

УДК 656.259.12

Экспериментальные исследования зависимости тока, протекающего через изолирующий стык, от изменения его сопротивления

В. А. Надежкин, И. С. Бредун

Приволжский государственный университет путей сообщения, Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, 2в

Для цитирования: *Надежкин В. А., Бредун И. С.* Экспериментальные исследования зависимости тока, протекающего через изолирующий стык, от изменения его сопротивления // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 436–442. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-436-442

Аннотация

Цель: экспериментальное подтверждение гипотезы о том, что величина сигнального тока, протекающего через изолирующий стык рельсовой цепи, является информативным диагностическим признаком. Исследование направлено на установление количественной зависимости между изменением сопротивления изолирующего стыка и силой тока, что необходимо для создания системы непрерывного мониторинга и прогнозирования предотказного и неисправного состояния изолирующего стыка. **Методы:** проведены натурные измерения на железнодорожном полигоне с использованием индикатора тока рельсовых цепей (ИТРЦ-М). Для обработки экспериментальных данных и получения аналитической зависимости применена полиномиальная аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК). Наилучшее соответствие экспериментальным точкам обеспечила модель в виде полинома третьей степени. **Результаты:** установлена обратно пропорциональная зависимость: с уменьшением сопротивления изолирующего стыка величина сигнального тока, протекающего через него, закономерно возрастает. Получена высокоточная математическая модель (полином третьей степени), достоверно описывающая экспериментальные данные в рабочем диапазоне сопротивлений. Показано, что поведение модели за пределами интервала измерений (асимптотическое стремление к отрицательной бесконечности при уменьшении тока) исключает возможность ложноположительных и ложноотрицательных прогнозов при диагностике, что подтверждает ее надежность. **Практическая значимость:** результаты исследования доказывают принципиальную возможность разработки и внедрения системы технического диагностирования и мониторинга изолирующих стыков (СТДМ-ИС). Использование предложенного диагностического признака (величины сигнального тока) позволит перейти от плановых трудоемких проверок к системе непрерывного автоматизированного контроля. Это повысит безопасность движения за счет раннего обнаружения предотказных и неисправных состояний изолирующих стыков, сократит эксплуатационные расходы и повысит надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ).

Ключевые слова: техническая диагностика, мониторинг устройств ЖАТ, предиктивная аналитика, изолирующие стыки, рельсовые цепи, предотказные состояния, сигнальный ток

Введение

Минимизация отказов в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) — это насущная задача, от которой напрямую зависит безопасность перевозок. Про-

цесс анализа сбоев осложняется дефицитом диагностических данных, а также недостаточной точностью измерительного оборудования для оценки дестабилизирующих электромагнитных воздействий.

Ключевым компонентом функционирования рельсовых цепей (РЦ) являются изолирующие стыки, основное назначение которых — обеспечить электрическую независимость смежных РЦ. Преимущественной причиной неисправностей изолирующих стыков является снижение уровня сопротивления изоляции [1]. Снижение уровня сопротивления стыка чаще всего происходит вследствие повреждения торцевой изоляции при температурном расширении рельсов в жаркий период, а также из-за износа боковых прокладок, деформации изолирующих втулок и шайб.

Решающую функцию в своевременном обнаружении признаков приближающегося отказа выполняют средства диагностирования и мониторинга систем ЖАТ. В связи с этим центральной задачей для увеличения эксплуатационного ресурса изолирующих стыков является создание специализированного прибора, предназначенного для постоянного контроля величины их сопротивления.

Материалы и методы

На текущий момент эксплуатируемые РЦ не оснащены системой непрерывного мониторинга состояния изолирующих стыков. Их диагностирование выполняется в плановом порядке с периодичностью раз в шесть месяцев или после проведения путевых работ. Процедура требует обязательного участия как минимум двух работников эксплуатационного персонала, которые с использованием метода «рельс — накладка» производят семь измерений напряжения между элементами стыка и рельсами. На основании анализа разности полученных значений делается вывод о целостности изоляции стыка 1 или 2. Этот процесс крайне трудоемок, особенно когда эксплуатационному персоналу приходится выезжать для регламентных проверок изолирующих стыков на перегон [2].

