

УДК 656.259.12

О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики

В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, А. Р. Мусин

Приволжский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 443066, Самара, ул. Свободы, 2В

Для цитирования: Надежкин В. А., Надежкина С. А., Мусин А. Р. О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 484–491. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-484-491

Аннотация

Цель: Рассмотреть влияние систем технического диагностирования и мониторинга (ТДМ) на восстанавливаемость устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Исследовать системные недостатки современных технологий диагностики, приводящие к росту эксплуатационных расходов и рискам для безопасности перевозочного процесса. Обосновать необходимость модернизации систем мониторинга на основе предиктивной аналитики для перехода от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к интеллектуальным методам управления техническим состоянием оборудования. **Методы:** Анализ успешного внедрения отечественных систем, как АПК-ДК, включая их функциональные возможности по сбору данных, выявлению предотказных состояний и автоматизированной идентификации неисправностей. Исследование графических данных, отражающих динамику параметров работы рельсовых цепей, для выявления отклонений штатного функционирования, предшествующих отказам. Сравнение традиционных методов ППР с современными подходами, основанными на предиктивной аналитике и машинном обучении. **Результаты:** Выявлены ключевые недостатки существующих систем мониторинга, такие как ложные срабатывания и неспособность справляться с современными нагрузками. Показано, что предиктивная аналитика позволяет обнаруживать малозаметные изменения параметров (например, колебания напряжения, температурные отклонения), которые свидетельствуют о развитии предотказных состояний. На примере графиков рельсовых цепей продемонстрированы характерные периоды: стабильная работа и появление аномалий перед отказом, а также отказное состояние. **Практическая значимость:** Показана целесообразность развития ТДМ за счет применения технологий предиктивной аналитики и цифрового моделирования, что позволит минимизировать аварийные ситуации, оптимизировать техническое обслуживание за счет адресных ремонтов и снизить эксплуатационные затраты. Модернизация систем ЖАТ является необходимым условием для повышения надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры в условиях роста грузооборота и интенсивности эксплуатации. Результаты исследования могут быть использованы для разработки систем раннего предупреждения отказов и обновления нормативной базы в области технической диагностики.

Ключевые слова: Техническая диагностика, мониторинг устройств ЖАТ, предиктивная аналитика, восстанавливаемость оборудования, ложные срабатывания, железнодорожная автоматика и телемеханика, интеллектуальные системы мониторинга, отказы рельсовых цепей.

Введение

В современных условиях на железнодорожном транспорте осуществляется внедрение перспективных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), созданных на основе современной микропроцессорной элементной базы. К числу таких систем относится автоматизированная система диспетчерского контроля АПК-ДК [1].

В функционал комплекса АПК-ДК входит не только реализация стандартных задач систем диспетчерского контроля, таких как предоставление оперативной и достоверной информации о дислокации подвижного состава на контролируемом участке. Внедрение данной системы осуществляется в контексте формирования интегрированной автоматизированной системы управления хозяйством сигнализации, связи и вычислительной техники (АСУ-Ш), где АПК-ДК выполняет роль ключевого технологического компонента. Его назначение заключается в обеспечении всестороннего и объективного мониторинга состояния устройств автоматики и телемеханики в пределах зоны ответственности [2].

Автоматизированная система АПК-ДК осуществляет мониторинг и техническую диагностику устройств СЖАТ как на перегонных, так и на станционных участках. Функциональные возможности системы включают: сбор и систематизацию статистических данных о работе оборудования, выявление признаков предотказных состояний, анализ факторов, приводящих к снижению качества функционирования, автоматизированную идентификацию неисправностей устройств СЦБ.

Реализация указанных функций создает технологическую основу для перехода на прогнозную систему технического обслуживания СЖАТ, основанную на непрерывной диагностике оборудования, прогнозировании его состояния, учете фактического ресурса эксплуатации при-

боров. После чего получаемая диагностическая информация в автоматизированном режиме передается дежурному электромеханику, диспетчеру СЦБ-дистанции, техническим специалистам, ответственным за анализ статистики отказов, другим уполномоченным пользователям корпоративной сети различных уровней (от дистанционного до дорожного управления) [3, 4].

Современное состояние технического оснащения на значительной части железнодорожных участков Российской Федерации характеризуется высоким уровнем физического износа. Эксплуатационная практика вынуждает осуществлять планово-предупредительные ремонтные работы (ППР) в условиях временного дефицита, что неизбежно приводит к снижению качества выполняемых работ. В существующих условиях эксплуатации обеспечение надежной и безопасной работы технических средств невозможно без реализации современных систем постоянного контроля технического состояния и диагностики оборудования.

