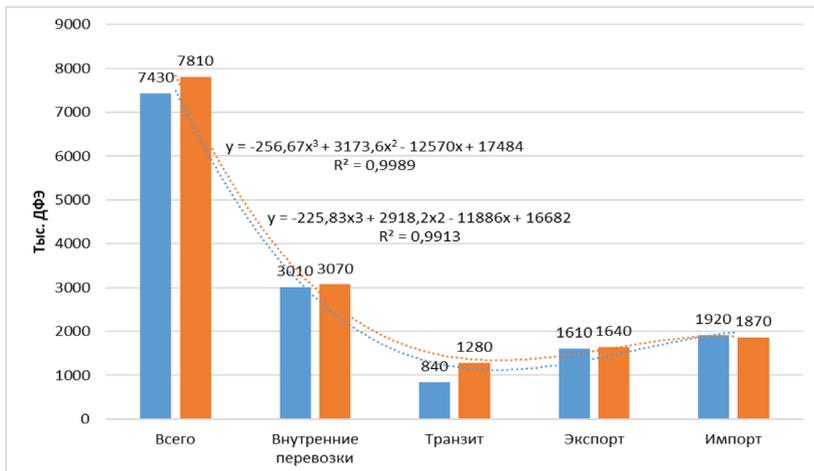
В рамках исследования проведён анализ цифровых систем, применяемых в сфере контейнерных перевозок. Грузовая работа станций на сети ОАО «РЖД» ведётся в автоматизированной системе управления станциями нового поколения (АСУ СТ НП) [17], в функционал которой входит отображение информации по подходам поездов к станции, оформление первичной коммерческой документации, проведение операций с вагонами и контейнерами. Справочная информация местной работы отображается в Единой модели данных перевозочного процесса управления эксплуатационной работой (ЕМД ПП УЭР) [18], в которой отображаются статистические данные работы с местным грузом, погрузочно/выгрузочные операции, аналитические данные работы с разной номенклатурой грузов, дислокация вагонов, логистические цепочки. Для хранения и использования данных о состоянии грузовых вагонов используют сервис контроля жизненного цикла грузовых вагонов на платформе «Распределённый реестр данных» (РРД ГВ),

отображающий информацию о грузовом вагоне на любом жизненном цикле [19].

Грузовая работа транспортно-логистических компаний, осуществляющих контейнерные перевозки, ведётся в локальных автоматизированных системах. Например, в компании АО «Евросиб – транспортные системы» используется Терминально-операционная система (TOS Евросиб), отображающая информацию о движении любого контейнера, попадающего на терминал, данные о вагонах на погрузочно-выгрузочных путях в режиме реального времени, данные учёта запорно-пломбировочных устройств. Система позволяет снизить влияние человеческого фактора, добиться экономии времени на погрузку/выгрузку и обработку заявки, осуществлять автоматическую тарификацию терминальных услуг и выбирать контейнеры в режиме реального времени [20].

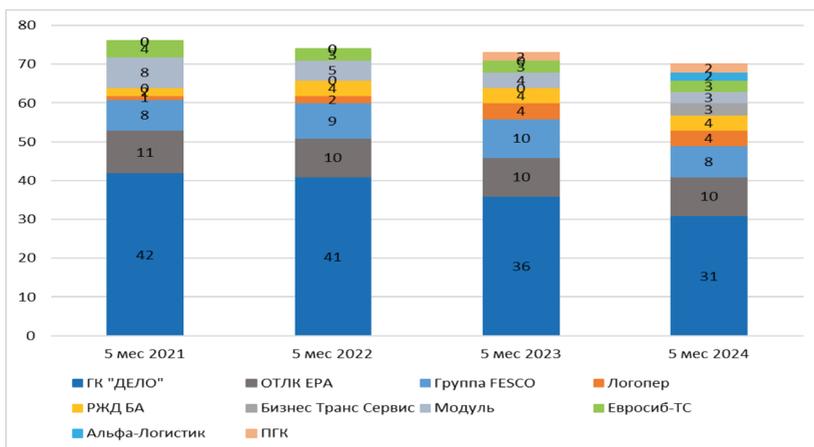
Применение вышеописанных цифровых систем позволяет добиться оптимизации эксплуатационной работы в сфере контейнерных перевозок. Однако для эффективного планирования и осуществления контейнерных перевозок в смешанном сообщении требуется разработка автоматизированной системы, объединяющей подсистемы управления перевозочным процессом на различных видах транспорта, используемого при доставке контейнера, тем самым позволяя полностью контролировать перевозочный процесс «от двери до двери». В рамках работы исследование ограничено железнодорожным и автомобильным видами транспорта, на которые приходится наибольший контейнеропоток, что подтверждают статистические данные.

В исследовании проанализированы статистические данные изменения объёма контейнерных перевозок в Российской Федерации (рисунок 1), а также рассмотрена структура контейнерного рынка в рамках долевого участия топ-10 железнодорожных операторов на рынке контейнерных перевозок Российской Федерации (рисунок 2).



**Рис. 1.** Динамика изменения объёма контейнерных перевозок в Российской Федерации за 2023-2024 года, тыс. ДФЭ [3]

**Fig. 1.** Dynamics of changes in the volume of container traffic in the Russian Federation for 2023-2024, thousand [3]

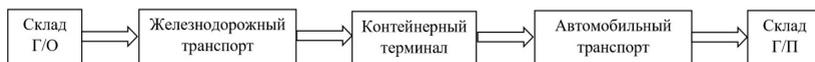


**Рис. 2.** Долевые объёмы топ-10 железнодорожных операторов на рынке контейнерных перевозок Российской Федерации по итогам января-мая 2021-2024 годов [21]

**Fig. 2.** Market shares of the top 10 railway operators in the container transportation market of the Russian Federation based on the results of January-May 2021-2024 [21]

Статистические данные демонстрируют увеличение контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте. Рост объёмов контейнеропотока приводит к росту нагрузки на транспортно-логистическую инфраструктуру, особенно в восточных регионах страны, что приводит к повышенной нагрузке на инфраструктуру [22]. Кроме того, в последние годы наблюдается увеличение конкуренции на рынке контейнерных перевозок, что является свидетельством увеличения конкуренции среди транспортных компаний и, как следствие, требований к качеству оказываемых транспортных услуг. Данные обстоятельства провоцируют риск задержки доставки контейнеров [16], что является подтверждением актуальности статьи.

В рамках работы рассмотрен наиболее простой способ доставки контейнера от склада грузоотправителя к складу грузополучателя – железнодорожным и автомобильным транспортом (рисунок 3). Рассмотрена перевозка контейнера при его транспортировке от склада грузоотправителя ускоренным контейнерным поездом до перегрузочного терминала, дальнейшей перегрузке на автомобильный транспорт и последующей доставке непосредственно до склада грузополучателя.



**Рис. 3.** Обобщённая схема доставки контейнера  
**Fig. 3.** Generalized container delivery diagram

Для повышения точности оценки объёмов перевезённых грузов и оптимизации управления контейнеропотоками предлагается оценивать объёмы контейнерных перевозок согласно целевой функции (1):

$$K_{\text{общ}} = [K_{\text{жд}} \cdot (1 - k_{\text{пг}}) + (K_{\text{жд}} \cdot k_{\text{пг}}) \cdot k_{\text{зг инф}}^{\text{пг}}] \cdot k_{\text{зг инф}}^{\text{жд}} + [K_{\text{авт}} \cdot (1 - k_{\text{пг}}) + (K_{\text{авт}} \cdot k_{\text{пг}}) \cdot k_{\text{зг инф}}^{\text{пг}}] \cdot k_{\text{зг инф}}^{\text{жд}} \rightarrow \max \quad (1)$$

где  $K_{\text{общ}}$  – общее количество контейнеров, перевезённое компанией за расчётный период;

$K_{\text{жд}}$  – количество контейнеров, перевезённое компанией за расчётный период контейнерными поездами;

$K_{\text{авт}}$  – количество контейнеров, перевезённое компанией за расчётный период автомобильным транспортом;

$k_{\text{зг инф}}^{\text{ЖД}}$  – коэффициент загрузки железнодорожной инфраструктуры;

$k_{\text{зг инф}}^{\text{авт}}$  – коэффициент загрузки автомобильной инфраструктуры;

$k_{\text{пг}}$  – коэффициент перегрузки, отражающий долю контейнеров, перегружаемых на другой вид транспорта в пути следования;

$k_{\text{зг инф}}^{\text{пг}}$  – коэффициент загрузки терминальной инфраструктуры.

Коэффициент загрузки инфраструктуры отражает фактическую провозную способность железных и автомобильных дорог, позволит транспортно-логистическим компаниям повысить эффективность управления контейнерными перевозками, своевременно реагируя на изменения транспортных потоков и перенаправляя собственные транспортные средства по маршрутам, обеспечивающим минимальное время доставки контейнера.

Фактическое время  $t_{\text{ф}}$  не может быть больше нормативного времени  $t_{\text{н}}$ , обозначающее минимально возможное время доставки или переработки контейнера; ограничением служат максимально установленная скорость движения транспортных средств и максимальная перерабатывающая способность контейнерного терминала. Определение фактического времени осуществляется на основе сбора и обработки выборки большого количества данных о времени движении транспортных средств (поездов или автомобилей) по маршруту между контейнерными терминалами и времени обработки контейнеров на терминалах.

Математическая модель загрузки инфраструктуры выглядит следующим образом (2):

$$\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n K_{ij} \rightarrow \max \quad (2)$$

Где  $i$  – порядковый номер участка пути (терминала);

$n$  – общее количество путей (терминалов);

$j$  – порядковый номер мультимодального маршрута;

$p$  – общее количество вариантов маршрутов доставки контейнера.

Предлагается определять  $t_{\phi}$  для железнодорожного и автомобильного транспорта, а также контейнерных терминалов согласно выражению (3):

$$t_d = \sum_{i=1}^n t_i + t_{np}, \quad (3)$$

где  $t_i$  – время следования транспортного средства по  $i$ -му участку пути (обслуживания на  $i$ -ом терминале); определяется согласно фактическим данным на момент расчёта;

$t_{np}$  – оставшееся прогнозное время контейнера в пути. Определяется согласно методу регрессионного анализа с помощью полиномиальной регрессии, по формуле (4):

$$t_{np} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot t^i, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – параметр полинома;

$t$  – время следования транспортного средства по предыдущим участкам пути (обслуживания на предыдущих терминалах).

После вычисления фактического времени доставки контейнера определяем коэффициент загрузки инфраструктуры. Поскольку эмпирическое распределение плотности вероятности случайной величины при больших объёмах статистической выборки подчиняется нормальному закону распределения, определяем величину коэффициента инфраструктуры согласно формуле (5):

$$k_{инф} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma_{отк}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t_d - t_d^m}{\sigma_{отк}} \right)^2}, \quad (5)$$

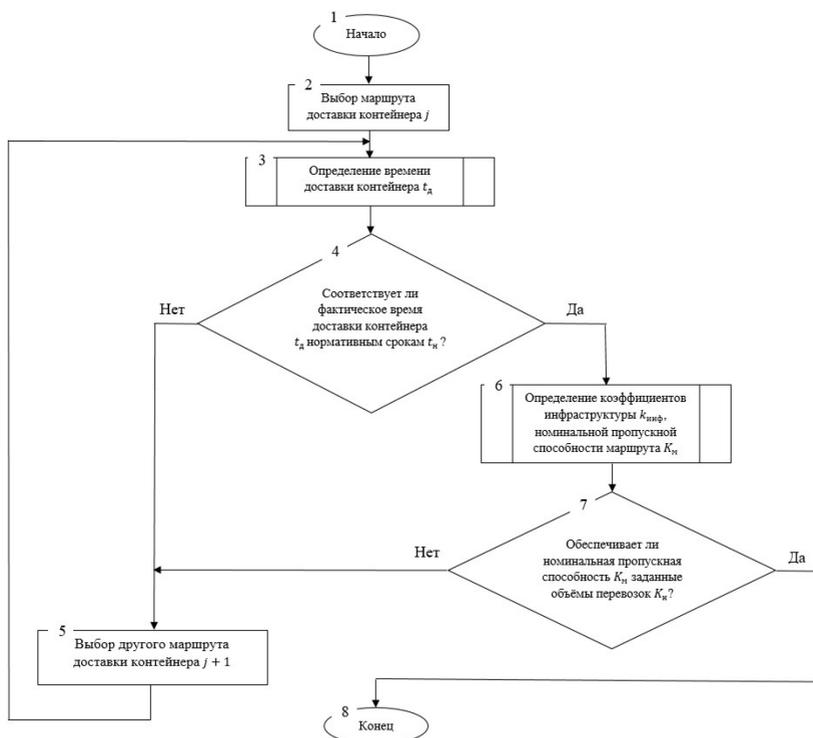
где  $t_d^m$  – математическое ожидание времени следования транспортных средств по участку пути (обслуживания на терминале);

$\sigma_{отк}$  – величина среднеквадратического отклонения времени следования транспортных средств по участку пути (обслуживания на терминале) от математического ожидания  $t_d^m$ .

Время доставки контейнера согласно выбранному маршруту  $j$  осуществляется с применением алгоритма Дейкстры, являющегося наиболее подходящим для определения минимального времени пути при заданных временных значениях доставки контейнера между вершинами неориентированного графа (терминалами), соединённых между собой рёбрами (железнодорожными путями или автомобильными дорогами с заданной пропускной способностью). Пропускная способность в рассматриваемом случае представляет собой динамическую величину, изменяющуюся с течением времени в зависимости от загрузки инфраструктуры. Для получения данных в режиме реального времени загрузки инфраструктуры предлагается использовать интеграцию с автоматизированной системой Динамическая модель загрузки железнодорожной инфраструктуры (ДМЗИ) [23], а автомобильной инфраструктуры – с автоматизированной системой Яндекс Маршрутизация [24]. После определения прогнозного времени доставки контейнера до грузополучателя производится сопоставление расчётного срока доставки с нормативным. Если расчётные сроки удовлетворяют нормативным, производится оценка коэффициента инфраструктуры для каждого участка пути, на основе которых производится определение номинальной пропускной способности для всего маршрута мультимодальной перевозки, с учётом использования нескольких видов транспорта и технологических операций на терминалах. В случае, если расчётное время доставки не удовлетворяет нормативному или номинальная пропускная способность не обеспечивает заданные объёмы перевозок, производится поиск другого маршрута  $j + 1$ . Алгоритм функционирования системы представлен на рисунке 4.

Предложенная система поддержки принятия решения позволит точнее производить оценку пропускной способности маршрута при мультимодальных перевозках, обеспечивая планирование предполагаемых объёмов контейнерных перевозок за расчётный период, а также позволит точнее определять сроки доставки кон-

тейнера до грузополучателя с учётом загрузки транспортной и терминальной инфраструктур. При изменении условий внешней среды система обеспечивает гибкость транспортно-логистической цепи, обеспечивая вариативность маршрута доставки, тем самым обеспечивая сокращение времени доставки контейнера. В перспективе предполагается автоматизация производимых вычислений и разработка программного продукта в качестве самостоятельного цифрового сервиса на базе интеграции существующих автоматизированных систем.



**Рис. 4.** Алгоритм функционирования системы поддержки принятия решения при планировании и управлении контейнерных перевозках в мультимодальном сообщении

**Fig. 4.** Algorithm for the functioning of the decision support system for planning and managing container transportation in multimodal transport

Таким образом, в статье произведён обзор текущего состояния рынка контейнерных перевозок в Российской Федерации, выполнен анализ статистических данных динамики рынка железнодорожных контейнерных перевозок по видам перевозок и отдельным транспортно-логистическим компаниям. Произведён обзор работ, направленных на совершенствование организации перевозки контейнерной продукции, в ходе которого определены ключевые задачи, направленные на обеспечение надёжности доставки контейнерной продукции. Выполнен обзор цифровых систем, применяемых в настоящее время на сети ОАО «РЖД» и транспортно-логистических компаниях при осуществлении контейнерных перевозок, рассмотрены их функционал и возможности. Предложена система поддержки принятия решения, функционирующая на основе оценки загруженности транспортной и терминальной инфраструктур и позволяющая подобрать оптимальный маршрут, обеспечивающий доставку контейнера с участием нескольких видов транспорта непосредственно до грузополучателя. В дальнейшем предполагается реализация алгоритма системы в качестве программного продукта в качестве цифрового сервиса, пригодного для использования в транспортно-логистических компаниях. Его функционал будет способствовать решению основных задач обеспечения поточности и бесперебойности продвижения контейнеропотоков при мультимодальных перевозках.

#### *Список литературы*

1. *Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года* (утв. распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р). (2021). Москва: Правительство Российской Федерации, 282 с.
2. Никифорова, Г. И. (2025). Анализ качества транспортно-логистического обслуживания в современных условиях. *Транспорт и информационные технологии*, 15(3), 167–181. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-392>. EDN: <https://elibrary.ru/LEDGDI>

3. *Главные проблемы логистики в России* [Электронный ресурс]. (2023). *Logistic tools*. Получено из [https://logistic.tools/blog/glavnie\\_problemi\\_logistiki\\_rossii?y\\_sclid=m7d0c2h5su28550093](https://logistic.tools/blog/glavnie_problemi_logistiki_rossii?y_sclid=m7d0c2h5su28550093)
4. *Будущее контейнерных перевозок: ключевые тренды и лучшие практики 2025 года для успешной логистики* [Электронный ресурс]. (2025). Получено 25.10.2025, из <https://avalog.pro/blog/2025/03/17/budushhee-kontejnernih-perevozok-klyuchevye-trendy-i-luchshie-praktiki-2025-goda-dlya-uspeshnoj-logistiki/>
5. Пацев, Ю. П., & Москвичев, О. В. (2024). Двухкритериальный подход к выбору оптимального варианта контрейлерных перевозок. *Наука и образование транспорту*, (1), 120–122. EDN: <https://elibrary.ru/UTTYAL>
6. Никифорова, Г. И., & Кизляк, О. П. (2024). Качество транспортной услуги. В кн.: *Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XIII международной научно-практической конференции, посвящённой Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года* (с. 52–54). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/JUYBDL>
7. Москвичев, О. В., Москвичева, Е. Е., & Васильев, Д. В. (2025). Развитие логистики перевозки грузов контейнерными поездами: новые аспекты, требования, решения. *Транспорт Урала*, 1(84), 60–65. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-1-60-65>. EDN: <https://elibrary.ru/WFPLQL>
8. Москвичев, О. В., & Васильев, Д. В. (2021). Экономико-математическая модель установления организационно-технологических требований к организации маршрутных контейнерных перевозок. В кн.: *Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвящённой 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года* (с. 509–520). Москва: Российский университет транспорта. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.68>. EDN: <https://elibrary.ru/GTMUSI>
9. Осьминин, А. Т. (2021). О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. В кн.: *Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: Сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 года* (с. 139–147). Щербинка: АО «ВНИИЖТ». EDN: <https://elibrary.ru/ZCYKSP>
10. Осьминин, А. Т. (2020). Реинжиниринг модели управления перевозками. *РЖД-Партнёр*, (1–2), 46–49.
11. Куренков, П. В., Волов, В. Т., Герасимова, Е. А., Казеев, Р. Д., & Туркменов, И. О. (2023). Российская логистика под санкциями и антисанкционная логистика. *Социально-экономический и гуманитарный журнал*, (3), 117–120.