Известно [3–5], что в случае снижения сопротивления изолирующего стыка создаются цепи прохода сигнального тока в междроссельной перемычке и на концах рельс в створе изолирующего стыка. В данном экспериментальном исследовании было проведено измерение сигнального тока, протекающего через изолирующий стык и междроссельную перемычку на участке с электротягой постоянного тока. Был использован индикатор тока рельсовых цепей, аналогичный прибору ИТРЦ-М, при различных значениях сопротивления на измеряемом и на парном стыке для подтверждения возможности использования значения тока, протекающего через стык и междроссельную перемычку, как информативного признака в системе технического диагностирования и мониторинга изолирующих стыков (СТДМ-ИС) [5].

Для этого был использован специальный уникальный магазин сопротивлений с номиналами от 30,3 до 48,3 Ом, соответствующий зоне, при которой диагностируемый стык располагается в предотказном состоянии [6], и позволяющий наиболее наглядно установить обратно пропорциональную зависимость тока от сопротивления. При расширении диапазона измерений в сторону больших сопротивлений предложенный диагностический признак может быть использован для раннего обнаружения тенденции к отказу.

Характеристики рельсовых цепей, такие как входное и обратное входное сопротивление, а также сопротивление изолирующих стыков и обмоток дроссель-трансформаторов выступают в качестве влияющих факторов. В рамках данного исследования на первом этапе проводились измерения величины тока, протекающего через изолирующий стык, при имитации вариаций его собственного сопротивления с помощью магазина сопротивлений. Этот эксперимент повторялся при уменьшении

сопротивления изолирующего стыка по заранее определенным значениям, при этом парный стык имел максимальное сопротивление.

Для получения аналитической зависимости, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные, была применена полиномиальная аппроксимация. Выбор этого метода обусловлен нелинейным характером зависимости тока от сопротивления, который не может быть с достаточной точностью описан простой линейной моделью, особенно в рабочем диапазоне сопротивлений, где наблюдаются наибольшие изменения тока. Аппроксимация полиномом третьей степени позволяет учесть кривизну экспериментальной зависимости и обеспечивает высокую точность приближения на интервале измерений.

Процесс аппроксимации был выполнен с использованием метода наименьших квадратов (МНК). В результате была выведена формула аппроксимирующей кривой в виде полинома третьей степени:

$$d(R_{st}) = 150,5 - 1031,3x + 3065,1x^2 - 3340,2x^3.$$

На рис. 1 результаты исследований представлены графически: зависимость тока, протекающего через стык, от сопротивления одного из стыков, замеренная на полигоне железной дороги; данные математического моделирования, аппроксимированного полиномом третьего порядка [7, 8].

Физический процесс увеличения тока при снижении сопротивления носит нелинейный характер вследствие влияния входного