Функциональные задачи систем мониторинга

Основной функциональной задачей систем мониторинга является комплексный анализ текущего состояния технических устройств с последующим оповещением обслуживающего персонала о необходимости проведения профилактических ремонтных мероприятий, что позволяет предотвратить возникновение аварийных ситуаций. Внедрение подобных систем создает предпосылки для перехода на прогрессивную технологию технического обслуживания, обеспечивающую:

- повышение эффективности использования производственных мощностей за счет увеличения межремонтных интервалов;
- выполнение адресных ремонтных воздействий исключительно на оборудовании, требующем вмешательства;

– минимизацию вероятности аварийных ситуаций, обусловленных внезапными отказами технических устройств.

Дополнительным экономическим эффектом от внедрения указанных систем является существенное снижение эксплуатационных затрат на техническое обслуживание железнодорожной инфраструктуры. В условиях постоянного роста грузооборота на железнодорожном транспорте и увеличения интенсивности эксплуатации инфраструктуры вопросы надежности и бесперебойной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) приобретают особую актуальность [5]. Существующие системы мониторинга, разработанные в рамках устаревших технологических решений, зачастую не справляются с современными нагрузками, что приводит к росту количества отказов оборудования, незапланированным простоям и, как следствие, к значительным экономическим потерям.

Физический износ устройств СЦБ, рост требований к пропускной способности и необходимость минимизации эксплуатационных затрат диктуют потребность в принципиально новых подходах к организации систем диагностики и управления техническим состоянием оборудования. Традиционные методы планово-предупредительных ремонтов (ППР) уже не обеспечивают необходимой эффективности, поскольку не учитывают реальное состояние устройств и их фактическую наработку.

Внедрение современных интеллектуальных систем мониторинга, основанных на технологиях предиктивной аналитики и цифрового моделирования, позволит не только своевременно выявлять предотказные состояния оборудования, но и оптимизировать процессы технического обслуживания. Это, в свою очередь, обеспечит снижение эксплуатационных расходов, повысит безопасность движения и минимизирует простои, связанные с внезапными отказами.

Таким образом, модернизация систем мониторинга состояния устройств ЖАТ является не просто актуальной задачей, а необходимым условием для устойчивого развития железнодорожного транспорта в условиях растущих нагрузок и ужесточающихся требований к надежности и эффективности работы инфраструктуры [6].

Предиктивная аналитика в диагностике ЖАТ на примере рельсовых цепей

В этой связи особую актуальность приобретает переход от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к интеллектуальным системам управления техническим состоянием на основе предиктивной аналитики [7]. В отличие от традиционных методов, предиктивные технологии позволяют не только фиксировать текущее состояние оборудования, но и прогнозировать его поведение в перспективе.

Ключевым преимуществом предиктивной аналитики является способность выявлять малозаметные, но критически важные изменения параметров работы устройств ЖАТ — таких как колебания напряжения, снижение уровня изоляции, отклонения температурных режимов и других характеристик. Даже если эти показатели остаются в рамках допустимых значений, их динамика может свидетельствовать о развитии предотказного состояния. Современные алгоритмы машинного обучения способны анализировать эти изменения и предупреждать о потенциальных отказах за несколько часов или даже дней до их возникновения [8].

Внедрение таких систем позволит не только минимизировать количество аварийных ситуаций, но и оптимизировать процесс технического обслуживания, перейдя от регламентных работ к адресным вмешательствам именно там, где это действительно необходимо [9].

Это, в свою очередь, обеспечит значительное снижение эксплуатационных затрат и повышение