- <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2023-3-117-126>. EDN: <https://elibrary.ru/PNEHJW>
12. Куренков, П. В., Герасимова, Е. А., Мизиев, М. М., & Черкасова, Д. О. (2024). Вопросы организации мультимодальных перевозок грузов. В кн.: *Прогрессивные технологии в эксплуатации наземных транспортно-технологических комплексов и логистических транспортных систем: Сборник трудов международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой 110-летию юбилею со дня рождения профессора Каракулева А. В.* (с. 211–217). Казань.
  13. Рахмангулов, А. Н., Корнилов, С. Н., & Кольга, А. Д. (2014). Обеспечение своевременности грузовых перевозок в транспортно-логистических системах. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, 115–121. EDN: <https://elibrary.ru/RZPTSZ>
  14. Маликов, О. Б. (2015). *Складская и транспортная логистика в цепях поставок*: учеб. пособие. Стандарт третьего поколения. Санкт-Петербург: Питер, 400 с.
  15. Покровская, О. Д. (2019). Клиентоориентированность и цифровизация терминально-логистической деятельности. *Железнодорожный транспорт*, (5), 9–16. EDN: <https://elibrary.ru/BMVUZQ>
  16. Покровская, О. Д. (2023). Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций. *Бюллетень результатов научных исследований*, (3), 58–72. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-58-72>. EDN: <https://elibrary.ru/QTHKZC>
  17. Коровяковский, Е. К. (2013). Проблемы развития системы логистических центров на железнодорожном транспорте. *Логистические системы в глобальной экономике*, (1–3), 121–125. EDN: <https://elibrary.ru/SZHEAP>
  18. *Автоматизированная система управления станцией нового поколения* [Электронный ресурс]. Получено 25.10.2025, из <https://software.rzd.ru/catalog/184>
  19. *Единая модель данных перевозочного процесса (ЕМД ПП)* [Электронный ресурс]. Получено 25.10.2025, из <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/1273062/>
  20. *Сайт Минтранс «Министерство транспорта РФ»* [Электронный ресурс]. Получено 25.10.2025, из <https://www.mintrans.gov.ru/>
  21. *Официальный сайт АО «Евросиб — транспортные системы»* [Электронный ресурс]. Получено 25.10.2025, из <https://eurosib.biz/ru/>
  22. *Рейтинг железнодорожных операторов на контейнерном рынке России по итогам первых пяти месяцев 2024 года* [Электронный ресурс]. (2024). Получено 25.10.2025, из <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznyaya-doroga/65324-rejting-zheleznodorozhnyh-operatorov-na-kontejnernom-rynke-rossii-po-itogam-pervyh-pyati-mesyatsev-2024-goda/>

23. Елисеев, С. Ю. (2006). *Построение и оптимизация функционирования международных транспортно-логистических систем*. Москва: ВИНТИ РАН, 242 с.
24. *Об ограничении пропускных способностей инфраструктуры* [Электронный ресурс]. Получено 25.10.2025, из <https://cargo.rzd.ru/ru/9784/page/103290?id=19936>
25. *Яндекс Маршрутизация* [Электронный ресурс]. Получено 25.10.2025, из <https://yandex.ru/routing/>

### References

1. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 (approved by Government Decree No. 3363-r dated November 27, 2021). (2021). Moscow: Government of the Russian Federation, 282 p.
2. Nikiforova, G. I. (2025). Analysis of transport and logistics service quality in modern conditions. *Transport and Information Technologies*, 15(3), 167–181. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-392>. EDN: <https://elibrary.ru/LEDGDI>
3. Main logistics challenges in Russia [Electronic resource]. (2023). *Logistic Tools*. Retrieved from [https://logistic.tools/blog/glavnie\\_problemi\\_logistiki\\_rossii?ysclid=m7d0c2h5su28550093](https://logistic.tools/blog/glavnie_problemi_logistiki_rossii?ysclid=m7d0c2h5su28550093)
4. The future of container transportation: key trends and best practices for 2025 to achieve successful logistics [Electronic resource]. (2025). Retrieved on October 25, 2025, from <https://avalog.pro/blog/2025/03/17/budushhee-kontejnernyh-perevozok-klyuchevye-trendy-i-luchshie-praktiki-2025-goda-dlya-uspeshnoj-logistiki/>
5. Patsev, Yu. P., & Moskvichev, O. V. (2024). A two-criterion approach to selecting the optimal option for piggyback transportation. *Science and Education for Transport*, (1), 120–122. EDN: <https://elibrary.ru/UTTYAL>
6. Nikiforova, G. I., & Kizlyak, O. P. (2024). Quality of transport services. In: *Transport safety issues: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Quality. In 2 parts, Gomel, November 21–22, 2024* (pp. 52–54). Gomel: Belarusian State University of Transport. EDN: <https://elibrary.ru/JUYBDL>
7. Moskvichev, O. V., Moskvicheva, E. E., & Vasiliev, D. V. (2025). Development of logistics for freight transportation by container trains: new aspects, requirements, and solutions. *Transport of the Urals*, 1(84), 60–65. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-1-60-65>. EDN: <https://elibrary.ru/WFPLQL>
8. Moskvichev, O. V., & Vasiliev, D. V. (2021). Economic-mathematical model for establishing organizational and technological requirements for organizing routed

- container transportation. In: *Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov — the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021* (pp. 509–520). Moscow: Russian University of Transport. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.68>. EDN: <https://elibrary.ru/GTMUSI>
9. Osminin, A. T. (2021). On developing an intelligent transportation process management system in railway transport. In: *Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: Proceedings of the Scientific and Practical Conference of JSC “VNIIZhT”, Shcherbinka, August 26–27, 2021* (pp. 139–147). Shcherbinka: JSC “VNIIZhT”. EDN: <https://elibrary.ru/ZCYKSP>
  10. Osminin, A. T. (2020). Reengineering the transportation management model. *RZD Partner*, (1–2), 46–49.
  11. Kurenkov, P. V., Volov, V. T., Gerasimova, E. A., Kazeev, R. D., & Turkmenev, I. O. (2023). Russian logistics under sanctions and anti-sanction logistics. *Socio-Economic and Humanitarian Journal*, (3), 117–120. <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2023-3-117-126>. EDN: <https://elibrary.ru/PNEHJW>
  12. Kurenkov, P. V., Gerasimova, E. A., Miziev, M. M., & Cherkasova, D. O. (2024). Issues of organizing multimodal freight transportation. In: *Advanced technologies in operation of ground transport and technological complexes and logistics transport systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates, and young scientists dedicated to the 110th anniversary of Professor Karakulev A. V.* (pp. 211–217). Kazan.
  13. Rakhmangulov, A. N., Kornilov, S. N., & Kolga, A. D. (2014). Ensuring the timeliness of freight transportation in transport and logistics systems. *Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 115–121. EDN: <https://elibrary.ru/RZPTSZ>
  14. Malikov, O. B. (2015). *Warehouse and transport logistics in supply chains: textbook*. Third-generation standard. Saint Petersburg: Piter, 400 p.
  15. Pokrovskaya, O. D. (2019). Customer orientation and digitalization of terminal logistics activities. *Railway Transport*, (5), 9–16. EDN: <https://elibrary.ru/BMVUZQ>
  16. Pokrovskaya, O. D. (2023). Development of Russia’s logistics transport system under sanctions. *Bulletin of Research Results*, (3), 58–72. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-58-72>. EDN: <https://elibrary.ru/QTHKZC>
  17. Korovyakovsky, E. K. (2013). Problems of developing a logistics center system in railway transport. *Logistic Systems in the Global Economy*, (1–3), 121–125. EDN: <https://elibrary.ru/SZHEAP>
  18. Automated station management system of a new generation [Electronic resource]. Retrieved on October 25, 2025, from <https://software.rzd.ru/catalog/184>

19. Unified data model of the transportation process (UDM-TP) [Electronic resource]. Retrieved on October 25, 2025, from <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/1273062/>
20. Ministry of Transport of the Russian Federation official website [Electronic resource]. Retrieved on October 25, 2025, from <https://www.mintrans.gov.ru/>
21. Official website of JSC “Eurosib — Transport Systems” [Electronic resource]. Retrieved on October 25, 2025, from <https://eurosib.biz/ru/>
22. Railway operators rating in Russia’s container market based on the results of the first five months of 2024 [Electronic resource]. (2024). Retrieved on October 25, 2025, from <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznaya-doroga/65324-rejting-zheleznodorozhnyh-operatorov-na-kontejnernom-rynke-rossii-po-itogam-pervyh-pyati-mesyatsev-2024-goda/>
23. Eliseev, S. Yu. (2006). *Building and optimizing the functioning of international transport and logistics systems*. Moscow: VINITI RAS, 242 p.
24. On limiting the infrastructure throughput capacity [Electronic resource]. Retrieved on October 25, 2025, from <https://cargo.rzd.ru/ru/9784/page/103290?id=19936>
25. Yandex Routing [Electronic resource]. Retrieved on October 25, 2025, from <https://yandex.ru/routing/>

#### ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Марченко Максим Александрович**, техник кафедры «Управление эксплуатационной работой»

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I*

*пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация*  
*maks.marchenko1998@mail.ru*

**Никифорова Гузель Ислямовна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I*

*пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация*  
*guzel.spb@mail.ru*

**Халтуринская Дарья Сергеевна**, специалист по налоговой и первичной документации

*АО «Евросиб СПб-транспортные системы»*

*ул. Мичуринская, 4, г. Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация*  
*dhalturinskaa@gmail.com*

**DATA ABOUT THE AUTHORS****Maksim A. Marchenko**, Technician, Department of Operational Management*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University**9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation**maks.marchenko1998@mail.ru**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3191-3665>***Guzel Is. Nikiforova**, PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of Operational Management*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University**9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation**guzel.spb@mail.ru**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4908-3225>***Daria S. Khalturinskaya**, Tax and Primary Documentation Specialist*JSC Eurosib SPb-Transport Systems**4, Michurinskaya Str., St. Petersburg, 197046, Russian Federation**dhalturinskaa@gmail.com*

Поступила 10.01.2026

После рецензирования 12.02.2026

Принята 17.02.2026

Received 10.01.2026

Revised 12.02.2026

Accepted 17.02.2026

## Логистические транспортные системы / Logistic Transport Systems

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-418](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-418)

EDN: [QDMXJM](https://www.edn.ru/qdmxjm)

УДК 656.073



### Нечеткая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов

А.Н. Ляшенко

*Министерство экономического развития России,  
Москва, Российская Федерация*

#### *Аннотация*

**Обоснование.** В статье рассматривается вопрос определения рационального варианта доставки груза  $M_T$  из пункта  $A^0$  в пункт  $B^0$  с максимальным удовлетворением системы критериев  $k_j$ . В сущности членам экспертного совета предлагается найти единую меру на множестве  $M_j$ , т.е. дать значения веса  $\lambda_j$  каждому  $M_j$  единого выбранного «эталона», предложенной системе по принятию решений. Вычисляемые  $M_{ji}$  соответствуют  $\Pi_{ji}^{-1}$ ,  $\Pi_{ji}$  с точностью менее 0,1%. Это значительно упрощает задачу экспертного совета, повышает объективность оценок  $k_j$ , повышает обоснованность и объективность выбора рационального варианта доставки груза.

В области экспертного совета принимается интуитивный подход, при использовании предлагаемого математического аппарата принимается количественный подход.

**Цель.** Разработать и апробировать математическую модель на основе аппарата нечетких множеств, позволяющую формализовать процесс принятия решений при выборе маршрута доставки нефтепродуктов.

**Материалы и методы.** Теоретической и методологической основой исследования явились системный анализ и моделирование, теория нечетких множеств, статистический анализ и корреляционно-регрессивный анализ, а также научно-инженерные работы для различных видов экспертных оценок, используемый для определения значений критериев при сравнении рассматриваемых вариантов доставки нефтепродуктов.

**Результат.** Математический аппарат нацелен на многокритериальный анализ с математическим решением задачи и является инструментом для выбора лучших

схем, в том числе гипотетических (планируемых), в частности с использованием логистических объектов по видам транспорта, согласно выбранным логистическим полигонам с конкурирующими маршрутами и с вариацией видов транспорта.

**Ключевые слова:** пути доставки нефтепродуктов; мультимодальная логистика; нечеткие множества; исходные данные; конечные цели; экспертный выбор рационального маршрута; математическая модель; вычисление оценок «качества» в процессе выбора; предложения по принятию решений

**Для цитирования.** Ляшенко, А. Н. (2026). Нечеткая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 115–131. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-418>

## Fuzzy system for determining an objective solution for the transportation of petroleum products

A.N. Lyashenko

*Ministry of Economic Development of the Russian Federation,  
Moscow, Russian Federation*

### **Abstract**

**Background.** The article discusses the issue of determining the rational option for delivering cargo  $M_1$  from point  $A^0$  to point  $B^0$  with maximum satisfaction of the  $k_j$  system of criteria. Essentially, the members of the expert council are asked to find a single measure on the set  $M_j$ , i.e., to assign a weight value  $\lambda_j$  to each  $M_j$  of a single selected «standard» proposed by the decision-making system. The calculated  $M_{ji}$  correspond to  $\Pi_{ji}^+$ ,  $\Pi_{ji}^-$  with an accuracy of less than 0.1%. This significantly simplifies the task of the expert council and increases the objectivity of the  $k_j$  assessments, increases the validity and objectivity of choosing the most rational cargo delivery option.

In the field of the expert council, an intuitive approach is adopted, while using the proposed mathematical apparatus, a quantitative approach is adopted.

**Purpose.** To develop and test a mathematical model based on fuzzy sets that allows formalizing the decision-making process when selecting a delivery route for petroleum products.

**Materials and methods.** The theoretical and methodological basis of the study was the system analysis and modeling, fuzzy set theory, statistical analysis and correlation-regression analysis, as well as scientific and engineering works for various types of expert assessments, used to determine the values of criteria when comparing the considered options for the delivery of petroleum products.

**Result.** The mathematical apparatus is aimed at multi-criteria analysis with a mathematical solution of the problem and is a tool for selecting the best schemes, including hypothetical (planned) ones, in particular, using logistics facilities by mode of transport, according to the selected logistics polygons with competing routes and varying modes of transport.

**Keywords:** ways of delivery of oil products; multimodal logistics; fuzzy sets; initial data; final goals; expert selection of a rational route; mathematical model; calculating “quality” estimates in the selection process; proposals for decision-making

**For citation.** Lyashenko, A. N. (2026). Fuzzy system for determining an objective solution for the transportation of petroleum products. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 115–131. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-418>

## Введение

Предлагаемый математический аппарат является системой по принятию объективных решений, учитывающих в том числе транспортные узлы в мультимодальных перевозках. Представленная в работе система направлена на использование в разнопрофильных логистических проектах, нацеленных на обнаружение, сокращение излишних технических и финансовых издержек, выбор возможных рациональных альтернатив.

В настоящей работе предлагается возможность адаптации нечеткой системы оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов под различные критерии риска, включая как обстановку на платформе нестабильных территорий с участием российской стороны и смежных операторов-иноагентов в целях рационализации транспортных проектов по управлению логистическими процессами [1-3]. В системе учтена возможность проработать риски, если они оценены в баллах, местах. Стоит учесть, что риски рассматриваются в закрытом режиме, пример Северный Поток-2 (последствия, результат). Предметом исследования выступает принцип теории нечетких множеств и сопутствующих узлов маршрутов доставки углеводородного сырья (принята номенклатура нефть сырая, нефтепродукты) при учете реальных и близких к реальным условиям различных режимов работ. Транзитивность

достигается как по горизонтали, так и по вертикали. Любая пара  $(M_j, \Pi_j)$  определяет величины  $M_{jki}$  для  $\forall j \in N_2, \lambda \in N_{3j}$ . По этим значениям находим лучшее удовлетворение  $k_j$  для  $\forall j \in N_2$  ( $\sup M_{ji}$ , или  $\inf M_{ji}$  в зависимости от группы в которую отнесен  $k_j$ ). Логистические транспортные системы с расширением плоскости учета рисков [4-12] требуют адаптированные системы оценок в условиях неопределенности с интегрированием экспертных знаний, качественных и количественных оценок, статистических данных. В трудах [13-21] определены оценки элементов нечеткого аппарата. На платформе теории нечетких множеств разработано множество способов к реализации нечетких вычислений [22-27].

В результате сложилась необходимость разработки математической модели выбора решений на нечетком множестве данных в сфере мультимодальной логистики.

В настоящей работе рассматриваются подобные задачи, возникающие в процессе определения законодательного варианта доставки груза из отправной точки до конечного пункта заказчика смежными видами транспорта в сфере мультимодальной логистики.

Вариантов доставки груза может быть несколько. Они должны удовлетворять ряд требований (критериев). Степень удовлетворения каждого критерия экспертный совет ставит релевантную оценку (места, баллы, очки). Их анализ рекомендует наиболее рациональную доставку груза.

### **Результаты и обсуждение**

#### *Применение системы к элементам объекта, узлам*

Если вариантов доставки  $n_1$ , условий качества  $n_2$ , тогда каждый член экспертного совета должен дать  $n_1; n_2$  оценок. Ответственность значительная. Проблема в том, что критерии имеют разные размерности, возможно определенно противоречивые. Решение таких задач практически отсутствует. В некоторых отраслях (например, при определенных оптимальных стационарных режимах работы магистральных газопроводов по произвольным сетям) решение находится, но при этом (часто завуалировано) использу-

ются приоритеты критериев (в сущности определяется мера на множестве критериев). Проблема сводится к рациональному удовлетворению некоторого одного гипотетического критерия.