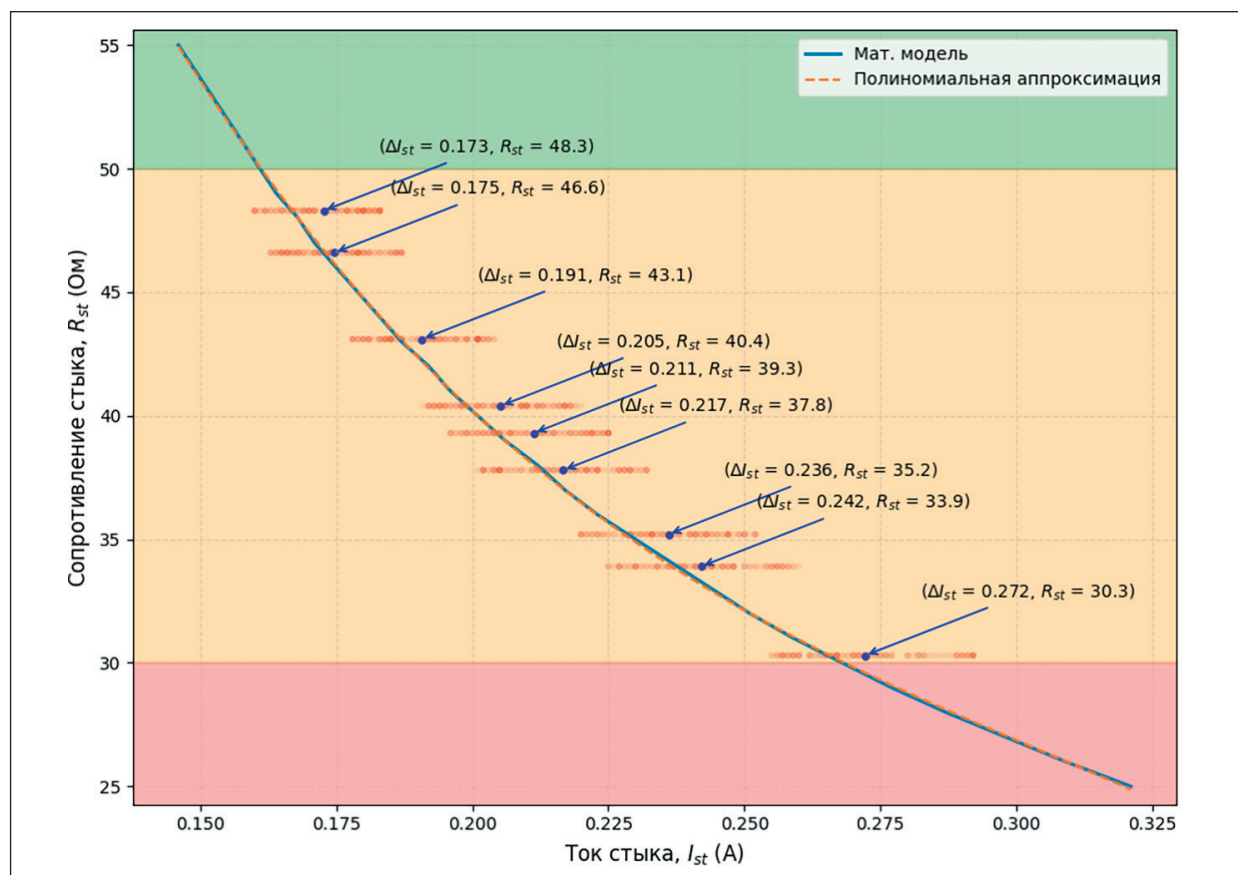


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований в рабочем интервале измерений

сопротивления рельсовой цепи и других факторов.

Важным свойством использованной модели является ее поведение за пределами интервала экспериментальных данных. Поскольку старший коэффициент a , аппроксимирующего полинома третьей степени, является отрицательным, при экстраполяции и значительном уменьшении значений тока (I_{st}) кривая зависимости сопротивления (R_{st}) будет асимптотически стремиться к отрицательной бесконечности [9, 10]. Это указывает на то, что полученная модель защищена от ложноположительных и ложноотрицательных результатов при прогнозировании дальнейшего сопротивления изолирующего стыка.

На втором этапе проводились измерения величины тока, протекающего через междроссельную перемычку, при имитации вариаций сопротивления и уменьшении сопротивления

изолирующего стыка 1 по заранее определенным значениям. При этом парный стык 2 имел максимальное сопротивление.

Применимость диагностической функции с использованием тока в междроссельной перемычке $I_{st} = f(R_{st})$ проверяется реальными данными, полученными измерениями, представленными в виде графика, и сравнением с диагностической функцией [3].

Анализ результатов, представленных на графике (рис. 2), показывает, что величина средней абсолютной ошибки сопоставления экспериментальных измерений с расчетными значениями по предложенной математической модели 12,75% подтверждает применимость тока, протекающего через междроссельную перемычку, как одного из информативных признаков диагностики изолирующих стыков [11, 12].