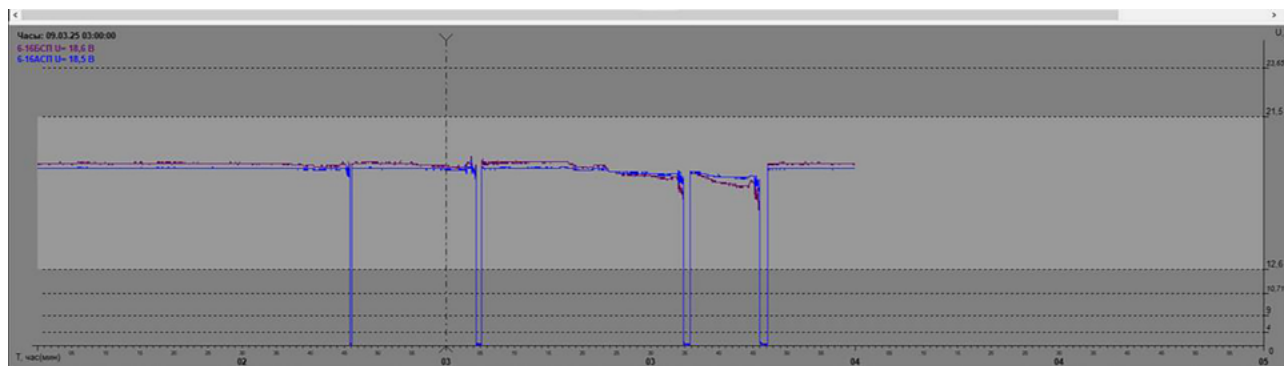


Рис. 1. График зависимости величины напряжения на путевом приемнике рельсовой цепи в шунтовом режиме при штатной работе



Рис. 2. График зависимости величины аномального изменения колебания напряжения (в пределах нормы) на путевом приемнике рельсовой цепи

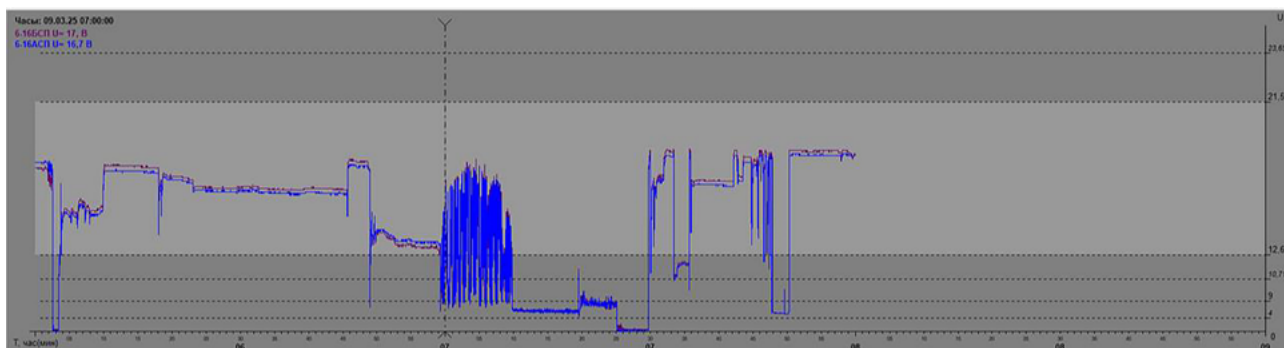


Рис. 3. График изменения величины напряжения на путевом приемнике рельсовой цепи во время отказного состояния рельсовой цепи

общей надежности железнодорожной инфраструктуры. На представленных графиках зафиксированы критические изменения параметров работы рельсовой цепи, которые привели к отказу оборудования и простою грузовых поездов. Анализ этих данных позволяет выявить характерные аномалии, появляющиеся за несколько часов до аварии.

Особый интерес представляют:

- необычные колебания напряжения, которые сначала оставались в пределах нормы;
- постепенное нарастание амплитуды скачков напряжения;
- резкое изменение характеристик за 4 часа до полного отказа.

На представленных рисунках (рис. 1–3) изображены графики ключевых параметров работы

рельсовой цепи, включая значения напряжения и его изменения за период времени.

На основании анализа графических данных можно выделить три характерных временных периода, предшествовавших отказу рельсовой цепи:

1. Период стабильной работы (03:00–03:30) (рис. 1).

Графики демонстрируют типичную картину работы рельсовой цепи в шунтовом режиме, параметры напряжения соответствуют нормальным значениям при прохождении подвижного состава, а динамика сигнала отражает стандартный паттерн поведения системы.

2. Период появления аномалий (03:30–06:59) (рис. 2).

С 03:30 фиксируются первые нехарактерные колебания напряжения, где значения остаются в пределах допустимой нормы, но:

- наблюдается отклонение от типичной динамики сигнала;
- постепенно увеличивается амплитуда колебаний;
- на рис. 2 появляются признаки дивергенции, свидетельствующие о нарастающей нестабильности системы.

Критический период (после 07:00) (рис. 3).

Через 3,5 часа после первых отклонений мы можем наблюдать колебания напряжения, выходящие за допустимые пределы. На рис. 3 четко прослеживается выход параметров за критические значения, что, в свою очередь говорит о полном отказе рельсовой цепи, нарушении штатного функционирования участка, вынужденном простое подвижного состава.