В настоящей работе определение такой меры на множестве критериев достаточны только для одного варианта доставки груза, эталон остается за экспертным советом. Оценки для остальных вычисляются с использованием предлагаемой математической модели. Тогда выбор рационального варианта доставки на конечных множествах критериев и вариантов доставки элементарен.

Предлагаемая математическая модель позволяет существенно сократить трудозатраты экспертного совета, упростить процесс выбора варианта доставки груза, повысить объективность каждого критерия в каждом варианте. Оценки приоритетности критериев в эталонном варианте возлагается на экспертный совет. Настоящая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов написана по аналогии с Рядом Тейлора, по направлению непрерывной топологии с использованием локальной линейной зависимости и с учетом локальной кривизны. Проверка на точность для всех  $i$  составляет до  $0,1\%$ .

Сохранение лучшего варианта при вычислении вариации исходных данных. В системе учтена возможность проверки на устойчивость рационального  $A_{i_0} \in A^{\text{II}}$  варианта. Устойчивость проверяется по основным критериям. В этих целях  $C_{ji}$  цифровая величина  $k_j$  увеличивается (уменьшается), процесс прекращался при смене рационального  $A_{i_0} \in A^{\text{II}}$  варианта, при этом определяются границы величин оценок критериев.

#### *Техно-практическая постановка задачи*

Рассмотрим практическую задачу определения рационального варианта доставки груза в частности жидкого топлива, в плановом регионе определенной массы из пункта  $A^0$  в пункт  $B^0$ . Считаем заданной величину  $T \frac{\text{тонна}}{\text{время}}$  (плановая доставка массы груза в определенный период времени). Считаем, что варианты решения задачи множества  $A$  несколько. Из них выбраны возможные  $A^{\text{II}} \subset A$ , из

которых определены допустимые  $A^{\text{II}} \subset A^{\text{I}} \subset A$ , т.е. гарантированно готовые к эксплуатации.

Каждый вариант  $\forall A_i \in A^{\text{II}}$ ,  $i \in N_1$ ,  $N_1 = \{1, 2, \dots, n_1\}$ ,  $n_1$  – число вариантов может включать в себя участки:  $l_{\text{ж}}$  – железнодорожный транспорт,  $l_{\text{м}}$  – морской,  $l_{\text{р}}$  – речной,  $l_{\text{а}}$  – автомобильный. Могут входить узлы перевалок груза, емкости хранения (резервуары, различные терминалы). Считаем, что данные о параметрах:  $l_{\text{ж}}$ ,  $l_{\text{м}}$ ,  $l_{\text{р}}$ ,  $l_{\text{а}}$ ; видов транспорта; терминалах известны.

Заказчик и исполнитель доставки груза всегда выдвигают соблюдения ряда требований. Обозначим их множеством  $\{k_j\}$ ,  $j \in N_2$ ,  $N_2 = \{1, 2, \dots, n_2\}$ ,  $n_2$  – число требований (далее  $k_j$ ), скоростей видов транспорта ( $\frac{\text{км}}{\text{час}}$ ), длины участков  $l$  (км), выполнения работ по выгрузке (загрузке) груза и др. Т.е. критерии могут носить независимый характер и быть противоречивыми, что значительно усложняет процесс выбора рационального варианта  $A_i$  в котором заинтересован исполнитель.

Каждый критерий  $k_j$  имеет величину в своей размерности во всех вариантах  $A_i$ .

#### *Задача экспертного состава*

Представляется информация о  $\forall A_i \in A^{\text{II}}$ ,  $i \in N_1$ ; требования (критерии)  $k_j$ ,  $j \in N_2$  для  $\forall A_i$ ; их величины цены  $C_{ji}$ . Требуется дать оценку каждому варианту доставки груза. По их анализу рекомендовать исполнителю наиболее рациональный вариант доставки груза. Исполнитель может представить свои поправки  $\lambda_{ji}$  (административный ресурс к  $\forall k_j$  в любом варианте  $A_i$  с учетом  $\lambda_{ji}$  процесса выбора повторяется).

Критерии имеют различные технические размерности: время (t), стоимость (руб.).

Рассматривается математическая модель принятия решений в условиях нечеткости исходных данных на примере выбора «лучшего» варианта доставки груза  $M_T$  из пункта  $A^0$  в пункт  $B^0$ , различными техническими комбинированными средствами: железнодорожный, автомобильный, водный. Возможны перевозки груза с использованием терминалов.

Сложность состоит в нечеткости исходных данных, понятие «лучшего» в вариантах доставки. Математическая модель содержит два способа решения. В первом полагается локальная линейность исходных и рассчитываемых данных, во втором учет их локальной кривизны. Решение должно максимально удовлетворять ряд критериев (требований, ограничений и пр.). Данные для сравнения вариантов имеют размерную физическую (техническую) размерность.

Задача по выбору лучших решений из сравниваемых актуальна не только при транспортировке грузов комбинированным транспортом, но и в других отраслях трудовой деятельности и окажет действительную помощь как при оперативном принятии решений, так и глубоком осмыслении рассчитанных данных для предстоящего выбора.

Основная цель настоящей работы найти «лучший» вариант доставки груза  $M_T$  из пункта  $A^0$  в пункт  $B^0$ . Обозначим  $A$  варианты доставки, содержащие участки различного транспорта:  $l_{ж}$  – железнодорожного транспорта,  $l_a$  – автомобильного транспорта,  $l_b$  – водного транспорта, возможны перевалки груза в терминалах. Выделим допустимые варианты  $A^1 \in A$ , готовые к эксплуатации. Обозначим  $A_i \in A^1 \subset A$ ,  $i \in N_1 \neq (1, 2, \dots, n_1)$ , каждый отдельный вариант.

Для выбора «лучшего» варианта  $A_i$  ставится комплексные требования различного характера: стоимость перевозки, времени доставки груза, параметры терминалов, времени перегрузок и т.д. Выполнение параметров назовем критериями  $k_j$ ,  $j \in N_2$ ,  $N_2 = (1, 2, \dots, n_2)$ . Выделим из них основные  $k_j$  и  $k \forall j \in N_2$ , вспомогательные  $k_{j\lambda}$ ,  $\lambda \in N_{3j}$ ,  $N_{3j} = (1, 2, \dots, n_{3j})$ , полагая параметры  $\sum_{\lambda=1}^{n_{3j}} k_{j\lambda} \leq k_j$ .

Для части критериев понятие один «лучше» другого, если его параметры больше  $>$  (например, прибыль). Для другой части «лучше» – значит менее затратный (стоимость, время доставки и др.). Для третьих рост (убыль) безразлична, важна определенность (параметры устойчивости варианта).  $k_j$  делится на три группы. При

выборе лучшего варианта доставки груза, на основные и вспомогательные.

Параметры  $k_{j\lambda}$  представляются в виде прямоугольной матрицы  $\Pi_{j\lambda i}$ , в которой вектор-строка - параметры  $k_{j\lambda}$  в вариантах доставки  $A_i$ ,  $i \in N_1$  имеют одинаковую физическую размерность. Имеет место обычная топология, но с «оглядкой», ибо параметры  $k_j$  в разных вариантах доставки. Вектор-столбцы  $\Pi_{j\lambda}$  отражают значения  $k_{j\lambda}$  в  $\forall A_i \in A^1$ . Значения компонентов имеют разные размерности.

**Формализованная постановка задачи.** Дано:  $A_i \in A^1$ ,  $i \in N_1$ ,  $k_{j\lambda}$ ,  $j \in N_2$ ,  $\lambda \in N_{3j}$ . Требуется найти «лучший» вариант доставки груза  $M_T$  из пункта  $A^0$  в пункт  $B^0$  с более полным удовлетворением  $k_{j\lambda}$ .

В основе математической модели используется представление Тейлора в окрестности достаточно гладкой функции:

$$f(x_0 + x) = f(x_0) + \sum_{s=1}^n \frac{1}{s!} \left. \frac{\lambda^s f(x)}{\lambda x^s} \right|_{x=x_0} x^n + O(x^n). \quad (1)$$

Используем принцип, что многое познается в сравнении.

Сделаем оценки данных  $\Pi_{j\lambda i}$  в «местах»  $M_{j\lambda i}$  для  $\forall j \in N_2$ ,  $\forall \lambda \in N_{3j}$ , в  $\forall i \in N_1$ . Для этого примем математическую модель (конечно-разностный аналог (1)) в виде «трехточки» (составим на 2 способах вычисления  $M_{j\lambda i}$ . Первый предполагает локально-линейные отношения в исходных и вычисленных данных. Второй использует их локальную кривизну. Для упрощения изложения временно опускаем индексы  $j\lambda$ ).

Способ 1. Принят в виде (два члена ряда (1))

$$-a_i M_{i-1} + M_i + (a_i - 1)M_{i+1} = 0, i \in N_1 / (i = 1, i = n_i), \quad (2)$$

где

$$a_i = \frac{\Pi_{i+1} - \Pi_i}{\Pi_{i+1} - \Pi_{i-1}}, \Pi_{i-1} \neq \Pi_i \neq \Pi_{i+1}$$

Коэффициенты  $a_i$  вычисляются, используя исходные данные. Систему рекуррентных отношений (2) замкнем среднеарифметическим отношением со средним значением  $\Pi$ .

$$\sum_{i \in N_2} (M_i - \Pi) = 0 \quad (3)$$

Присуждение количества «мест» часто оценивают по отношению к чему-то. Примем за «эталон»  $M_1 = M^1$ , тогда (2), (3) примет вид



Является решением задача качества  $k_j$  для каждого варианта  $A_i \in A^1$ .

Вернем индекс  $j$ . Вычислены оценки (в местах) для  $\forall j \in N_2, \lambda \in N_3$ , для каждого варианта  $A_i \in A^1, i \in N_1$ , т.е.  $M_{j\lambda i}$  со структурой аналогичной  $\Pi_{j\lambda i}$ . В ней элемент каждой строки выражается только через пару  $(M^j, \Pi^j)$ , в сущности через элементы  $M^j$ .

Способ 2. вычисления  $\bar{M}_{ji}$  (черта сверху для отличия от значений вычисленных по Способу 1) учитывает локальную кривизну исходных и рассчитываемых параметров. Матрица  $\bar{C}$  тоже трехдиагональна (трехточка) имеет вид:

$$\bar{C}\bar{X} = \bar{F} \quad (9)$$

где

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} \beta_2 & Y_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & & & 0 \\ -\lambda_3 & \beta_3 & Y_3 & 0 & 0 & & 0 & & & 0 \\ 0 & -\lambda_4 & \beta_4 & Y_4 & 0 & & & & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & & & \vdots \\ 0 & & & & & \dots & 0 & -\lambda_{n_1-1} & \beta_{n_1-1} & Y_{n_1-1} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} \bar{M}_2^j \\ \bar{M}_3^j \\ \vdots \\ \bar{M}_{n_1}^j \end{pmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{pmatrix} \lambda_2 \bar{M}^j \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ n_1 \bar{\Pi}^j - \bar{M}^j \end{pmatrix}, \quad \bar{M}_1 = \bar{M}^1$$

$$\text{где } \lambda_i = (b_i - a_i), \beta_i = 1 - a_i - b_i, Y_i = 2a_i - 1, b_i = \frac{(u_{i+1} - u_i)^2}{(u_i - u_{i-1})(u_{i+1} - u_{i-1})},$$

$$\Pi_{i-1} \neq \Pi_i \neq \Pi_{i+1}, i \in N_1 / i = 1.$$

Система уравнений (9) является аналогом (три члена ряда (1)) представления Тейлора в обычной топологии. Вычисление  $\bar{M}_{ji}$  про-

ходит аналогично процессу Способа 1. Любая пара  $(M^i, \Pi^i)$  определяет величины  $M_{j\lambda}^i$  для  $\forall j \in N_2, \lambda \in N_{3j}$ . По этим значениям находим лучшее удовлетворение  $k_j$  для  $\forall j \in N_2$  ( $\sup M_{j\lambda}^i$ , или  $\inf M_{j\lambda}^i$  в зависимости, от группы которой отнесен  $k_j$ ). Если экстремумов несколько, то в выбор «лучшего» привлекаются вспомогательные  $k_{j\lambda}, \lambda \in N_{3j}$ .

Предпочтению Способа пока не даем. Заметим: 1) в примерах при  $\Pi_{ji} = \Pi_{ji+1}$  определитель  $I C I$  равен нулю, т.е. для критерия  $k_j$  выбор «лучшего» не определен,  $G = \emptyset$ ; 2) сумма элементов в строках матриц  $C, \bar{C}$  для  $\forall j \in N_1 / i=1, i=n$ , равна нулю. Это является контролем в представлении исходных данных.

Перейдем ко второму формализованному процессу «лучшего» выбора достаточно определить меру во множестве  $\{M_j\}$ , тогда все  $M_{ji}$  определяться, выбор «лучшего» станет очевидным. В численных экспериментах в качестве меры принимаются обыденные отношения.

$$M^j = \frac{\Pi_{ji}}{\Pi_{j_0i}} M^{\lambda_0}, j \in N_2 / j_0 \tag{10}$$

Здесь  $M^{\lambda_0}$  – «эталон»,  $j_0 \in N_2, \Pi_{j_1}, \Pi_{j_2}, \Pi_{j_0i}$  – исходные данные.

Выбирая пару  $(M^{\lambda_0}, \Pi^{\lambda_0}) \in G \neq \emptyset$  фиксируем ее для всех  $k_j, j \in N_2/j_0$ .

Матрица  $M_{j\lambda}^i$  определена с единой мерой, в которой возможен подсчет для  $\forall A_i \in A^1, i \in N_1$  суммы

$$\sum_{j \in N_2} M_{ji} = M^{0i} \tag{11}$$

Для каждой группы критериев обычным способом находится экстремум

$$\text{exct } \{ M^{0i} \} \tag{12}$$

Если лучших вариантов несколько, используются оценки востепенных  $k_{j\lambda}, \lambda \in N_{3j}$ .

### Результаты

Принятая математическая модель (10-12) решает многие логистические задачи по поддержке принятия решений в условиях нечетких исходных данных при выборе объективного варианта перевозки нефтепродуктов, не претендуя на универсальность и охватывает все звенья логистической цепи.

Прикладная направленность представленной системы состоит:

1. В решении основных технологических задач экспертного совета по выбору рационального варианта перевозки груза в условиях нечеткости множеств исходных данных;
2. в представлении расчетных и исходных данных для экспертного совета;
3. в представлении данных устойчивости лучшего варианта  $A_{i_0}$ ,  $i_0 \in N_1$ , из допустимых  $A^{\text{II}}$ ;
4. в представлении математической модели для вычисления оценок  $M_{ji}$  в вариантах доставки груза  $A_i$ ,  $i \in N_1$ ;

Предложенную систему можно использовать в качестве основы компьютерного «тренажера» с функциями оценивания возможных вариантов доставки груза, устойчивости варианта  $A_{i_0}$ ,  $i \in N_1$ , используя вариации параметров исходных данных  $\Pi_{ji}$ ,  $k_{ji}$ ,  $M_{ji}$ ,  $Y_m$  и др.

### **Заключение**

Разработанная математическая модель обладает широким потенциалом применения в транспортной логистике. Математический аппарат может быть использован:

1. в задачах, где исходные данные затруднены в четком освещении (смежные направления, относящиеся как к транспорту, так и иным профильным направлениям).
2. в качестве информационного обеспечения к аналогичной подзадаче выбора рациональных элементов входящих в задачу узлов, т.е. быть вложенной подзадачей в общей задачи рационального выбора доставки груза;
3. для анализа временных параметров и оценки окупаемости принятых решений;
4. для анализа инноваций в их практическом внедрении;
5. в качестве инструмента экспертного анализа - «компьютерного тренажера» по анализу устойчивости принимаемых решений и рациональности в выборе путей достижения цели;
6. с учетом адаптации представленной системы, под различные критерии риска, включая как обстановку на платформе нестабиль-

ных территорий с участием российской стороны и смежных операторов-иноагентов, в целях рационализации транспортных проектов по управлению логистическими процессами;

7. для планирования инфраструктуры (например, размещения нефтяных терминалов) в точках пересечения предполагаемых (гипотетических) и существующих маршрутов для снижения издержек на перспективу развития логистики углеводородного сырья.

В области экспертного совета принимается интуитивный подход, при использовании настоящей модели принимается количественный подход. Представленная математическая модель является системой по принятию объективных решений, учитывающая в том числе транспортные узлы в мультимодальных перевозках. В сущности, членам экспертного совета предлагается найти единую меру на множестве  $M_j$ , т.е. дать значения веса каждому  $M_j$  единого выбранного «эталона» предложенной математической модели. Это повышает обоснованность и объективность выбора рационального варианта доставки груза.