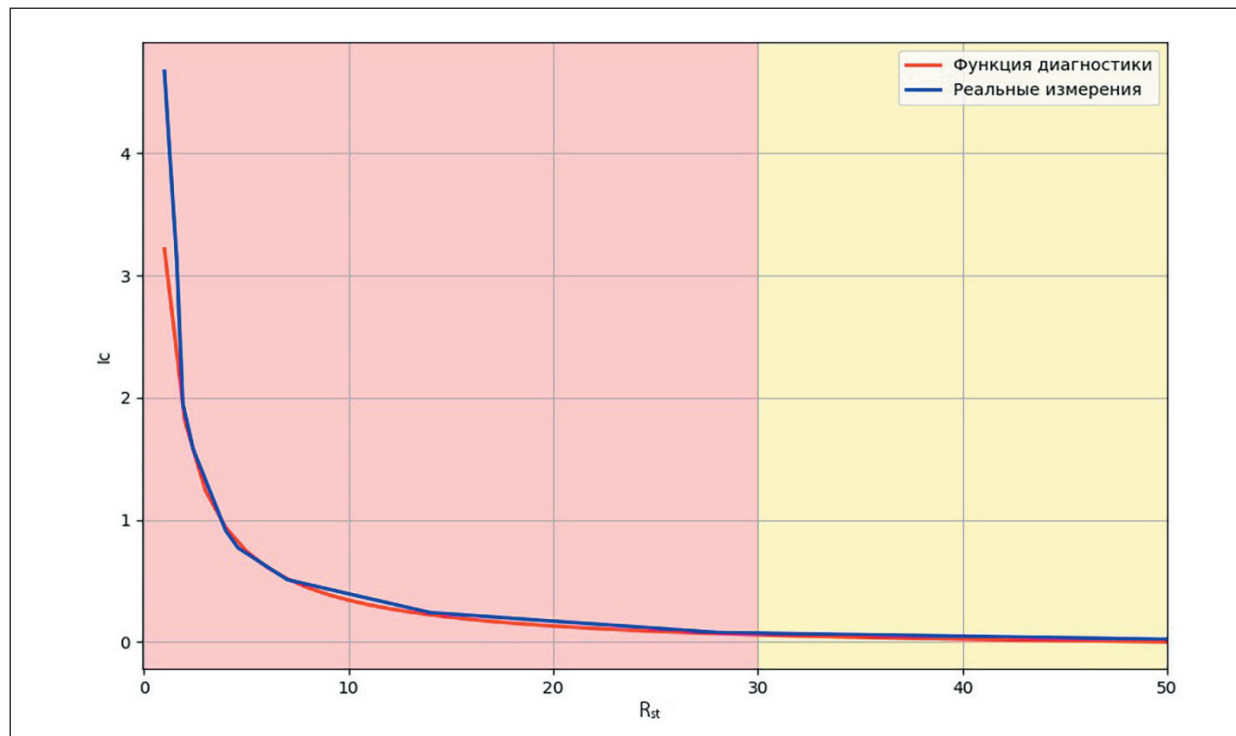


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований на междроссельной перемычке в рабочем интервале измерений

Заключение

Экспериментальным и аналитическим путем была установлена обратно пропорциональная зависимость: с уменьшением сопротивления изолирующих стыков пропорционально возрастает сила сигнального тока, протекающего через них. Достоверное совпадение данных, полученных в ходе натурных экспериментов, с результатами, рассчитанными с помощью математической модели, доказывает принципиальную возможность реализации диагностики. Таким образом, контроль состояния изолирующих стыков может базироваться на диагностических функциях, где в качестве ключевого аргумента выступают значения сигнальных токов, позволяющие фиксировать предотказное и неисправное состояние изолирующего стыка. В дальнейшем при расширении диапазона измерений в сторону больших сопротивлений предложенный диагностический признак может быть использован для раннего обнаружения тенденции к отказу.