Данная динамика наглядно демонстрирует развитие аварийной ситуации — от первых малозаметных отклонений до критического выхода параметров за допустимые границы. Особую важность представляет период 03:30–06:59, когда система, оставаясь формально работоспособной,

уже демонстрировала признаки надвигающегося отказа.

Существующая система (АПК-ДК) не способна фиксировать ранние аномалии (как на рис. 2), где напряжение формально в норме, но динамика сигнала указывает на развитие отказа.

Предлагаемый подход дополняет и развивает функционал АПК-ДК, переводя диагностику с реактивного на прогностический уровень. В отличие от АПК-ДК, которая фиксирует отклонения постфактум, предиктивная аналитика:

- анализирует динамику параметров, а не их статические значения;
- использует машинное обучение для выявления скрытых предотказных состояний;
- обеспечивает более раннее и точное предупреждение отказов.

Заключение

Исследованные графические данные, отражающие динамику параметров работы рельсовых цепей, для выявления отклонений, предшествующих отказам, показывают, что даже незначительные отклонения от штатного функционирования рельсовых цепей могут быть ранними признаками будущей поломки.

Детальное изучение представленных графиков особенно ценно для разработки системы раннего предупреждения подобных отказов, так как позволяет определить точные параметры мониторинга состояния рельсовых цепей, что подтверждает необходимость модернизации систем технической диагностики и мониторинга устройств ЖАТ путем внедрения предиктивной аналитики.

Список источников

1. Автоматика, связь, информатика: научно-теоретический и производственно-технический журнал. — М.: 2008/09.
2. Кайнов В. М. Доклад начальника департамента автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» на четвертой

международной научно-практической конференции «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» / В. М. Кайнов.

3. Тарасов Е. М. К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга / Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова, В. А. Надежкин // Наука и образование транспорту. — 2022. — № 1. — С. 362–364.

4. Сепетый А. А. Технология диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ на уровне дистанций автоматики и телемеханики / А. А. Сепетый, А. Е. Федорчук // Информатизация и связь. — 2013. — № 2. — С. 71–76.

5. Тарасов Е. М. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей / Е. М. Тарасов, В. А. Надежкин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2024. — № 2. — С. 45–50. — DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6.

6. Ефанов Д. В. Особенности информационного сопряжения систем мониторинга инженерных конструкций и сооружений с системами управления движением поездов / Д. В. Ефанов, Е. М. Михайлюта // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года. — Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. — С. 211–213.

7. Маштаков Н. С. Предиктивная аналитика: из исторических данных к стратегическому прогнозированию / Н. С. Маштаков, П. С. Часов // Оригинальные исследования. — 2023. — Т. 13. — № 12. — С. 61–66.

8. Орлов А. Машинное обучение для Больших Данных / А. Орлов // Открытые системы. СУБД. — 2016. — № 1. — С. 26–27.

9. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / Д. В. Ефанов. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 171 с.

Дата поступления: 17.04.2025

Решение о публикации: 29.05.2025

Контактная информация:

НАДЕЖКИН Вадим Александрович — канд. техн.

наук, доц. кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; v.nadezhkin@samgups.ru

НАДЕЖКИНА Снежана Андреевна —

аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»;

s.nadejkina@samgups.ru

МУСИН Абдулла Рустамович — студент;

sun73674@gmail.com

Artificial Intelligence Technologies for Evaluation and Prediction of the Technical Condition of Railway Automation and Telemechanic Devices

V. A. Nadezhkin, S. A. Nadezhkina, A. R. Musin

Volga State University of Railway Transport, 2, Svobody str., Samara, 443066, Russian Federation

For citation: Nadezhkin V. A., Nadezhkina S. A., Musin A. R. Artificial Intelligence Technologies for Evaluation and Prediction of the Technical Condition of Railway Automation and Telemechanic Devices. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 484–491. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-484-491