#### *Список литературы*

1. Ляшенко, А. Н. (2024). Формализованная математическая постановка экспертной оценки по принятию решения в сфере мультимодальной логистики. *Транспорт: наука, техника, управление*, (1), 12–17. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-01-2>. EDN: <https://elibrary.ru/PWJXZV>
2. Ляшенко, А. Н. (2022). Постановка задачи принятия решений на нечётком множестве данных в сфере мультимодальных перевозок. *Транспорт Российской Федерации*, (1–2), 6–8. EDN: <https://elibrary.ru/AUKHNO>
3. Ляшенко, А. Н. (2022). Математическая модель принятия решений на нечётком множестве данных в сфере логистики. *Автоматика на транспорте*, 8(2), 188–197. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2022-8-02-188-197>. EDN: <https://elibrary.ru/QOSJLY>
4. Котенко, А. Г. (2014). *Методология риск-ориентированного планирования качественных показателей эксплуатационной работы железных дорог* (Докторская диссертация, Петербургский государственный университет путей сообщения). Санкт-Петербург. 330 с. EDN: <https://elibrary.ru/UXTVCI>
5. Котенко, А. Г. (2011). О подходах к снижению вычислительной сложности логических задач анализа риска. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, (1), 180–188. EDN: <https://elibrary.ru/NTZCGJ>

6. Amro, A. W., & Gkioulos, V. (2022). Communication and cybersecurity tested for autonomous passenger ship. B: *Computer Security. ESORICS 2021 International Workshops* (Vol. 13106, pp. 5–22). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95484-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95484-0_1)
7. Aven, T. (2010). *Misconceptions of risk*. John Wiley and Sons Inc. 248 p.
8. Aven, T. (2008). *Risk analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*. John Wiley and Sons Inc. 204 p.
9. Aven, T., & Vinnem, J. (2007). *Risk management: With application from the offshore petroleum industry*. London, England. 211 p.
10. Beaumont, E. A., & Forester, N. H. (1999). *Exploring for oil and gas trap*. The American Association of Petroleum Geologists. 100 p.
11. Kavallieratos, G., & Katsikas, S. (2020). Managing cyber security risks of the cyber-enabled ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(768), 19 p. <https://doi.org/10.3390/jmse8100768>. EDN: <https://elibrary.ru/XOKTHF>
12. Shapiro, J. F. (2001). *Modeling the supply chain*. Thomson Learning. 586 p.
13. Баранов, Л. А., Иванова, Н. Д., & Михалевич, И. Ф. (2024). Нечёткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта. *Автоматика на транспорте*, 10(1), 7–17. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17>. EDN: <https://elibrary.ru/ULCDOD>
14. Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., et al. (2020). Fuzzy Type-1 triangular membership function approximation using fuzzy C-means. B: *International Conference on Computational Intelligence (ICCI)* (pp. 115–120). <https://doi.org/10.1109/ICCI51257.2020.9247773>
15. Cahyaningrum, Y., Suryono, S., & Warsito, B. (2021). Fuzzy-expert system for indicator and quality evaluation of teaching and learning processes online study programs. B: *The 6th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology, and Information System (ICENIS 2021)* (Vol. 317, 11 p.). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131705021>. EDN: <https://elibrary.ru/LKKOVY>
16. Dubois, D., & Prade, H. (1993). Fuzzy sets and probability: Misunderstandings, bridges and gaps. B: *2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY 1993)* (pp. 1059–1068). IEEE.
17. Kharbanda, V. (2023). Application of artificial intelligence in cybersecurity (IJSP-PC). *Journal*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.4018/ijspcc.318676>
18. Kharchenko, V., Illiashenko, O., Fesenko, H., et al. (2022). AI cybersecurity assurance for autonomous transport systems: Scenario, model, and IMECA-based analysis. B: Dziech, A., Mees, W., & Niemiec, M. (Eds.), *Multimedia communications, services and security. MCSS 2022. Communications in computer and information science* (Vol. 1689, pp. 66–79). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20215-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20215-5_6)

19. Rizvi, S. S., Mitchell, J., Razaque, A., et al. (2020). A fuzzy inference system (FIS) to evaluate the security readiness of cloud service providers. *Journal of Cloud Computing*, 9(1), 17 p. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00164-z>. EDN: <https://elibrary.ru/GKXOAD>
20. Jain, D., Sharma, S. K., & Dhiman, P. (2022). Comparative analysis of defuzzification techniques for fuzzy output. *Journal of Algebraic Statistics*, 13(13), 874–882.
21. Goudosis, A., & Katsikas, S. (2022). Secure automatic identification system (SecAIS): Proof-of-concept implementation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 805. <https://doi.org/10.3390/jmse10060805>. EDN: <https://elibrary.ru/YNIACE>
22. Chalco-Cano, Y., Lodwick, W. A., & Bede, B. (2014). Single level constraint interval arithmetic. *Fuzzy Sets and Systems*, 257, 146–168. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2014.06.017>
23. Dubois, D., & Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers. *International Journal of Systems Science*, 9(6), 613–626.
24. Klir, G. J. (1997). Fuzzy arithmetic with requisite constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 91, 165–175.
25. Lodwick, W. A. (1999). Constrained interval arithmetic. *CCM Report*, 138, 1–11.
26. Nagoor Gani, A., & Mohamed Assarudeen, S. N. (2012). New operation on triangular fuzzy number for solving fuzzy linear programming problem. *Applied Mathematical Sciences*, 11, 525–532. <https://doi.org/10.13140/2.1.3405.8881>
27. Piegat, A. (2001). *Fuzzy modeling and control*. Springer-Verlag. 728 p.

### References

1. Lyashenko, A. N. (2024). Formalized mathematical formulation of expert assessment for decision-making in multimodal logistics. *Transport: Science, Technology, Management*, (1), 12–17. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-01-2>. EDN: <https://elibrary.ru/PWJXZV>
2. Lyashenko, A. N. (2022). Formulation of the decision-making problem on a fuzzy data set in multimodal transportation. *Transport of the Russian Federation*, (1–2), 6–8. EDN: <https://elibrary.ru/AUKHNO>
3. Lyashenko, A. N. (2022). Mathematical model of decision-making on a fuzzy data set in logistics. *Automation in Transport*, 8(2), 188–197. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2022-8-02-188-197>. EDN: <https://elibrary.ru/QOSJLY>
4. Kotenko, A. G. (2014). *Methodology of risk-oriented planning of quality indicators for railway operational performance* (Doctoral dissertation, Petersburg State Transport University). Saint Petersburg. 330 p. EDN: <https://elibrary.ru/UXTVCI>
5. Kotenko, A. G. (2011). On approaches to reducing the computational complexity of logical risk analysis problems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, (1), 180–188. EDN: <https://elibrary.ru/NTZCGJ>

6. Amro, A. W., & Gkioulos, V. (2022). Communication and cybersecurity tested for autonomous passenger ship. B: *Computer Security. ESORICS 2021 International Workshops* (Vol. 13106, pp. 5–22). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95484-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95484-0_1)
7. Aven, T. (2010). *Misconceptions of risk*. John Wiley and Sons Inc. 248 p.
8. Aven, T. (2008). *Risk analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*. John Wiley and Sons Inc. 204 p.
9. Aven, T., & Vinnem, J. (2007). *Risk management: With application from the offshore petroleum industry*. London, England. 211 p.
10. Beaumont, E. A., & Forester, N. H. (1999). *Exploring for oil and gas trap*. The American Association of Petroleum Geologists. 100 p.
11. Kavallieratos, G., & Katsikas, S. (2020). Managing cyber security risks of the cyber-enabled ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(768), 19 p. <https://doi.org/10.3390/jmse8100768>. EDN: <https://elibrary.ru/XOKTHF>
12. Shapiro, J. F. (2001). *Modeling the supply chain*. Thomson Learning. 586 p.
13. Баранов, Л. А., Иванова, Н. Д., & Михалевич, И. Ф. (2024). Нечёткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта. *Автоматика на транспорте*, 10(1), 7–17. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17>. EDN: <https://elibrary.ru/ULCDOD>
14. Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., et al. (2020). Fuzzy Type-1 triangular membership function approximation using fuzzy C-means. B: *International Conference on Computational Intelligence (ICCI)* (pp. 115–120). <https://doi.org/10.1109/ICCI51257.2020.9247773>
15. Cahyaningrum, Y., Suryono, S., & Warsito, B. (2021). Fuzzy-expert system for indicator and quality evaluation of teaching and learning processes online study programs. B: *The 6th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology, and Information System (ICENIS 2021)* (Vol. 317, 11 p.). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131705021>. EDN: <https://elibrary.ru/LKKOVY>
16. Dubois, D., & Prade, H. (1993). Fuzzy sets and probability: Misunderstandings, bridges and gaps. B: *2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY 1993)* (pp. 1059–1068). IEEE.
17. Kharbanda, V. (2023). Application of artificial intelligence in cybersecurity (IJSP-PC). *Journal*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.4018/ijspcc.318676>
18. Kharchenko, V., Illiashenko, O., Fesenko, H., et al. (2022). AI cybersecurity assurance for autonomous transport systems: Scenario, model, and IMECA-based analysis. B: Dziech, A., Mees, W., & Niemiec, M. (Eds.), *Multimedia communications, services and security. MCSS 2022. Communications in computer and information science* (Vol. 1689, pp. 66–79). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20215-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20215-5_6)

19. Rizvi, S. S., Mitchell, J., Razaque, A., et al. (2020). A fuzzy inference system (FIS) to evaluate the security readiness of cloud service providers. *Journal of Cloud Computing*, 9(1), 17 p. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00164-z>. EDN: <https://elibrary.ru/GKXOAD>
20. Jain, D., Sharma, S. K., & Dhiman, P. (2022). Comparative analysis of defuzzification techniques for fuzzy output. *Journal of Algebraic Statistics*, 13(13), 874–882.
21. Goudosis, A., & Katsikas, S. (2022). Secure automatic identification system (SecAIS): Proof-of-concept implementation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 805. <https://doi.org/10.3390/jmse10060805>. EDN: <https://elibrary.ru/YNIACE>
22. Chalco-Cano, Y., Lodwick, W. A., & Bede, B. (2014). Single level constraint interval arithmetic. *Fuzzy Sets and Systems*, 257, 146–168. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2014.06.017>
23. Dubois, D., & Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers. *International Journal of Systems Science*, 9(6), 613–626.
24. Klir, G. J. (1997). Fuzzy arithmetic with requisite constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 91, 165–175.
25. Lodwick, W. A. (1999). Constrained interval arithmetic. *CCM Report*, 138, 1–11.
26. Nagoor Gani, A., & Mohamed Assarudeen, S. N. (2012). New operation on triangular fuzzy number for solving fuzzy linear programming problem. *Applied Mathematical Sciences*, 11, 525–532. <https://doi.org/10.13140/2.1.3405.8881>
27. Piegat, A. (2001). *Fuzzy modeling and control*. Springer-Verlag. 728 p.

#### ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

**Ляшенко Антон Николаевич**, ведущий консультант

*Министерство экономического развития России*

*Пресненская наб., 10, стр. 2, г. Москва, 123112, Российская Федерация*

*an-lyashenko@yandex.ru*

#### DATA ABOUT THE AUTHOR

**Anton N. Lyashenko**, Lead Consultant

*Ministry of Economic Development of the Russian Federation*

*10, build. 2, Presnenskaya Embankment, Moscow, 123112, Russian Federation*

*an-lyashenko@yandex.ru*

*SPIN-code: 4607-2567*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4609-5554>*

Поступила 11.02.2026

После рецензирования 10.03.2026

Принята 13.03.2026

Received 11.02.2026

Revised 10.03.2026

Accepted 13.03.2026

## Информационные технологии в транспортной отрасли / Information Technologies in the Transportation Industry

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-415](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-415)

EDN: [LNOOIG](https://www.edn.org/LNOOIG)



УДК 004.9:656

### Исследование архитектуры low-code платформы гибридного интеллекта с внедрением метода Kanban для поддержки принятия решений в управлении перевозками

А.Е. Кривоногова, А.Г. Исавин

*Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского)  
федерального университета, Набережные Челны, Российская Федерация*

#### *Аннотация*

**Обоснование.** В статье рассматривается проблема недостаточной функциональности существующих low-code платформ в части поддержки принятия решений при управлении грузовыми перевозками. Показано, что рост объемов транспортной работы в РФ (на 5,5% в 2024 г.) при одновременном увеличении доли коротких маршрутов и остром кадровом дефиците (нехватка порядка 1 млн специалистов) формирует потребность в новых подходах к автоматизации диспетчерского управления. Установлено, что современные low-code платформы ориентированы преимущественно на учетно-регистрационные функции и не интегрируют алгоритмы оптимизации с инструментами визуализации, а используемые изолированно kanban-доски не обеспечивают замкнутого контура обучения на основе экспертных решений.

**Цель** – разработка и исследование архитектуры low-code платформы гибридного интеллекта, интегрирующей kanban-доски для визуализации статусов перевозок и поддержки принятия решений диспетчером

**Материалы и методы.** В ходе работы применен системный анализ для выявления функциональных пробелов существующих решений. Проектирование архитектуры выполнено с использованием модульного подхода и нотации моделирования бизнес-процессов BPMN 2.0. Для верификации предложенных решений использован метод кейс-стади на примере региональной транспортной компании.

**Результаты.** В данной статье предложена трёхслойная архитектура, включающая уровень low-code конфигурации (kanban-доска с WIP-лимитами, визуальный редактор маршрутов), уровень гибридного интеллекта (ML-модуль оптимизации, LLM-модуль генерации объяснений, оркестратор решений, модуль имитационного моделирования) и уровень данных и интеграции.

**Ключевые слова:** low-code платформа; гибридный интеллект; kanban-доска; поддержка принятия решений; управление перевозками; TMS; машинное обучение; имитационное моделирование

**Для цитирования.** Кривоногова, А. Е., & Исавнин, А. Г. (2026). Исследование архитектуры low-code платформы гибридного интеллекта с внедрением метода Kanban для поддержки принятия решений в управлении перевозками. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 132–149. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-415>

## Research on the architecture of a low-code platform for hybrid intelligence with the implementation of the Kanban method for decision support in transportation management

A.E. Krivonogova, A.G. Isavnin

*Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute,  
Naberezhnye Chelny, Russian Federation*

### *Abstract*

**Background.** The article examines the problem of insufficient functionality of existing low-code platforms in terms of decision support for freight transportation management. It is shown that the growth in freight traffic volume in the Russian Federation (by 5.5% in 2024), coupled with an increase in the share of short-haul routes and an acute personnel shortage (a deficit of about 1 million specialists), creates a need for new approaches to the automation of dispatching management. It has been established that modern low-code platforms are primarily focused on accounting and registration functions and do not integrate optimization algorithms with visualization tools, while Kanban boards, used in isolation, do not provide a closed-loop learning system based on expert decisions.

**Purpose.** Development and research of the architecture of a low-code platform with hybrid intelligence that integrates Kanban boards for visualizing transportation statuses and supporting dispatcher decision-making.

**Materials and methods.** The study employed a systems analysis approach to identify functional gaps in existing solutions. The architecture was designed using a modular approach and the BPMN 2.0 business process modeling notation. A case study method involving a regional transport company was used to verify the proposed solutions.

**Results.** This article proposes a three-layer architecture that includes a low-code configuration layer (a Kanban board with WIP limits, a visual route editor), a hybrid intelligence layer (an ML optimization module, an LLM explanation generation module, a decision orchestrator, a simulation modeling module), and a data and integration layer.

**Keywords:** low-code platform; hybrid intelligence; Kanban board; decision support; transportation management; TMS; machine learning; simulation modeling

**For citation.** Krivonogova, A. E., & Isavnin, A. G. (2026). Research on the architecture of a low-code platform for hybrid intelligence with the implementation of the Kanban method for decision support in transportation management. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 132–149. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-415>

## Введение

Современный рынок транспортных услуг в России демонстрирует устойчивую положительную динамику, характеризующуюся ростом объемов грузоперевозок на фоне возрастающей сложности операционной среды. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, по итогам 2024 года совокупный объем перевозок всеми видами транспорта составил 9,4 млрд тонн, что на 5,5% превышает показатель предыдущего года. Наиболее интенсивный рост зафиксирован в сегменте автомобильных перевозок, где объем увеличился на 8,3%, достигнув доли в 74% от общего объема [1]. При этом грузооборот вырос лишь на 0,4%, что косвенно указывает на увеличение доли коротких и средних маршрутов, характеризующихся высокой степенью вариативности условий перевозки [1]. Данная тенденция объективно повышает требования к адаптивности бизнес-логики систем поддержки принятия решений. В условиях цифровой трансформации экономики совершенствование управления транспортными процессами ста-

новится ключевым ориентиром для менеджмента, требуя новых подходов к организации перевозок. [2]. Особую значимость цифровая трансформация приобретает в сфере региональных перевозок, где требуется адаптация общих решений к специфике локальных условий и ограничений [3].

Параллельно с ростом рыночной динамики отрасль столкнулась с острым кадровым дефицитом. По оценкам экспертного сообщества, дефицит квалифицированных кадров в сферах транспортировки, складской обработки и управления цепями поставок достигает порядка 1 млн человек, включая нехватку разработчиков профильного программного обеспечения [4]. В сложившихся обстоятельствах традиционная парадигма разработки и последующей адаптации специализированного ПО становится критическим ограничением, поскольку высокая инерционность процесса внесения изменений в программный код (измеряемая месяцами) вступает в противоречие с потребностью бизнеса в оперативной настройке алгоритмов диспетчеризации.

### **Ограниченность существующих low-code решений**

В качестве одного из направлений снижения зависимости от дефицитных ИТ-кадров рассматривается применение low-code платформ (Mendix, Microsoft Power Apps, отечественная SimpleOne и др.), которые позволяют создавать и модифицировать приложения без написания программного кода силами специалистов предметной области [5]. Однако их архитектура изначально ориентирована преимущественно на автоматизацию документооборота и учётных функций, а не на поддержку принятия решений в логистике. Управление перевозками требует синтеза алгоритмических решений – оптимизации маршрутов с учётом динамических ограничений, прогнозирования времени в пути – и экспертных знаний диспетчеров, владеющих неформализованной информацией о местной инфраструктуре, сезонных факторах и предпочтениях клиентов. Отсутствие встроенных механизмов гибридного интеллекта, объединяющего машинные вычисления и человеческую

экспертизу, приводит к дублированию функций: оформление заказов осуществляется в платформе, но ключевые решения по-прежнему принимаются вручную, что снижает эффективность и увеличивает риски ошибок [6; 7]. При этом современные исследования демонстрируют эффективность применения гибридных объяснимых моделей машинного обучения для решения транспортных задач, включая прогнозирование рисков и поддержку принятия решений [20; 21].

Дополнительным вызовом является необходимость визуализации потока заказов и контроля загрузки диспетчеров. Инструменты, основанные на методологии kanban, хорошо зарекомендовали себя в производственных системах для ограничения незавершённого производства (WIP-лимиты) и наглядного представления статусов задач [8]. Однако в существующих low-code решениях kanban-доски либо отсутствуют, либо реализованы изолированно от алгоритмов оптимизации и не сохраняют экспертные решения для последующего обучения моделей.

### **Исследование существующих программных решений**

При анализе конкурентных решений были выявлены следующие системы, сочетающие принципы low-code разработки и технологии искусственного интеллекта для автоматизации транспортной логистики [9].