Список источников

1. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Анализ отказов и эволюция стратегий организационно-технических мероприятий по обслуживанию изолирующих стыков // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 2 (98). С. 73–78. EDN NLPKZW
2. Перникис Б. Д., Ягудин Р. Ш. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 254 с.
3. Диагностика изолирующих стыков на основе оценки предотказных состояний / Е. М. Тарасов [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 6. С. 2–4. DOI: 10.62994/AT.2025.6.6.001. EDN UHCQR
4. Разработка математической модели изолирующих стыков в комплексе с дроссель-трансформаторами / Е. М. Тарасов [и др.] // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 316–320. EDN DPZVHC
5. Insulating Joints as a Destabilizing Factor in the Operation of the Track Circuit / E. Tarasov [et al.] // VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023), Karshi, June 14–16, 2023. Les Ulis: EDP Sciences, 2023. P. 1019. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101019. EDN YMJDQR
6. Дмитренко И. Е., Устинский А. А., Цыганков В. И. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 312 с.
7. Сепетый А. А., Федорчук А. Е. Технология диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ на уровне дистанций автоматики и телемеханики // Информатизация и связь. 2013. № 2. С. 71–76. EDN RBFTTD
8. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. 2024. № 2. С. 45–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6. EDN DSUOVV
9. Бредун И. С. Разработка алгоритма оценки состояния изолирующих стыков на основе интеграции априорных данных // Транспортное дело России. 2025. № 2. С. 204–206. EDN VBLTBY
10. Маштаков Н. С., Часов П. С. Предиктивная аналитика: из исторических данных к стратегическому прогнозированию // Оригинальные исследования. 2023. Т. 13, № 12. С. 61–66. EDN LKTDSY
11. Орлов А. Машинное обучение для больших данных // Открытые системы. СУБД. 2016. № 1. С. 26–27. EDN VQCOER
12. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. 171 с. EDN: XAFAIN

Дата поступления: 12.01.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

НАДЕЖКИН Вадим Александрович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» ПривГУПС; v.nadezhkin@samgups.ru

БРЕДУН Илья Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» ПривГУПС; v.nadezhkin@samgups.ru

Experimental Studies of the Dependence of the Current Flowing Through an Insulating Joint on Changes in Its Resistance

V. A. Nadezhkin, I. S. Bredun

Volga State University of Railway Transport, 2v Svobody st., Samara, 443066, Russia

For citation: *Nadezhkin V.A., Bredun I.S. Experimental Investigation of Insulating Joint Current vs. Resistance // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 436–442. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-436-442 (In Russian)*

Abstract

Objective: experimental verification of the hypothesis that the magnitude of the signal current flowing through an insulating joint of a track circuit is an informative diagnostic indicator. The research aims to establish a quantitative relationship between the change in the insulating joint's resistance and the current strength, which is necessary for creating a system for continuous monitoring and predicting its pre-failure condition. **Methods:** field measurements were conducted on a railway test site using a Track Circuit Current Indicator (ITRC-M). Polynomial approximation using the least squares method (LSM) was applied to process the experimental data and obtain an analytical relationship. The model that provided the best fit to the experimental data was a third-degree polynomial. **Results:** an inverse relationship was established: as the resistance of the insulating joint decreases, the magnitude of the signal current flowing through it systematically increases. A high-precision mathematical model (a third-degree polynomial) was obtained, which reliably describes the experimental data within the operating range of resistances. It is shown that the behavior of the model beyond the measurement interval (asymptotically approaching negative infinity as the current decreases) eliminates the possibility of false-positive and false-negative predictions during diagnostics, confirming its reliability. **Practical significance:** the research results prove the fundamental possibility of developing and implementing a Technical Diagnostic and Monitoring System for Insulating Joints (STDM-IJ). Using the proposed diagnostic indicator (the magnitude of the signal current) will enable a transition from scheduled labor-intensive inspections to a system of continuous automated monitoring. This will improve traffic safety through the early detection of pre-failure conditions of insulating joints, reduce operational costs, and enhance the reliability of railway signaling and interlocking systems.