Summary

Purpose: To assess the impact of technical diagnostics and monitoring (TDM) systems on the recoverability of railway automation and telemechanic (RAT) devices. To investigate the shortcomings of modern diagnostic technologies with regard to their impact on increased operational costs and transportation safety risks. To justify the necessity of monitoring system modernization based on predictive analytics for transition from scheduled preventive maintenance (SPM) to intelligent methods of equipment condition management. **Methods:** Analysis of the successful implementation of domestic systems, such as the hardware and software complex of dispatching control (HSC DC), including their functionalities for data collection, pre-failure state detection, and automated fault identification. A study of graphical data reflecting the dynamics of rail circuit parameters for identifying deviations from the standard operation preceding failures. Comparing traditional SPM methods with modern approaches that are based on predictive analytics and machine learning. **Results:** A number of significant deficiencies in current monitoring systems have been identified. These include the occurrence of false alarms and inadequate performance in handling current workloads. The capacity of predictive analytics to detect subtle parameter changes, such as voltage fluctuations and temperature deviations, has been demonstrated to be indicative of developing pre-failure conditions. As demonstrated by the rail circuit graphs, the typical phases can be observed in the form of steady operation and the appearance of pre-failure anomalies, as well as failure states. **Practical significance:** The feasibility of enhancing TDM through the implementation of predictive analytics and digital modelling was demonstrated, with the potential to help minimize emergencies, optimize maintenance via targeted repairs, and reduce operational costs. The modernization of RAT systems is imperative for enhancing the reliability and safety of railway infrastructure, particularly in the context of increasing freight traffic and operational intensity. The findings of the study can be used to develop early failure warning systems and update regulatory frameworks in technical diagnostics.

Keywords: Technical diagnostics, monitoring of RAT devices, predictive analytics, equipment recoverability, false alarms, railway automation and telemechanics, intelligent monitoring systems, failures of rail circuits.

References

1. *Avtomatika, svyaz', informatika: nauchno-teoreticheskiy i proizvodstvenno-tekhnicheskiy zhurnal* [Automation, communication, informatics: scientific-theoretical and industrial-technical journal]. Moscow, 2008/09. (In Russian)
2. Kaynov V. M. *Doklad nachal'nika departamenta avtomatiki i telemekhaniki OAO "RZhD" na chetvertoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte"* [Report of the Head of the Department of Automation and Telemechanics of JSC Russian Railways at the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automation and Telemechanics in Railway Transport"]. (In Russian)
3. Tarasov E. M., Tarasova A. E., Nadezhkin V. A. K voprosu avtomatizatsii tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa [On the issue of automation of technical diagnostics and monitoring]. *Nauka i obrazovanie transport* [Science and education in transport]. 2022, Iss. 1, pp. 362–364. (In Russian)
4. Sepetyy A. A., Fedorchuk A. E. Tekhnologiya diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv ZhAT na urovne distantsiy avtomatiki i telemekhaniki [Technology of diagnostics and monitoring of railway automation and telemechanics devices at the level of automation and telemechanics distances]. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication]. 2013, Iss. 2, pp. 71–76. (In Russian)
5. Tarasov E. M., Nadezhkin V. A. Diagnostirovanie v zhiznennom tsikle izoliruyushchikh stykov rel'sovykh tsepey [Diagnostics in the life cycle of insulating joints of track circuits]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2024, Iss. 2, pp. 45–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6. (In Russian)

6. Efanov D. V., Mikhaylyuta E. M. Osobennosti informatsionnogo sopryazheniya sistem monitoringa inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy s sistemami upravleniya dvizheniem poezdov [Features of information interfacing of engineering structure and facility monitoring systems with train traffic control systems]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy KhIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Godu kachestva. V 2-kh chastyakh, Gomel', 21–22 noyabrya 2024 goda* [Transport safety issues: materials of the XIII international scientific and practical conference dedicated to the Year of Quality. In 2 parts, Gomel, November 21–22, 2024]. Gomel': Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2024, pp. 211–213. (In Russian)

7. Mashtakov N. S., Chasov P. S. Prediktivnaya analitika: iz istoricheskikh dannykh k strategicheskomu prognozirovaniyu [Predictive Analytics: From Historical Data to Strategic Forecasting]. *Original'nye issledovaniya* [Original Research]. 2023, vol. 13, Iss. 12, pp. 61–66. (In Russian)

8. Orlov A. Mashinnoe obuchenie dlya Bol'shikh Danykh [Machine Learning for Big Data]. *Otkrytye sistemy.*

SUBD [Open Systems. DBMS]. 2016, Iss. 1, pp. 26–27. (In Russian)

9. Efanov D. V. *Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya* [Functional Control and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices: monograph]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, 171 p. (In Russian)

Received: April 17, 2025

Accepted: May 29, 2025

Author's information:

Vadim A. NADEZHKIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport; v.nadezhkin@samgups.ru

Snezhana A. NADEZHKINA — Postgraduate Student, Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport; s.nadejkina@samgups.ru

Abdulla R. MUSIN — Student; sun73674@gmail.com