ITG Transportation Logistics Management System – система управления транспортной логистикой, разработанная корпорацией ITG на базе отечественной low-code платформы SimpleOne и представленная в 2025 г. Решение охватывает полный цикл управления перевозками: от приёма заявки до взаиморасчётов и аналитических [10]. К преимуществам данного решения относится реализация на low-code платформе, что позволяет адаптировать систему под специфику бизнеса без глубокого программирования, а также включение современных концепций: «умное прогнозирование» «ситуационный центр», «диспетчерская башня» (Control Tower). Недостатками являются: отсутствие данных о механизмах объяс-

нения решений и сохранении экспертных поправок, система не сохраняет решения диспетчера для дообучения моделей, отсутствует встроенная kanban-визуализация потока работ с WIP-лимитами [15].

Logtech AI-Driven No-Code iPaaS – интеграционная платформа как сервис (iPaaS), ориентированная на транспортную логистику и позволяющая подключать перевозчиков, клиентов и ERP-системы без участия разработчиков. К преимуществам относится: no-code подход, позволяющий операционным командам самостоятельно настраивать интеграции с помощью AI-инструментов [18]. Недостатки и ограничения: платформа решает исключительно задачи интеграции и не содержит модулей оптимизации маршрутов или прогнозирования; отсутствуют механизмы визуализации потока заказов (kanban) и поддержки принятия решений диспетчером; AI применяется только для автоматизации создания интеграций, но не для анализа данных или рекомендаций [19].

Тераплан – low-code платформа для оптимизации бизнес-процессов, включающая алгоритмы линейного и целочисленного программирования, машинного обучения и эвристики. Применяется для планирования цепочек поставок, маршрутизации и управления транспортом. Преимущества: включена в Единый реестр российского ПО, что гарантирует соответствие требованиям импортозамещения; реализует оптимизацию маршрутов и сценарное моделирование («что-если») на основе математических методов; поддерживает выявление узких мест в цепочках поставок. Недостатки и ограничения: отсутствует встроенная low-code визуализация бизнес-процессов (kanban-доски, конструкторы форм) – настройка требует участия специалистов; нет механизмов объяснения рекомендаций (XAI – Explainable AI) и сохранения экспертных решений для дообучения моделей; ориентирована на стратегическое планирование, а не на оперативное управление перевозками в реальном времени.

Таблица 1.

**Сравнение ITG TMS, ILogtech, ТЕРАПЛАН  
и разрабатываемой архитектурой**  
Table 1. Comparison of ITG TMS, ILogtech, TERAPLAN,  
and the architecture under development

<b>Критерий</b>	<b>ITG TMS</b>	<b>ILogtech</b>	<b>Тераплан</b>	<b>Ваша система</b>
Low-code адаптация без программирования	Настройка через low-code SimpleOne без программирования	No-code для интеграций (настройка операционными командами).	Требует специалистов для настройки процессов и форм.	Визуальные редакторы маршрутов, правил и канбан-доска – для бизнес-пользователей
Алгоритмическая оптимизация маршрутов	Умное прогнозирование	Только интеграция, модулей оптимизации нет.	Линейное программирование, эвристики, ML.	ML-модуль учитывает временные окна, грузоподъёмность, дорожные события.
LLM-подсказки (XAI)	Нет объяснения решений.	AI только для интеграций.	Нет Explainable AI.	LLM поясняет рекомендации на естественном языке (XAI).
Сохранение решений для дообучения	Не сохраняет действия диспетчера	Не применимо.	Нет механизма сохранения правок.	Оркестратор фиксирует выбор диспетчера → данные идут в дообучение моделей.
kanban с WIP-лимитами	Отсутствует.	Нет визуализации заказов.	Нет low-code kanban.	kanban-доска с колонками статусов и настройкой WIP-лимитов.
Ориентация на оперативное управление	Диспетчерская башня, контроль в реальном времени.	Быстрый обмен данными, но без поддержки решений.	Стратегическое планирование, не real-time.	Реальное время: GPS/ГЛОНАСС, ручная корректировка на карте, обновление статусов.
Архитектура	Монолитная TMS на low-code платформе.	Облачная интеграционная шина (iPaaS).	Платформа оптимизации + BPM.	Трёхслойная

Как видно из таблицы 1, ни одно из существующих решений не обладает полным набором необходимых функций, что подтверждает актуальность разработки предлагаемой архитектуры.

### **Функциональное моделирование системы поддержки принятия решений (СППР) и ее концептуальная модель.**

Предлагаемая архитектура (рис. 3) построена по трёхслойному принципу, что обеспечивает разделение ответственности между пользовательскими интерфейсами, модулями интеллектуальной обработки и источниками внешних данных.

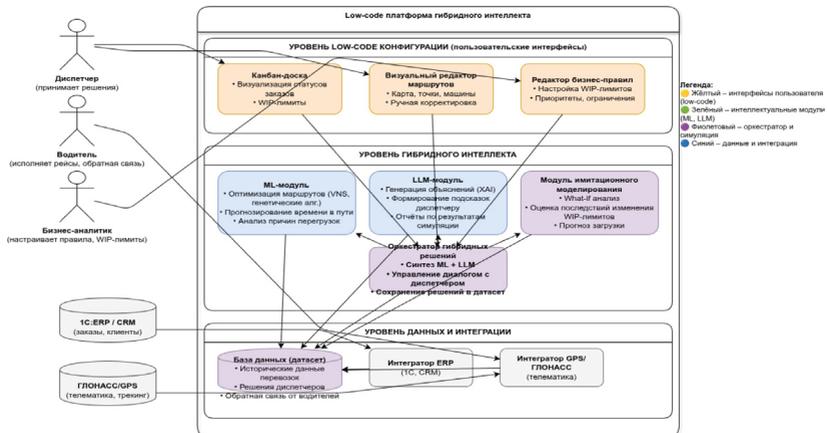
Верхний уровень платформы образуют пользовательские интерфейсы, реализованные в парадигме low-code. kanban-доска визуализирует статусы заказов по колонкам «Новые», «В планировании», «Назначено», «В пути», «Доставлено» и поддерживает настройку WIP-лимитов для контроля загрузки диспетчеров. Визуальный редактор маршрутов позволяет диспетчеру корректировать маршруты на карте, изменять порядок следования точек и выбирать тип транспортного средства. Редактор бизнес-правил предоставляет аналитику возможность задавать приоритеты обработки и ограничения без участия разработчиков.

Средний уровень реализует концепцию гибридного интеллекта [17]. ML-модуль выполняет оптимизацию маршрутов с учётом временных окон, грузоподъёмности и дорожных событий, формируя альтернативные варианты с числовыми метриками. LLM-модуль преобразует эти данные в пояснения на естественном языке, понятные диспетчеру. Оркестратор координирует взаимодействие модулей, передаёт рекомендации пользователю, фиксирует его выбор и сохраняет решения в набор данных. Модуль имитационного моделирования обеспечивает анализ сценариев «что-если», позволяя прогнозировать последствия изменения параметров, например WIP-лимитов [11].

Нижний уровень отвечает за хранение данных и интеграцию с внешними системами. База данных содержит исторические записи о перевозках, решения диспетчеров и обратную связь от водителей, которые используются для обучения и дообучения моделей. Интегратор ERP обеспечивает двусторонний обмен данными с учётными системами. Интегратор GPS/ГЛОНАСС принимает

данные телематики в реальном времени для уточнения прогнозов и актуализации статусов. Такой подход к интеграции потоковых данных с IoT-устройств соответствует современным тенденциям развития концепции «умных городов», где синергия искусственного интеллекта и Интернета вещей играет ключевую роль в управлении транспортными системами [21].

Взаимодействие компонентов организовано следующим образом: заказ из ERP поступает на kanban-доску. Диспетчер через оркестратор запрашивает варианты маршрута у ML-модуля, после чего LLM-модуль генерирует пояснения, и рекомендация возвращается пользователю. Принятое решение сохраняется в наборе данных, а статус заказа на доске обновляется. Данные от водителей и результаты имитационного моделирования замыкают контур гибридного интеллекта, обеспечивая дообучение моделей [12].



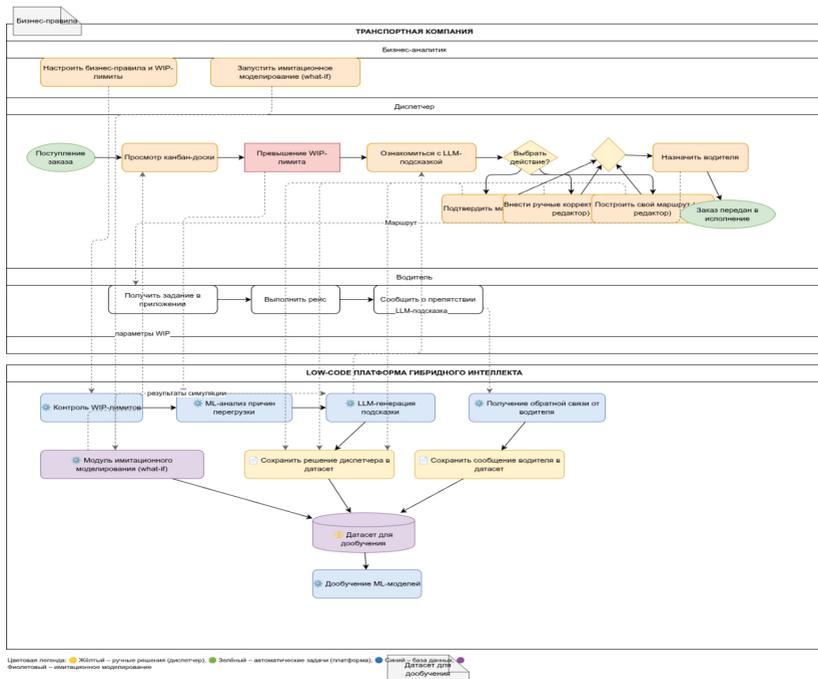
**Рис. 1.** Архитектура low-code платформы гибридного интеллекта для управления перевозками

**Fig. 1.** Architecture of a low-code hybrid intelligence platform for transportation management

Для визуализации взаимодействия участников и компонентов разработанной платформы построена диаграмма бизнес-процесса в нотации BPMN 2.0 (рис. 2) [13; 16]. Процесс разделён на два

пула: «Транспортная компания» (дорожки бизнес-аналитика, диспетчера и водителя) и «Low-code платформа гибридного интеллекта» (автоматизированные сервисные задачи).

Процесс инициируется поступлением заказа, который отображается на kanban-доске диспетчера. Бизнес-аналитик настраивает бизнес-правила и WIP-лимиты, а также может запускать имитационное моделирование для оценки последствий изменений.



**Рис. 2.** Моделирование бизнес-процесса управления перевозками  
**Fig. 2.** Modeling the transportation management business process

При превышении WIP-лимита система генерирует событие-триггер, запускающее цепочку задач: ML-модуль анализирует причины перегрузки, LLM-модуль формирует подсказку, которая возвращается диспетчеру. На этапе принятия решения диспетчер может подтвердить предложенный маршрут, скорректировать его

в визуальном редакторе или построить маршрут с нуля. Принятое решение сохраняется в наборе данных, статус заказа на kanban-доске обновляется, и заказ передаётся водителю.

Водитель выполняет рейс и при возникновении нештатных ситуаций отправляет сообщение о препятствии, которое также сохраняется в наборе данных. Накопленные данные периодически используются для дообучения ML-моделей, что замыкает контур гибридного интеллекта [12] и повышает качество рекомендаций.

Для удобства отслеживания предусмотрена kanban-доска, которая отслеживает статуса перевозок и нагруженность системы в реальном времени.

**Канбан-доска управления перевозками**



**Рис. 3.** Kanban-доска для управления перевозками  
**Fig. 3.** Kanban board for transportation management

## Результаты и обсуждение

В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты. Разработана трёхслойная архитектура low-code платформы гибридного интеллекта для поддержки принятия решений в управлении перевозками, интегрирующая kanban-доски с WIP-лимитами. Предложенная архитектура (рисунок 1) включает уровень low-code конфигурации (kanban-доска, визуальный ре-

дактор маршрутов, редактор бизнес-правил), уровень гибридного интеллекта (ML-модуль оптимизации, LLM-модуль генерации объяснений, оркестратор решений, модуль имитационного моделирования) и уровень данных и интеграции [14].

Для визуализации взаимодействия компонентов и участников процесса построена диаграмма бизнес-процесса в нотации BPMN 2.0 (рисунок 2). Модель наглядно демонстрирует замкнутый контур гибридного интеллекта: система автоматически выявляет превышение WIP-лимитов, анализирует причины (ML-модуль), генерирует понятную диспетчеру подсказку (LLM-модуль), фиксирует его решение и сохраняет его в набор данных для последующего дообучения моделей. Обратная связь от водителей также поступает в набор данных, замыкая цикл обучения.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку прототипа платформы и его внедрение в одном из региональных транспортных предприятий, а также на расширение функционала за счёт интеграции с цифровыми двойниками транспортных систем и поддержки мультимодальных перевозок.

### **Заключение**

В ходе выполненного исследования решена актуальная научно-практическая задача, заключающаяся в разработке архитектуры low-code платформы гибридного интеллекта для поддержки принятия решений в управлении перевозками. Проведённый анализ подтвердил, что существующие low-code решения ориентированы преимущественно на учётные функции и не обеспечивают интеграции алгоритмов оптимизации с инструментами визуализации и механизмами сохранения экспертного опыта, что ограничивает их применение в условиях роста объёмов перевозок и кадрового дефицита. Научная новизна работы заключается в разработке архитектуры, реализующей замкнутый контур гибридного интеллекта в предметной области управления перевозками, где экспертные решения диспетчеров не просто учитываются, а ста-

новятся источником данных для непрерывного улучшения ML-моделей. Практическая значимость состоит в возможности создания на базе предложенной архитектуры отечественных low-code платформ, способных снизить зависимость логистических компаний от дефицитных ИТ-кадров и повысить эффективность диспетчерского управления.

**Описание применения генеративной модели.** Во время подготовки статьи мы использовали чат-бот OpenAI ChatGPT с целью лингвистической доработки текста аннотации на английском языке, перевода названий русскоязычных публикаций для раздела «Список литературы». Инструмент ИИ применялся исключительно для редактирования текста (стилистическая и грамматическая правка) и выполнения библиографических задач (перевод названий). Генерация и редактирование изображений не производились. Конфиденциальные данные не обрабатывались с помощью ИИ. Авторы самостоятельно выполнили все научные исследования, разработали методологию, провели анализ данных и сформулировали выводы. Ответственность за содержание рукописи несут авторы.

#### *Список литературы*

1. ТАСС. (2025, 7 февраля). Перевозки грузов транспортом в РФ за 2024 год выросли на 5,5 %. Получено 16 февраля 2026 г., с: <https://tass.ru/ekonomika/23084489>.
2. Ковалева, Н. А., & Муленко, О. В. (2020). Логистика в организации автомобильных перевозок грузов с использованием современных информационных систем. В: *Транспорт: наука, образование, производство: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции* (Т. 3, с. 140–144). Ростовский государственный университет путей сообщения. EDN: <https://elibrary.ru/XDSHDA>
3. Лозовая, О. В. (2020). Оптимизация работы органов управления автотранспортными перевозками в регионе. В: *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий: Сборник V Всероссийской (национальной) научной конференции* (с. 411–414). Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос». EDN: <https://elibrary.ru/KLIWCR>

4. Известия. (2025, 10 августа). Логистической отрасли не хватает порядка миллиона сотрудников. Получено 16 февраля 2026 г., с: <https://iz.ru/1753365/2025-08-10/logicheskoi-otrasli-ne-khvataet-poriadka-milliona-sotrudnikov>
5. Яковлев, Г. С., & Иванов, Ф. Ф. (2020). Использование low-code платформ при переходе на процессный подход в создании автоматизированных систем. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 30(1), 120–126. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2020-30-1-120-126>. EDN: <https://elibrary.ru/TDGZHM>
6. Рыжов, А. П. (2022). Проблемы разработки систем гибридного интеллекта. *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*, 26(1), 385–389. EDN: <https://elibrary.ru/SRPFHY>
7. Мухтар, А. Ш., & Тимофеева, Г. А. (2025). Оптимизация транспортных маршрутов в развивающихся странах на основе графовых моделей. *Вестник науки*, 5(6-1(87)), 1019–1027. EDN: <https://elibrary.ru/WTBYSH>
8. Батина, М. Ю., & Торосян, Е. К. (2023). Особенности проектного управления в логистике. В: *XII Конгресс молодых учёных: Сборник научных трудов* (с. 82–85). Национальный исследовательский университет ИТМО. EDN: <https://elibrary.ru/ADEVCK>
9. Пряничников, И. С., Антонов, М. А., & Никонова, Я. И. (2022). Применение цифровых технологий в транспортно-логистической отрасли. В: *Социальные и гуманитарные науки в условиях вызовов современности: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием* (Т. 1, с. 248–251). Комсомольский-на-Амуре государственный университет. EDN: <https://elibrary.ru/COSKSF>
10. Панайотов, К. К., & Панайотова, А. Н. (2025). Актуальные проблемы оптимизации грузовых автоперевозок с использованием методов имитационного моделирования. В: *Новые исследования новой эпохи. Опыт теоретического и эмпирического анализа* (с. 28–52). Международный центр научного партнёрства «Новая Наука». EDN: <https://elibrary.ru/MRIDCU>
11. Никифорович, А. А., & Зарипова, Р. С. (2022). Использование имитационного моделирования для управления транспортными потоками. В: *Наука и творчество: вклад молодёжи. Сборник материалов Всероссийской молодёжной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (с. 239–242). Типография ФОРМАТ. EDN: <https://elibrary.ru/KXGPNH>
12. Таишева, Г. Р., & Гимадеев, Р. А. (2023). Использование систем поддержки принятия решений в задачах бизнес-планирования логистических процессов. *Russian Economic Bulletin*, 6(3), 338–342. EDN: <https://elibrary.ru/EUTMJP>
13. Чижиков, Д. Д. (2025). Внедрение инструментов оптимизации бизнес-процессов. *Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права*,