Keywords: technical diagnostics, monitoring of header devices, predictive analytics, insulating joints, rail circuits, pre-fault conditions, signal current

References

1. Tarasov E.M., Nadezhkin V.A. Analiz otkazov i evolyutsiya strategij organizatsionno-tekhnicheskikh meropriyatij po obsluzhivaniyu izoliruyushchikh stykov [Failure Analysis and Evolution of Strategies for Organizational and Technical Maintenance Measures for Insulating Joints], *Vestnik transporta Povolzh'ya*

[*Volga Transport Bulletin*], no. 2 (98), pp. 73–78. EDN: NLPKZW (In Russian)

2. Pernikis B.D., Yagudin R. Sh. Preduprezhdenie i ustranenie neispravnostej v ustrojstvakh STsB [Prevention and Elimination of Faults in Signaling, Centralization and Blocking Devices], 2nd ed., rev. and suppl. Moscow, Transport, 1994. 254 p. (In Russian)

3. Tarasov E. M., et al. Diagnostika izoliruyushchikh stykov na osnove otsenki predotkaznykh sostoyanij [Diagnostics of Insulating Joints Based on Assessment of Pre-Failure States], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communication, Informatics]*, 2025 no. 6, pp. 2–4. DOI: 10.62994/AT.2025.6.6.001. EDN: UIICQR (In Russian)
4. Tarasov E. M., et al. Razrabotka matematicheskoy modeli izoliruyushchikh stykov v komplekse s drossel'-transformatorami [Development of a Mathematical Model of Insulating Joints in Combination with Choke Transformers], *Nauka i obrazovanie transportu [Science and Education for Transport]*, 2021, no. 1, pp. 316–320. EDN: DPZVHC (In Russian)
5. Tarasov E. M., et al. Insulating Joints as a Destabilizing Factor in the Operation of the Track Circuit, *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023)*, Karshi, June 14–16, Les Ulis, 2023, pp. 01019. EDP Sciences. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101019. EDN: YMJDQR
6. Dmitrenko I. E., Ustinskij A. A., Tsygankov V. I. Izmereniya v ustrojstvakh avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte [Measurements in Automation, Telemechanics and Communication Devices on Railway Transport], Moscow, *Transport*, 1982, 312 p. (In Russian)
7. Sepetyi A. A., Fedorchuk A. E. Tekhnologiya diagnostirovaniya i monitoringa ustrojstv ZhAT na urovne distantsij avtomatiki i telemekhaniki [Technology for Diagnostics and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices at the Level of Automation and Telemechanics Distances], *Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and Communication]*, 2013, no. 2, pp. 71–76. EDN: RBFTTD (In Russian)
8. Tarasov E. M., Nadezhkin V. A. Diagnostirovanie v zhiznennom tsikle izoliruyushchikh stykov rel'sovykh tsepej [Diagnostics in the Life Cycle of Insulating Joints of Track Circuits], *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informatsionnyj sbornik [Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection]*, 2024, no. 2, pp. 45–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6. EDN: DSUOVVB (In Russian)
9. Bredun I. S. Razrabotka algoritma otsenki sostoyaniya izoliruyushchikh stykov na osnove integratsii apriornykh dannyykh [Development of an Algorithm for Assessing the Condition of Insulating Joints Based on Integration of a Priori Data], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]*, 2025, no. 2, pp. 204–206. EDN: VBLTBY (In Russian)
10. Mashtakov N. S., Chasov P. S. Prediktivnaya analitika: iz istoricheskikh dannyykh k strategicheskomu prognozirovaniyu [Predictive Analytics: from Historical Data to Strategic Forecasting], *Original'nye issledovaniya [Original Research]*, 2023, no. 13 (12), pp. 61–66. EDN: LKTDSY (In Russian)
11. Orlov A. Mashinnoe obuchenie dlya bol'shikh dannyykh [Machine Learning for Big Data], *Otkrytye sistemy. SUBD [Open Systems. DBMS]*, 2016, no. 1, pp. 26–27. EDN: VQCOER (In Russian)
12. Efanov D. V. Funktsional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional Control and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices: Monograph], Saint Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2016, 171 p. (In Russian)

Received: January 12, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Vadim A. NADEZHKIN — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport” at VSTU; v.nadezhkin@samgups.ru
Ilya S. BREDUN — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport” at VSTU; i.bredun@samgups.ru