- (2), 137–150. <https://doi.org/10.21295/2223-5639-2025-2-137-150>. EDN: <https://elibrary.ru/CKFVMN>
14. Казаков, О. Д., & Азаренко, Н. Ю. (2020). Комбинирование методов машинного обучения и имитационного моделирования социально-экономических процессов в системах поддержки принятия решений. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, (71), 97–107. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-71-97-107>. EDN: <https://elibrary.ru/NZTTJF>
15. Anggoro, K., & Angga Negoro, D. (2023). Kanban Digital dan Real-Time Reporting untuk Production Planning Control. *Cakrawala Repositori IMWI*, 6(1), 75–84. <https://doi.org/10.52851/cakrawala.v6i1.183>. EDN: <https://elibrary.ru/VOXDGG>
16. Rakayeva, A. N. (2024). Optimizing Business Processes with AI, BPMN 2.0, and Workflow Management Systems. *Ekonomicheskaya seriya Vestnika ENU im. L.N. Gumileva [Economic Series of the L.N. Gumilyov ENU Bulletin]*, (4), 129–142. <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2024-4-129-142>. EDN: <https://elibrary.ru/VWWZIJ>
17. Research on the Human-machine Hybrid Decision-making Strategy Basing on the Hybrid-augmented Intelligence. (2025). *Jixie Gongcheng Xuebao [Journal of Mechanical Engineering]*, 61(10), 288. <https://doi.org/10.3901/jme.2025.10.288>. EDN: <https://elibrary.ru/VSEKQE>
18. Kavka, L., Kodym, O., & Cempirek, V. (2018). Smart units in control of logistics processes. B: *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018: Conference proceedings* (Vol. 18, pp. 701–708). STEF92 Technology. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/2.1/S07.089>. EDN: <https://elibrary.ru/GHXNIG>
19. Miasnikov, D., & Mikhajlov, F. (2025). Digital technologies in the personnel management system in conditions of personnel shortage. B: *Proceedings of the International Scientific Conference “Digital Future: Science, Education, and Innovative Development of Socio-Economic Systems”* (Samara, 23–24 мая 2025 года) (Vol. 1552, pp. 153–160). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99598-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99598-9_23). EDN: <https://elibrary.ru/PHJZZG>
20. Isavnin, A., Kosorukova, I., Madaminov, I., Laxmi, L., & Satapathy, S. (2024). Analysis of banking and financial sector services using artificial intelligence (AI). *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1056, 121–128. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4892-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4892-1_10). EDN: <https://elibrary.ru/FKAZEY>
21. Begishev, I., Isavnin, A., Nedelkin, A., Lydia, L. E., & Kumar, K. V. (2024). AI and IoT in smart cities: A methodology, transformation, and challenges. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1057, 305–318. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2_25). EDN: <https://elibrary.ru/FROVWX>

### References

1. TASS. (2025, February 7). Freight transportation in the Russian Federation increased by 5.5 % in 2024. Retrieved February 16, 2026, from: <https://tass.ru/ekonomika/23084489>.
2. Kovaleva, N. A., & Mulenko, O. V. (2020). Logistics in organizing road freight transportation using modern information systems. In *Transport: science, education, production: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Vol. 3, pp. 140–144). Rostov State Transport University. EDN: <https://elibrary.ru/XDSHDA>
3. Lozovaya, O. V. (2020). Optimizing the work of road transport management bodies in the region. In *The role of agricultural science in sustainable rural development: Proceedings of the 5th All-Russian (national) scientific conference* (pp. 411–414). Publishing Center of Novosibirsk State Agrarian University “Zolotoy Kolos”. EDN: <https://elibrary.ru/KLIWCR>
4. Izvestia. (2025, August 10). The logistics industry lacks about one million employees. Retrieved February 16, 2026, from: <https://iz.ru/1753365/2025-08-10/logisticheskoi-otrasli-ne-khvataet-poriadka-milliona-sotrudnikov>
5. Yakovlev, G. S., & Ivanov, F. F. (2020). Using low-code platforms when transitioning to a process-based approach in developing automated systems. *Bulletin of the KRAUNTS. Physical and Mathematical Sciences*, 30(1), 120–126. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2020-30-1-120-126>. EDN: <https://elibrary.ru/TDGZHM>
6. Ryzhov, A. P. (2022). Problems of developing hybrid intelligence systems. *Intelligent Systems. Theory and Applications*, 26(1), 385–389. EDN: <https://elibrary.ru/SRPFHY>
7. Mukhtar, A. Sh., & Timofeeva, G. A. (2025). Optimizing transport routes in developing countries using graph models. *Bulletin of Science*, 5(6-1(87)), 1019–1027. EDN: <https://elibrary.ru/WTBYSH>
8. Batina, M. Yu., & Torosyan, E. K. (2023). Features of project management in logistics. In *12th Congress of Young Scientists: Proceedings* (pp. 82–85). ITMO National Research University. EDN: <https://elibrary.ru/ADEVCC>
9. Pryanichnikov, I. S., Antonov, M. A., & Nikonova, Ya. I. (2022). Applying digital technologies in the transport and logistics industry. In *Social and humanities in the face of modern challenges: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Researchers with International Participation* (Vol. 1, pp. 248–251). Komsomolsk-on-Amur State University. EDN: <https://elibrary.ru/COSKSF>
10. Panayotov, K. K., & Panayotova, A. N. (2025). Current issues of optimizing freight road transportation using simulation modeling methods. In *New research of the new*

- era. Experience of theoretical and empirical analysis* (pp. 28–52). International Center for Scientific Partnership “New Science”. EDN: <https://elibrary.ru/MRIDCU>
11. Nikiforovich, A. A., & Zaripova, R. S. (2022). Using simulation modeling to manage transport flows. In *Science and creativity: youth's contribution: Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Researchers* (pp. 239–242). Format Printing House. EDN: <https://elibrary.ru/KXGPOH>
  12. Taisheva, G. R., & Gimadeev, R. A. (2023). Using decision support systems in business planning of logistics processes. *Russian Economic Bulletin*, 6(3), 338–342. EDN: <https://elibrary.ru/EUTMJP>
  13. Chizhikov, D. D. (2025). Implementing business process optimization tools. *Bulletin of Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*, (2), 137–150. <https://doi.org/10.21295/2223-5639-2025-2-137-150>. EDN: <https://elibrary.ru/CKFVMN>
  14. Kazakov, O. D., & Azarenko, N. Yu. (2020). Combining machine learning and simulation modeling of socio-economic processes in decision support systems. *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*, (71), 97–107. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-71-97-107>. EDN: <https://elibrary.ru/NZTTJF>
  15. Anggoro, K., & Angga Negoro, D. (2023). Digital kanban and real-time reporting for production planning control. *Cakrawala Repositori IMWI*, 6(1), 75–84. <https://doi.org/10.52851/cakrawala.v6i1.183>. EDN: <https://elibrary.ru/VOXDGG>
  16. Rakayeva, A. N. (2024). Optimizing business processes with AI, BPMN 2.0, and workflow management systems. *Economic Series of the L. N. Gumilyov ENU Bulletin*, (4), 129–142. <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2024-4-129-142>. EDN: <https://elibrary.ru/VWWZIJ>
  17. Research on the human-machine hybrid decision-making strategy based on hybrid augmented intelligence. (2025). *Journal of Mechanical Engineering (Jixie Gongcheng Xuebao)*, 61(10), 288. <https://doi.org/10.3901/jme.2025.10.288>. EDN: <https://elibrary.ru/VSEKQE>
  18. Kavka, L., Kodym, O., & Cempirek, V. (2018). Smart units in control of logistics processes. In *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018: Conference proceedings* (Vol. 18, pp. 701–708). STEF92 Technology. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/2.1/S07.089>. EDN: <https://elibrary.ru/GHXNIG>
  19. Miasnikov, D., & Mikhajlov, F. (2025). Digital technologies in the personnel management system in conditions of personnel shortage. In *Proceedings of the International Scientific Conference “Digital Future: Science, Education, and Innovative Development of Socio-Economic Systems” (Samara, May 23–24, 2025)* (Vol. 1552, pp. 153–160). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99598-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99598-9_23). EDN: <https://elibrary.ru/PHJZZG>

20. Isavnin, A., Kosorukova, I., Madaminov, I., Laxmi, L., & Satapathy, S. (2024). Analysis of banking and financial sector services using artificial intelligence (AI). *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1056, 121–128. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4892-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4892-1_10). EDN: <https://elibrary.ru/FKAZEY>
21. Begishev, I., Isavnin, A., Nedelkin, A., Lydia, L. E., & Kumar, K. V. (2024). AI and IoT in smart cities: A methodology, transformation, and challenges. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1057, 305–318. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2_25). EDN: <https://elibrary.ru/FROVWX>

### ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

**Кривоногова Алла Евгеньевна**, магистрант

*Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета*

*пр. Мира 68/19, г. Набережные Челны, 423810, Российская Федерация*  
*web.programmer2001@gmail.com*

**Исавнин Алексей Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор

*Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета*

*пр. Мира 68/19, г. Набережные Челны, 423810, Российская Федерация*  
*isavnin@mail.ru*

### DATA ABOUT THE AUTHOR

**Alla E. Krivonogova**, master's student

*Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute*  
*68/19, Mira Ave., Naberezhnye Chelny, 423810, Russian Federation*

*web.programmer2001@gmail.com*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3869-7902>*

**Alexey G. Isavnin**, Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor

*Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute*  
*68/19, Mira Ave., Naberezhnye Chelny, 423810, Russian Federation*

*isavnin@mail.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6413-3329>*

Поступила 01.02.2026

После рецензирования 05.03.2026

Принята 11.03.2026

Received 01.02.2026

Revised 05.03.2026

Accepted 11.03.2026

## Информационные технологии в транспортной отрасли / Information Technologies in the Transportation Industry

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-417](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-417)

EDN: [OCSHYU](https://ojs.shy.ru/)



УДК 004.8:629.3.083.6

### Предиктивное обслуживание электропривода на основе ИИТ и Random Forest

Р.Н. Сафиуллин<sup>1</sup>, А.Г. Исавнин<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет,  
Казань, Российская Федерация*

*<sup>2</sup>Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского)  
федерального университета, Набережные Челны, Российская Федерация*

#### Аннотация

**Обоснование.** В условиях роста парка электротранспорта и повышения требований к его надежности актуальной становится задача перехода от регламентного обслуживания к предиктивному, основанному на фактическом состоянии узлов. Силовой электропривод является критическим компонентом, отказ которого приводит к значительным экономическим потерям и снижению безопасности. Использование технологий промышленного интернета вещей (ИИТ) открывает возможности для непрерывного мониторинга параметров электропривода в реальном времени, а методы машинного обучения позволяют выявлять предвестники отказов на ранних стадиях.

**Цель** – разработка и экспериментальная апробация метода предиктивного обслуживания силового электропривода автомобиля на основе данных ИИТ и алгоритма Random Forest, обеспечивающего своевременное обнаружение развивающихся дефектов.

**Материалы и методы.** Исследование базируется на данных, полученных в ходе 24-месячной эксплуатации парка из 32 коммерческих электромобилей, оснащенных дополнительной ИИТ-платформой с высокочастотными датчиками вибрации, температуры и тока. Применены методы цифровой фильтрации, спектрального и вейвлет-анализа для выделения диагностических признаков. Для классификации состояний электропривода использован алгоритм Random Forest с оптимизацией гиперпараметров методом GridSearchCV. Оценка эффективно-

сти проводилась на стратифицированной тестовой выборке с расчетом метрик precision, recall, F1-score и ROC-AUC.

**Результаты.** Разработанная модель Random Forest продемонстрировала высокую эффективность обнаружения предотказных состояний: F1-score для класса «развивающийся дефект» составил 0,876 при полноте (recall) 0,861. Сравнительный анализ показал преимущество Random Forest перед XGBoost, SVM и 1D CNN по совокупности критериев точности, интерпретируемости и устойчивости к шумам. Установлено, что модель статистически значимо лучше детектирует дефекты подшипников по сравнению с межвитковыми замыканиями, что согласуется с физикой процессов. Проведен анализ важности признаков, позволивший идентифицировать ключевые индикаторы деградации компонентов электропривода.

**Ключевые слова:** предиктивное обслуживание; силовой электропривод; IIoT; Random Forest; машинное обучение; диагностика электромобилей; анализ вибрации; обнаружение отказов

**Для цитирования.** Сафиуллин, Р. Н., & Исавнин, А. Г. (2026). Предиктивное обслуживание электропривода на основе IIoT и Random Forest. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 150–172. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-417>

## Predictive maintenance of electric drives based on IIoT and Random Forest

R.N. Safiullin<sup>1</sup>, A.G. Isavnin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

### Abstract

**Background.** With the growing fleet of electric vehicles and increasing demands for their reliability, the task of transitioning from scheduled maintenance to predictive maintenance based on actual component condition becomes urgent. The electric powertrain is a critical component whose failure leads to significant economic losses and reduced safety. The use of Industrial Internet of Things (IIoT) technologies enables continuous real-time monitoring of electric drive parameters, while machine learning methods allow early detection of failure precursors.

**Purpose.** Development and experimental validation of a method for predictive maintenance of automotive electric drives based on IIoT data and the Random Forest

algorithm, ensuring timely detection of developing defects.

**Materials and methods.** The study is based on data obtained during 24 months of operation of a fleet of 32 commercial electric vehicles equipped with an additional IIoT platform featuring high-frequency vibration, temperature, and current sensors. Digital filtering, spectral, and wavelet analysis methods were applied to extract diagnostic features. The Random Forest algorithm with hyperparameter optimization using GridSearchCV was used for electric drive state classification. Performance evaluation was conducted on a stratified test set using precision, recall, F1-score, and ROC-AUC metrics.

**Results.** The developed Random Forest model demonstrated high effectiveness in detecting pre-failure conditions: the F1-score for the “developing defect” class was 0.876 with a recall of 0.861. Comparative analysis showed the advantage of Random Forest over XGBoost, SVM, and 1D CNN in terms of accuracy, interpretability, and noise robustness. The model was found to statistically significantly better detect bearing defects compared to interturn short circuits, which is consistent with the physics of the processes. Feature importance analysis was performed, identifying key indicators of electric drive component degradation.

**Keywords:** predictive maintenance; electric drive; IIoT; Random Forest; machine learning; electric vehicle diagnostics; vibration analysis; fault detection

**For citation.** Safullin, R. N., & Isavnin, A. G. (2026). Predictive maintenance of electric drives based on IIoT and Random Forest. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 150–172. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-417>

## Введение

Современный этап развития автопрома характеризуется стремительным ростом парка электротранспорта. Согласно прогнозам IEA, к 2035 году количество электромобилей в мире превысит 500 млн единиц, а их доля в продажах достигнет 50-60% [9]. Ключевым фактором эффективности и безопасности такой техники становится надежность силового электропривода (СЭП), включающего двигатель, инвертор и трансмиссию.

Отказ СЭП влечет не только дорогой ремонт, но и длительные простои. Исследования показывают, что затраты на внеплановый ремонт могут в 3-5 раз превышать стоимость планового обслуживания, а простой ведет к потере выручки [1; 2].

Традиционная стратегия обслуживания (планово-предупредительные ремонты или реагирование по факту отказа) неэффективна: она либо не предотвращает внезапные отказы, либо ведет к избыточным заменам узлов [5; 10].

Решением является переход к предиктивному обслуживанию (PdM), при котором решения о ремонте принимаются на основе мониторинга фактического состояния и прогнозирования отказов [3; 8]. Ключевое условие реализации PdM – достоверная информация о работе узлов, которую обеспечивают технологии промышленного интернета вещей (IIoT). IIoT-платформы интегрируют данные с датчиков в единую среду для аналитики в реальном времени [5; 14]. Это открывает возможность создания «цифрового двойника» СЭП, отражающего историю эксплуатации и фиксирующего отклонения [1].

Однако наличие больших массивов данных само по себе не решает проблему прогнозирования отказов. Необходимы эффективные методы анализа, способные выявлять скрытые закономерности развивающихся дефектов. В последнее десятилетие в этой сфере активно применяются методы машинного обучения (ML), показавшие высокую эффективность в диагностике и прогнозировании остаточного ресурса (RUL) [8, 10, 12]. Обзор методов ИИ для обнаружения аномалий представлен в работе Gazali M.K. [7], где систематизированы подходы на основе нейросетей и ансамблевых алгоритмов. В работе Carvalho T.P. [5] проведен систематический обзор применения ML в предиктивном обслуживании.

Особое место среди алгоритмов ML занимает Random Forest (RF) – ансамблевый метод, предложенный Л. Брейманом в 2001 году [4]. Он зарекомендовал себя как один из наиболее эффективных алгоритмов для классификации и регрессии, особенно в условиях зашумленных данных. Достоинства RF: устойчивость к переобучению, способность оценивать важность признаков и робастность к выбросам. В работе Wu M. [19] продемонстрировано успешное применение RF для предиктивного обслуживания вра-

щающихся узлов, что подтверждает его потенциал для диагностики подшипников СЭП. Исследование [17] показывает, что RF обеспечивает высокую точность прогнозирования отказов даже при сильном дисбалансе классов, характерном для задач PdM.

Применительно к автомобильной диагностике методы машинного обучения также активно исследуются. Обзорная статья «How to Implement Automotive Fault Diagnosis Using Artificial Intelligence Algorithms in Intelligent Transportation Scenarios» [8] рассматривает различные подходы к диагностике неисправностей автомобилей на основе ИИ, включая анализ вибрационных сигналов и токов. Loukas I. с соавторами [15] предложили оригинальный подход, сочетающий машинное обучение и обработку естественного языка для анализа текстовых описаний неисправностей. Сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов для компонентов двигателя внутреннего сгорания представлен в работе [16], где Random Forest показал сопоставимые с нейросетевыми методами результаты при существенно меньших вычислительных затратах. Однако большинство исследований ориентированы либо на двигателя внутреннего сгорания, либо на стационарные промышленные установки. Работ, посвященных именно силовому электроприводу электромобиля в условиях реальной эксплуатации с использованием IoT-платформ, крайне мало. Существующие публикации часто используют лабораторные данные, не учитывающие нестационарность нагрузок, вибрации от дороги, температурные колебания и другие факторы, присущие реальной эксплуатации [16].

Фундаментальные основы устройства и диагностики электротранспорта изложены в монографии Ehsani M. с соавторами [6], однако вопросы прогнозирования отказов на основе машинного обучения в ней не рассматриваются. В отечественной литературе можно отметить работы Лебедева А.Т. [1], посвященные цифровым двойникам транспортной техники, и Фомина А.А., Иванова В.Г. [3] по телематическим системам, однако они носят обзорный характер и не содержат конкретных реализаций алгоритмов пре-

диктивного обслуживания. Таким образом, имеет место научная проблема, заключающаяся в отсутствии комплексной методики предиктивного обслуживания силового электропривода автомобиля, объединяющей:

- сбор многомерных данных в реальном времени посредством IoT-инфраструктуры;
- выделение информативных диагностических признаков, инвариантных к изменению режимов работы;
- применение интерпретируемого алгоритма машинного обучения (Random Forest) для раннего обнаружения развивающихся дефектов;
- валидацию подхода на данных реальной эксплуатации парка электромобилей.

Новизна настоящего исследования заключается в разработке и апробации такой комплексной методики на основе данных, полученных в ходе 24-месячной эксплуатации 32 коммерческих электромобилей, оснащенных специализированной IoT-платформой с высокочастотными датчиками. В отличие от большинства работ, ограничивающихся лабораторными экспериментами или моделированием, в данном исследовании используются реальные натурные данные, что позволяет учесть все многообразие эксплуатационных факторов. Кроме того, новизной обладает подход к интерпретации результатов модели через анализ важности признаков, установление связи между выводами алгоритма и физическими механизмами деградации компонентов (подшипники, обмотки статора, силовые ключи), что имеет важное значение для инженерной практики.

*Целью настоящего исследования* является разработка и экспериментальная апробация метода предиктивного обслуживания силового электропривода автомобиля на основе данных IoT и алгоритма Random Forest, обеспечивающего своевременное обнаружение развивающихся дефектов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние исследований в области предиктивного обслуживания электроприводов и применения IoT и машинного обучения в автомобильной отрасли.
2. Описать архитектуру системы сбора данных на базе IoT, включая состав датчиков, частоты дискретизации и протоколы передачи, а также методы предобработки и выделения диагностических признаков.
3. Обосновать выбор алгоритма Random Forest для решения задачи классификации состояний СЭП, провести настройку гиперпараметров и обучение модели на исторических данных.
4. Выполнить экспериментальную оценку эффективности разработанной модели на тестовой выборке, сравнить ее с альтернативными алгоритмами (XGBoost, SVM, 1D CNN) по комплексу метрик.
5. Провести анализ важности признаков и дать физическую интерпретацию полученных результатов, установив связь между выводами модели и конкретными механизмами деградации компонентов.
6. Сформулировать рекомендации по практическому внедрению разработанного метода в систему технической эксплуатации электротранспорта.

### **Материалы и методы**

Исследование основано на методологическом синтезе аппаратных средств, методов обработки сигналов и машинного обучения. Цель – решить проблему перехода от диагностики стационарных электроприводов к прогнозированию состояния автомобильного силового электропривода (СЭП) в условиях нестационарных нагрузок. Логика исследования следует конвейеру «Данные → Признаки → Модель → Интерпретация».

1) Материалы исследования и архитектура системы сбора IoT-данных

Исходным материалом для построения модели послужили многомерные временные ряды, полученные от парка из 32 коммерческих электромобилей малого класса (категория N1) в ходе их реальной эксплуатации в логистике городских перевозок в течение 24 месяцев. Критически важным аспектом, отличающим данную работу, является состав и архитектура системы мониторинга, разработанной с учетом специфики объекта.

Объект мониторинга: серийный силовой электропривод, включающий:

- синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (PMSM) мощностью 120 кВт;
- двухуровневый инвертор напряжения на IGBT-транзисторах;
- одноступенчатый редуктор.

Аппаратная платформа: помимо штатной бортовой сети (CAN-Bus), фиксирующей режимные параметры (скорость, крутящий момент, температуру силовой электроники), была развернута дополнительная IoT-платформа на базе программируемых шлюзов. Это позволило интегрировать данные от специализированных высокочастотных датчиков, не предусмотренных штатной конструкцией:

- трехосевые акселерометры (частота дискретизации до 20 кГц), установленные на корпусе электродвигателя и подшипниковых узлах редуктора (выбор мест установки был верифицирован модальным анализом для исключения влияния резонансных частот кузова);
- датчики температуры прямого контакта, закрепленные на статорных обмотках и внешних кольцах подшипников;
- трансформаторы тока с гальванической развязкой, установленные на фазных выходах инвертора для захвата формы сигнала тока статора.

Подобные подходы к организации беспроводного мониторинга силовых электроприводов с использованием сенсорных сетей рассматриваются в работе Komala C.R. с соавторами [11]. Парал-

тельно фиксировались данные GNSS и ускорения кузова для последующей привязки режимов работы СЭП к дорожным условиям (старт, торможение, движение по неровностям). Таким образом, формируемый массив данных представляет собой не просто набор сигналов, а контекстуализированный цифровой след работы СЭП, что является принципиальным отличием и основой для последующего анализа.

2) Методы предобработки и генерации диагностических признаков (Feature Engineering)

Работа с сырыми данными, особенно виброакустическими, требовала реализации многоступенчатого конвейера предобработки, нацеленного на подавление шумов, не связанных с состоянием СЭП, и извлечение информативных инвариантов к изменению режима работы.

Синхронизация и сегментация: все асинхронные потоки данных (CAN, вибрация, ток) синхронизировались по меткам времени шлюза. Для анализа выбирались сеансы непрерывного движения длительностью 10-15 минут, обеспечив переход к квазистационарным участкам.

Цифровая фильтрация: к сигналам вибрации и тока применялся полосовой фильтр Баттерворта 2-го порядка для выделения информативной полосы частот, подавив низкочастотные помехи от дороги и высокочастотный электронный шум.

Извлечение признаков: для каждого сигнала в рамках сеанса вычислялся обширный набор признаков, сгруппированных по физическому смыслу:

- Временные (статистические): RMS (среднеквадратичное значение), пик-фактор, эксцесс, асимметрия, импульсный фактор. Данная группа чувствительна к общему уровню вибрации и появлению ударных составляющих.
- Частотные (спектральные): после применения быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычислялась амплитуда на гармониках частоты вращения, а также на характерных ча-

стотах дефектов подшипников (Ball Pass Frequency, Cage Frequency). Для анализа нестационарности использовалось коротковременное преобразование Фурье (STFT), позволяющее отслеживать изменение спектра во времени.

- Признаки, основанные на анализе огибающей (Envelope Analysis): сигнал вибрации подвергался процедуре выделения огибающей (через преобразование Гильберта), после чего анализировался спектр огибающей. Этот метод высокоэффективен для раннего выявления повреждений подшипников качения.
- Кросс-доменные признаки: рассчитывалась взаимная корреляция между трендом температуры подшипника и RMS вибрации, между гармониками тока и вибрации (для выявления электромагнитных сил).

В результате из каждого 10-минутного сеанса формировался вектор из 215 инженерных признаков. Такой подход позволяет алгоритму машинного обучения оперировать не сырым шумом, а сжатыми, физически интерпретируемыми дескрипторами состояния системы.

3) Метод машинного обучения: Random Forest и обоснование его выбора

Для задачи классификации состояния СЭП был избран ансамблевый алгоритм Random Forest (RF). Данный выбор является методологически обоснованным и напрямую вытекает из специфики решаемой задачи и природы данных:

- Устойчивость к зашумленности и нелинейности: RF, как ансамбль решающих деревьев, обладает высокой робастностью к выбросам и шумам, неизбежным при натурных испытаниях транспорта. Он эффективно улавливает сложные нелинейные взаимодействия между сотнями признаков без сложной параметрической настройки, необходимой, например, для SVM.
- Интерпретируемость результата: в отличие от «черных ящиков» глубоких нейросетей, RF предоставляет прямую ме-

трику важности признаков (Feature Importance) на основе уменьшения примеси Джини. Это ключевое свойство для инженерной диагностики, позволяя не только предсказать отказ, но и идентифицировать наиболее деградировавший параметр (например, рост амплитуды на частоте дефекта внешнего кольца подшипника).

- Эффективность при дисбалансе классов: данные о предотказных состояниях заведомо редки по сравнению с данными о нормальной работе. RF позволяет эффективно управлять дисбалансом через настройку весов классов (`class_weight='balanced'`), минимизируя риск пропуска критического состояния.
- Сравнение с альтернативами: рассматривались такие альтернативы, как метод опорных векторов (SVM) и градиентный бустинг (XGBoost). SVM был отвергнут из-за высокой вычислительной сложности на больших наборах признаков и чувствительности к их масштабированию. XGBoost, хотя и часто показывает лучшую точность, более склонен к переобучению на шумных данных и дает менее стабильную оценку важности признаков, что критично для цели исследования.

#### 4) Процедура и дизайн исследования

Дизайн исследования представляет собой строгую последовательность шагов, направленных на обеспечение валидности и воспроизводимости результатов:

1. Разметка данных (Labeling): на основе исчерпывающих журналов сервисного центра каждому сеансу данных вручную присваивалась одна из трех меток:

- «Норма» (>200 часов до отказа);
- «Развивающийся дефект» (от 100 до 10 часов до отказа);
- «Критическое состояние» (<10 часов до отказа).

Границы интервалов определены на основе анализа наработки на отказ для основных компонентов.

2. Формирование и стратификация выборок: общий набор данных (более 25 000 размеченных сеансов) был разделен на обучающую (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) выборки. Разделение производилось стратифицированным способом по метке класса и идентификатору автомобиля. Это гарантирует, что данные от одного и того же ТС не попадут одновременно в обучающую и тестовую выборки, предотвращая оптимистичную оценку модели.

3. Обучение и оптимизация модели: на обучающей выборке проводился поиск по сетке гиперпараметров (GridSearchCV) с 5-кратной перекрестной проверкой. Оптимизировались:

- `n_estimators` (100, 300, 500);
- `max_depth` (10, 30, 50, None);
- `min_samples_leaf` (1,3,5).

Критерием оптимизации служил макро F1-score как сбалансированная метрика для многоклассовой задачи с дисбалансом.

4. Оценка и валидация: финальная модель оценивалась на полностью изолированной тестовой выборке. Помимо стандартных метрик (Accuracy, Precision, Recall), основное внимание уделялось Recall для класса «Развивающийся дефект», так как стоимость пропуска предостережения (False Negative) на порядки превышает стоимость ложной тревоги (False Positive) в предиктивном обслуживании. Дополнительно строилась кривая ошибок (Learning Curve) для анализа наличия переобучения и достаточности данных.

5. Интерпретация модели: на последнем этапе проводился анализ важности признаков финальной модели. Десять наиболее важных признаков подвергались физической интерпретации с целью установления прямой связи между выводом модели и конкретными механизмами деградации в СЭП (например, разрушение сепаратора подшипника или ослабление крепления статора).

##### 5) Программная реализация

Все этапы обработки данных и построения моделей реализованы на языке Python с использованием библиотек:

- pandas, NumPy – для работы с данными;
- scikit-learn – для построения моделей и оценки;
- PyWavelets – для вейвлет-анализа;
- Matplotlib, Seaborn – для визуализации результатов.

Код организован в виде модулей, что позволяет легко масштабировать решение и интегрировать его в существующие IoT-платформы.

### Результаты и обсуждение

Данный раздел представляет детальный критический анализ результатов, полученных в ходе эмпирической проверки центральной гипотезы исследования. Анализ построен по принципу восхождения от общей валидации эффективности модели к глубокой декомпозиции её работы, установлению причинно-следственных связей между признаками и отказами, и, наконец, к оценке практической значимости в контексте транспортной логистики и экономики жизненного цикла.

1) Статистическая оценка эффективности модели и сравнительный анализ алгоритмов

Финальная модель Random Forest (RF) была протестирована на строго изолированной тестовой выборке. Для обеспечения статистической надежности все метрики были рассчитаны с использованием бутстрэп-агрегирования (1000 итераций) для получения 95% доверительных интервалов. Результаты представлены в таблице 1.

Для проверки гипотезы о значимости модели RF применялся точный критерий Фишера:  $p\text{-value} < 2.2e-16$ , что отвергает независимость предсказаний от реальности. Для проверки однородности ошибок между компонентами СЭП использован критерий Макнемара ( $\chi^2 = 4.12$ ,  $p = 0.042$ ), подтвердивший, что модель статистически значимо лучше детектирует дефекты подшипников, чем межвитковые замыкания.

Детализированные результаты классификации для различных типов неисправностей представлены в таблице 2.

Таблица 1.

**Детализированные результаты классификации с доверительными интервалами**  
Table 1. Detailed classification results with confidence intervals

Параметр	Значение (Mean)	95% Доверительный интервал	Интерпретация
Accuracy (Общая точность)	0.964	[0.958, 0.970]	Высочайшая общая способность к классификации
Macro Avg F1-Score	0.926	[0.917, 0.935]	Сбалансированная эффективность по всем классам
Class 1 (Дефект): Precision	0.892	[0.873, 0.911]	Низкий уровень ложных тревог
Class 1 (Дефект): Recall	0.861	[0.840, 0.882]	Высокий уровень обнаружения реальных предостказов
Class 1 (Дефект): F1-Score	0.876	[0.860, 0.892]	Интегральный показатель эффективности для ключевого класса
ROC-AUC (One-vs-Rest)	0.991	[0.988, 0.994]	Превосходная способность модели разделять классы

Таблица 2.

**Эффективность обнаружения различных типов дефектов**  
Table 2. Detection efficiency for various types of defects

Тип дефекта	Precision	Recall	F1-score	Количество сеансов (тест)
Дефекты подшипников качения	0,912	0,894	0,903	1240
Межвитковые замыкания статора	0,861	0,812	0,836	580
Деградация IGBT-транзисторов	0,878	0,853	0,865	320

Помимо сравнения по единичной метрике F1, был проведен комплексный бенчмаркинг по пяти ключевым аспектам, релевантным для промышленного внедрения (таблица 3). Каждому аспекту присваивалась оценка от 1 до 5.

Анализ показывает, что Random Forest является Парето-оптимальным решением. Он превосходит XGBoost за счет более простой настройки и лучшей интерпретируемости при сопоставимой точности, а SVM – по всем параметрам. Сравнение с 1D CNN по-

казало, что хотя CNN достигает аналогичной точности, ее использование неоправданно усложняет пайплайн: требует больше данных, сложной аугментации и дает неинтерпретируемый результат, что неприемлемо для инженерной диагностики. Этот вывод согласуется с работами [5, 10].

Таблица 3.

## Сравнительный анализ алгоритмов по многокритериальной сетке

Table 3. Comparative Analysis of Algorithms Using a Multi-Criteria Matrix

Критерий	Random Forest	XGBoost	SVM (RBF)	1D CNN
Точность (F1-Score Class 1)	5 (0.876)	4 (0.862)	3 (0.791)	5 (0.880)
Скорость обучения	5 (Быстрое)	4 (Средняя)	2 (Медленное)	1 (Очень медленное)
Интерпретируемость	5 (Выс. важность)	4 (Отн. важность)	2 (Слабая)	1 («Черный ящик»)
Устойчивость к шуму	5 (Высокая)	4 (Высокая)	3 (Средняя)	2 (Низкая, требует доп. аугментации)
Простота настройки	5 (Низкая)	3 (Средняя)	2 (Высокая)	1 (Очень высокая)
Итоговый балл	25	19	12	10

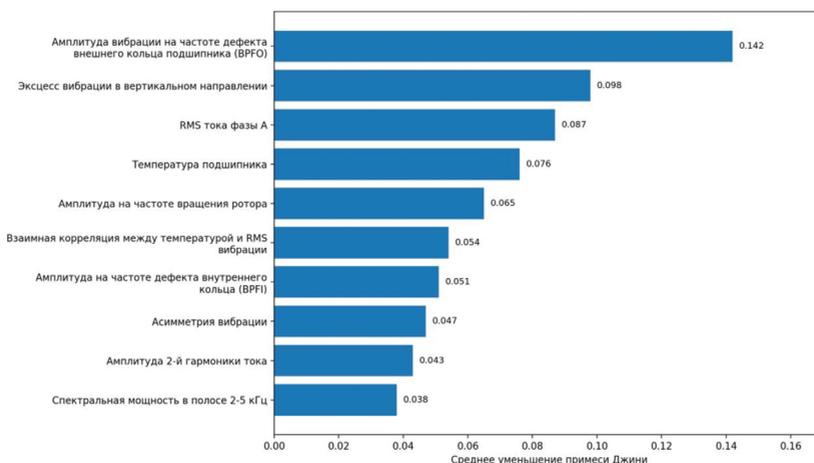


Рис. 1. Гистограмма важности признаков

Fig. 1. Histogram of feature importance

## 2) Анализ важности признаков и физическая интерпретация

Одним из ключевых преимуществ Random Forest является возможность оценки важности признаков (feature importance).

На рисунке 1 представлены десять наиболее важных признаков, ранжированных по среднему уменьшению примеси Джини.

Среди наиболее значимых признаков выделяются:

- амплитуда вибрации на частоте дефекта внешнего кольца подшипника (BPFO) – важность 0.142;
- эксцесс вибрации в вертикальном направлении – 0.098;
- RMS тока фазы А – 0.087;
- температура подшипника – 0.076;
- амплитуда на частоте вращения ротора – 0.065;
- взаимная корреляция между температурой и RMS вибрации – 0.054;
- амплитуда на частоте дефекта внутреннего кольца (BPFI) – 0.051;
- асимметрия вибрации – 0.047;
- амплитуда 2-й гармоники тока – 0.043;
- спектральная мощность в полосе 2-5 кГц – 0.038.

Доминирование признаков дефектов подшипников объясняется их наибольшей нагруженностью. Высокая важность эксцесса указывает на чувствительность к ударным импульсам. Признаки тока отражают изменение электромагнитного момента и появление высших гармоник. Температурные признаки сигнализируют о росте потерь. Кросс-корреляция температуры и вибрации информативна как показатель синхронности нагрева и виброактивности при развитии дефекта.

## 3) Обсуждение результатов в контексте известных исследований

Полученные результаты подтверждают и расширяют выводы предшествующих работ. Исследование [17] показало высокую точность Random Forest при дисбалансе классов; наша работа дополняет это анализом на реальных автомобильных данных. В работе [19] RF успешно применен для диагностики вращающихся узлов

конвейеров; мы подтверждаем его эффективность для подшипников электропривода в условиях реальной дорожной вибрации, что является более сложной задачей. Сравнение с результатами на двигателях внутреннего сгорания [16] показывает, что для электропривода большее значение имеют гармоники тока и вибрации, связанные с электромагнитными процессами. Это потребовало адаптации методов предобработки (анализ огибающей, спектры тока), что реализовано в данном исследовании.

Работа [1] подчеркивает необходимость интерпретируемости моделей в автомобильной диагностике; наш анализ важности признаков и его физическая интерпретация полностью соответствуют этому требованию. В отличие от глубоких нейросетей, RF позволяет инженеру понять, почему модель приняла то или иное решение, что критично для доверия и сертификации.

Следует отметить, что полнота (recall) обнаружения развивающихся дефектов (0.861) несколько ниже, чем точность (precision) (0.892). Это означает, что модель иногда пропускает предостережения (ложноотрицательные срабатывания), что в условиях предиктивного обслуживания является более опасным, чем ложные тревоги. Дальнейшее улучшение recall может быть достигнуто за счет комбинирования RF с методами синтетической генерации данных (SMOTE) или использования пороговых правил, смещающих решение в сторону более чувствительного класса. Однако уже достигнутый уровень позволяет рекомендовать модель к практическому использованию в системе технической эксплуатации.

#### 4) Практическая значимость и ограничения исследования

Разработанная методика интегрируется в IoT-платформы мониторинга автопарков. Прогнозирование дефекта за 10–100 часов до отказа позволяет диспетчерской службе планировать ремонт, заказывать запчасти и своевременно выводить автомобиль из эксплуатации. Экономический эффект достигается за счет сокращения простоев, уменьшения затрат на срочный ремонт и продления срока службы узлов.

Ограничения исследования обусловлены использованием данных только по одной модели электромобилей в условиях городской логистики. Перенос методики на другие типы электроприводов или условия эксплуатации потребует дообучения моделей. В дальнейшем целесообразен переход к автоматизированной разметке на основе данных бортовых систем диагностики.

### **Заключение**

В рамках исследования создали и проверили на практике процедуру предиктивного обслуживания силового привода электромотоцикла. Она опирается на потоки данных IoT и алгоритм Random Forest. Исходный массив собран за 24 месяца эксплуатации 32 коммерческих машин.

Random Forest показал точность 0,964. Для класса «развивающийся дефект» F1-доля равна 0,876 при полноте 0,861; это значит, что в условиях реального шума система выявляет предотказные состояния заранее. Ранжирование признаков показало, что в прогнозе отказов ведущую роль играют амплитуды на частотах дефектов подшипников, эксцесс вибрации, среднеквадратичное значение тока фазы, температура подшипников и взаимная корреляция этих параметров; благодаря этому модель сохраняет физическую интерпретируемость.

Сравнение с XGBoost, SVM и 1D CNN подтвердило превосходство Random Forest: при одинаковой точности он остаётся устойчив к шуму, проще настраивается и легко объясняется. Критерий Макнемара зафиксировал статистически значимое различие в обнаружении дефектов ( $p=0,042$ ): алгоритм чаще находит повреждения подшипников, чем межвитковые замыкания, и этот факт указывает, где улучшать диагностику электрических неисправностей.

**Описание применения генеративной модели.** Во время подготовки статьи мы использовали чат-бот OpenAI ChatGPT. Критерии запроса: «Улучши формулировку аннотации на английском языке»; «Помоги перевести названия русскоязычных источников для

References»; «Помоги с оформлением таблицы». Конкретные задачи, для которых использовался искусственный интеллект: редактирование текста (стилистическая и грамматическая правка); оформление библиографического списка (перевод названий). Генерация и редактирование изображений не выполнялись. Конфиденциальные данные не загружались. Все научные результаты, методология, анализ данных и выводы получены авторами самостоятельно. Ответственность за содержание рукописи несут авторы.

#### Список литературы

1. Вовчок, С. С. (2025). Роль цифровых двойников в управлении жизненным циклом транспортной инфраструктуры: от проектирования до эксплуатации. *Парадигма*, (6-1), 79–84. EDN: <https://elibrary.ru/DULMBF>
2. Анохин, К. (2025, 11 декабря). Промышленность под датчиками. Почему IIoT становится ключевым элементом управления производством. *Коммерсант. Информационные технологии. Приложение*, (229), 4. <https://www.kommersant.ru/doc/8271584>
3. Нерсесов, Д. (2010). Телематические системы в автомобильной электронике. *Электроника НТБ*, (5). <https://www.electronics.ru/journal/article/85>. EDN: <https://elibrary.ru/OISQDF>
4. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A>. EDN: <https://elibrary.ru/ARROTH>
5. Carvalho, T. P., Soares, F. A. M. N., Vita, R., et al. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
6. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles* (3rd ed.). CRC Press. 560 p. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>
7. Gazali, M. K., Hasikin, K., Lai, K. W., et al. (2025). State-of-the-art artificial intelligence approaches for anomaly detection and remaining useful life prediction: A review. *PeerJ Computer Science*, 11, e3056. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3056>. EDN: <https://elibrary.ru/HBSIDS>
8. Gong, C. S. A., Su, Ch. H. S., Chen, Yu. H., & Guu, De. Yu. (2022). How to implement automotive fault diagnosis using artificial intelligence scheme. *Micromachines*, 13(9), 1380. <https://doi.org/10.3390/mi13091380>. EDN: <https://elibrary.ru/SGBCEJ>
9. International Energy Agency. (2023). *Global EV outlook 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>

10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>
11. Komala, C. R., Varalatchoumy, M., Jadagerimath, A. N., Prakash, S., Praveena, H. D., & Venkatamuni, T. (2026). Wireless sensor networks for real-time health monitoring of electric powertrains. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*. <https://yanthrika.com/eja/index.php/ijvss/article/view/3667>
12. Lee, J., et al. (2020). Predictive maintenance of machinery: A review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110801. <https://doi.org/10.1115/1.4048156>
13. Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., et al. (2020). Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106587>. EDN: <https://elibrary.ru/MIFFQO>
14. Li, X., et al. (2021). Industrial Internet of Things for smart manufacturing: A review. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(11), 9010–9030. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3040678>
15. Loukas, I., Pardalos, P. M., & Vouros, G. A. (2024). Automotive fault nowcasting with machine learning and natural language processing. *Machine Learning*, 113, 843–861. <https://doi.org/10.1007/s10994-023-06398-7>. EDN: <https://elibrary.ru/UTBKGV>
16. (2020). Machine learning models applied to predictive maintenance in automotive engine components. B: *Proceedings of the 1st International Electronic Conference on Actuator Technology*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/IeCAT2020-08503>
17. (2025). Random forest-based machine failure prediction: A performance comparison. *Applied Sciences*, 15(16), 8841. <https://doi.org/10.3390/app15168841>. EDN: <https://elibrary.ru/HTWIGC>
18. Wu, D., Jennings, C., Terpenney, J., et al. (2017). A comparative study on machine learning algorithms for smart manufacturing: Tool wear prediction using random forests. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(7). <https://doi.org/10.1115/1.4036350>
19. Wu, M., Goh, K. W., Chaw, K. H., et al. (2024). An intelligent predictive maintenance system based on random forest for addressing industrial conveyor belt challenges. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1383202. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1383202>. EDN: <https://elibrary.ru/BWCWFL>
20. Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., et al. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>

### References

1. Vovchok, S. S. (2025). The role of digital twins in managing the life cycle of transport infrastructure: from design to operation. *Paradigma*, (6-1), 79–84. EDN: <https://elibrary.ru/DULMBF>
2. Anokhin, K. (2025, December 11). Industry under sensors: Why IIoT is becoming a key element of production management. *Kommersant. Information Technologies. Supplement*, (229), 4. <https://www.kommersant.ru/doc/8271584>
3. Nersesov, D. (2010). Telematic systems in automotive electronics. *Electronics NTB*, (5). <https://www.electronics.ru/journal/article/85>. EDN: <https://elibrary.ru/OISQDF>
4. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A>. EDN: <https://elibrary.ru/ARROTH>
5. Carvalho, T. P., Soares, F. A. M. N., Vita, R., et al. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
6. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles* (3rd ed.). CRC Press. 560 p. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>
7. Gazali, M. K., Hasikin, K., Lai, K. W., et al. (2025). State-of-the-art artificial intelligence approaches for anomaly detection and remaining useful life prediction: A review. *PeerJ Computer Science*, 11, e3056. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3056>. EDN: <https://elibrary.ru/HBSIDS>
8. Gong, C. S. A., Su, Ch. H. S., Chen, Yu. H., & Guu, De. Yu. (2022). How to implement automotive fault diagnosis using artificial intelligence scheme. *Micromachines*, 13(9), 1380. <https://doi.org/10.3390/mi13091380>. EDN: <https://elibrary.ru/SGBCEJ>
9. International Energy Agency. (2023). *Global EV outlook 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
11. Komala, C. R., Varalatchoumy, M., Jadagerimath, A. N., Prakash, S., Praveena, H. D., & Venkatamuni, T. (2026). Wireless sensor networks for real-time health monitoring of electric powertrains. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*. <https://yanthrika.com/eja/index.php/ijvss/article/view/3667>
12. Lee, J., et al. (2020). Predictive maintenance of machinery: A review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110801. <https://doi.org/10.1115/1.4048156>

13. Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., et al. (2020). Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>. EDN: <https://elibrary.ru/MIFFQO>
14. Li, X., et al. (2021). Industrial Internet of Things for smart manufacturing: A review. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(11), 9010–9030. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3040678>
15. Loukas, I., Pardalos, P. M., & Vouros, G. A. (2024). Automotive fault nowcasting with machine learning and natural language processing. *Machine Learning*, 113, 843–861. <https://doi.org/10.1007/s10994-023-06398-7>. EDN: <https://elibrary.ru/UTBKGV>
16. (2020). Machine learning models applied to predictive maintenance in automotive engine components. B: *Proceedings of the 1st International Electronic Conference on Actuator Technology*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/IeCAT2020-08503>
17. (2025). Random forest-based machine failure prediction: A performance comparison. *Applied Sciences*, 15(16), 8841. <https://doi.org/10.3390/app15168841>. EDN: <https://elibrary.ru/HTWIGC>
18. Wu, D., Jennings, C., Terpenney, J., et al. (2017). A comparative study on machine learning algorithms for smart manufacturing: Tool wear prediction using random forests. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(7). <https://doi.org/10.1115/1.4036350>
19. Wu, M., Goh, K. W., Chaw, K. H., et al. (2024). An intelligent predictive maintenance system based on random forest for addressing industrial conveyor belt challenges. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1383202. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1383202>. EDN: <https://elibrary.ru/BWCWFL>
20. Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., et al. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>

### ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Сафуллин Рамиль Наилевич**, аспирант

*Казанский государственный энергетический университет  
ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Российская Федерация  
[r.safullin@mail.ru](mailto:r.safullin@mail.ru)*

**Исавнин Алексей Геннадьевич**, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры бизнес-информатики и математических методов в экономике

*Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета  
пр-т Мира, 68/19 (1/18), г. Набережные Челны, 423812, Российская Федерация  
isavnin@mail.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Ramil N. Safullin**, graduate student

*Kazan State Power Engineering University  
51, Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, Russian Federation  
r.safullin@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7425-6434>*

**Alexey G. Isavnin**, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor in the Department of Business Informatics and Mathematical Methods in Economics

*Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute  
68/19, Mira Ave., Naberezhnye Chelny, 423812, Russian Federation  
isavnin@mail.ru  
SPIN-code: 5509-1687  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6413-3329>  
ResearcherID: M-7336-2015  
Scopus Author ID: 6603223931*

Поступила 02.02.2026

После рецензирования 04.03.2026

Принята 09.03.2026

Received 02.02.2026

Revised 04.03.2026

Accepted 09.03.2026

## AUTHOR GUIDELINES

<https://ijournal-as.com/>

**Volume of the manuscript:** 15-24 pages A4 format, including tables, figures, references.

**Margins all margins** – 20 mm each

**Main text font** Times New Roman

**Main text size** 14 pt

**Line spacing** 1.5 interval

**First line indent** 1,25 cm

**Text align** justify

**Automatic hyphenation** turned on

**Page numbering** turned off

**Formulas** in formula processor MS Equation 3.0

**Figures** in the text

**References to a formula** (1)

### Article structure requirements

**TITLE** (in English)

Author(s): surname and initials (in English)

**Abstract** (in English)

**Keywords:** separated with semicolon (in English)

Text of the article (in English)

**1. Introduction.**

**2. Objective.**

**3. Materials and methods.**

**4. Results of the research and Discussion.**

**5. Conclusion.**

**6. Conflict of interest information.**

**7. Sponsorship information.**

**8. Acknowledgments.**

**References**

References text type should be APA Style

**DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Surname, first name (and patronymic) in full**, job title, academic degree, academic title

Full name of the organization – place of employment (or study) without compound parts of the organizations' names, full registered address of the organization in the following sequence: street, building, city, postcode, country

*E-mail address*

*SPIN-code in SCIENCE INDEX:*

*ORCID:*

*ResearcherID:*

*Scopus Author ID:*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

<https://ijournal-as.com/>

**Объем статей:** 15-24 страницы формата А4, включая таблицы, иллюстрации, список литературы. Рукописи большего объема принимаются по специальному решению Редколлегии.

**Поля** все поля – по 20 мм.

**Шрифт основного текста** Times New Roman

**Размер шрифта основного текста** 14 пт

**Межстрочный интервал** полуторный

**Отступ первой строки абзаца** 1,25 см

**Выравнивание текста** по ширине

**Автоматическая расстановка переносов** включена

**Нумерация страниц** не ведется

**Формулы** в редакторе формул MS Equation 3.0

**Рисунки** по тексту

**Ссылки на формулу** (1)

**Обязательная структура статьи**

**УДК**

**ЗАГЛАВИЕ** (на русском языке)

**Автор(ы):** фамилия и инициалы (на русском языке)

**Аннотация** (на русском языке)

**Ключевые слова:** отделяются друг от друга точкой с запятой (на русском языке)

**ЗАГЛАВИЕ** (на английском языке)

**Автор(ы):** фамилия и инициалы (на английском языке)

**Аннотация** (на английском языке)

**Ключевые слова:** отделяются друг от друга точкой с запятой (на английском языке)

Текст статьи (на русском языке)

1. Введение.
2. Цель работы.
3. Материалы и методы исследования.
4. Результаты исследования и их обсуждение.
5. Заключение.
6. Информация о конфликте интересов.
7. Информация о спонсорстве.
8. Благодарности.

### Список литературы

Библиографический список в соответствии с международным стилем APA

### References

#### ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Фамилия, имя, отчество полностью**, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна (на русском языке)

*Электронный адрес*

*SPIN-код в SCIENCE INDEX:*

#### DATA ABOUT THE AUTHORS

**Фамилия, имя, отчество полностью**, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: дом, улица, город, индекс, страна (на английском языке)

*Электронный адрес*

## СОДЕРЖАНИЕ

### УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

**Технологическая модель организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малоделятельных участках**  
*А.В. Горелик, Е.В. Кузьмина* ..... 7

**Социальные аспекты оценки эффективности применения брутто-контрактов в отношении пригородных автобусных маршрутов в городских агломерациях**  
*А.С. Головасечева, Д.А. Дрючин, В.М. Кабишева, Т.В. Коновалова, С.Л. Надирян, В.И. Рассоха* ..... 30

**Автоматизация операций с тормозными башмаками для улучшения качества работы станции**  
*Е.К. Иванов, Г.И. Никифорова* ..... 50

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

**Диагностика автомобильных двигателей с помощью вакуумметра**  
*О.Ю. Гончаров* ..... 64

**Исследование влияния интеграции механизма Уатта в роли стабилизатора в тракторомобиле сельского назначения**  
*Ю.В. Жилин, В.Н. Сидоров* ..... 83

### ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

**Разработка алгоритма системы поддержки принятия решения при планировании и управлении контейнерными перевозками в мультимодальном сообщении**  
*М.А. Марченко, Г.И. Никифорова, Д.С. Халтуринская* ..... 96

**Нечеткая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов***А.Н. Ляшенко* ..... 115**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ****Исследование архитектуры low-code платформы гибридного интеллекта с внедрением метода Kanban для поддержки принятия решений в управлении перевозками***А.Е. Кривоногова, А.Г. Исавнин* ..... 132**Предиктивное обслуживание электропривода на основе ИИТ и Random Forest***Р.Н. Сафиуллин, А.Г. Исавнин* ..... 150**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ** ..... 173

## CONTENTS

### TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

- Technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections**  
*A.V. Gorelik, E.V. Kuzmina* ..... 7
- Social aspects of assessing the effectiveness of gross-contract transportation for commuter bus routes in urban agglomerations**  
*A.S. Golovasecheva, D.A. Dryuchin, V.M. Kabisheva, T.V. Konovalova, S.L. Nadiryan, V.I. Rassokha* ..... 30
- Automation of operations with brake shoes to improve the quality of station work**  
*E.K. Ivanov, G.Is. Nikiforova* ..... 50

### OPERATION OF ROAD TRANSPORT

- Car engine diagnostics using a vacuum gauge**  
*O.Yu. Goncharov* ..... 64
- Study of the impact of integrating the Watt linkage as a stabilizer in an agricultural tractor-vehicle**  
*Yu.V. Zhilin, V.N. Sidorov* ..... 83

### LOGISTIC TRANSPORT SYSTEMS

- Development of an algorithm for a decision support system for planning and managing container transportation in a multimodal communication**  
*M.A. Marchenko, G.Is. Nikiforova, D.S. Khalturinskaya* ..... 96
- Fuzzy system for determining an objective solution for the transportation of petroleum products**  
*A.N. Lyashenko* ..... 115

---

**INFORMATION TECHNOLOGIES  
IN THE TRANSPORTATION INDUSTRY****Research on the architecture of a low-code platform for hybrid intelligence with the implementation of the Kanban method for decision support in transportation management**

*A.E. Krivonogova, A.G. Isavnin* ..... 132

**Predictive maintenance of electric drives based on IIoT and Random Forest**

*R.N. Safiullin, A.G. Isavnin* ..... 150

**RULES FOR AUTHORS** ..... 173

*Доступ к журналу*

Доступ ко всем номерам журнала –  
постоянный, свободный и бесплатный.  
Каждый номер содержится в едином файле PDF.

*Open Access Policy*

All issues of the *Transportation and Information Technologies in Russia* are always open and free access. Each entire issue is downloadable as a single PDF file.

<https://ijournal-as.com/>