

УДК 681.518.5:629.423

EDN CCTDNX

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА – МЕТОДЫ, ПРИМЕРЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Е.Л. РыжоваORCID: 0000-0001-7984-255 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

Обосновывается важность развития автоматизированных систем диагностики для повышения эффективности и надежности работы электроподвижного состава (ЭПС), а также для перехода к более совершенным системам управления, основанным на прогнозировании технического состояния. Проведен анализ информационных систем контроля технического состояния ЭПС, необходимых для повышения надежности и эффективности его эксплуатации в условиях изменяющегося перевозочного процесса. В качестве развития направления исследования предлагается сравнительный анализ существующих и инновационных методов автоматизированной диагностики, их преимущества и недостатки при определении параметров и характеристик оборудования ЭПС. Показана возможность применения различных перспективных инновационных автоматизированных систем диагностирования с использованием информационных технологий для оценки реального состояния ЭПС. Переход к предиктивному управлению режимами работы ЭПС и энергетической инфраструктуры железных дорог позволит оптимизировать использование силы тяги, рекуперативного торможения и соблюдение графиков движения поездов. Обосновывается необходимость объединения интеллектуальных, технологических и технических ресурсов для создания единой системы сбора и получения объективной информации для всех уровней диагностики. Сочетание различных способов контроля и идентификации обеспечит полноту и достоверность информации о подвижном составе, улучшит информационно-управляющие системы за счет уменьшения влияния «человеческого фактора» с последующим переходом к «прогноznым» системам диагностирования.

Ключевые слова: автоматизированные системы диагностирования, большие данные, железнодорожный транспорт, интеллектуальные технологии, интернет вещей, информационные системы, надежность, нейронные сети, предиктивная аналитика, прескриптивная система диагностирования, сквозные цифровые технологии, техническое обслуживание и ремонт, электроподвижной состав.

Для цитирования: Рыжова Е.Л. Применение информационных технологий в системах диагностирования оборудования электроподвижного состава – методы,

примеры их реализации, перспективы развития // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 38-60. EDN CCTDNX

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGY IN DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR ELECTRIC ROLLING STOCK EQUIPMENT – METHODS, EXAMPLES OF IMPLEMENTATION, DEVELOPMENT PROSPECTS

E.L. Ryzhova

ORCID: 0000-0001-7984-2555 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article emphasizes the importance of developing automated diagnostic systems to improve the efficiency and reliability of electric rolling stock, as well as to transition to more advanced control systems based on predicting the technical condition. An analysis of the information systems for monitoring the technical condition of electric rolling stock was carried out, which are necessary to enhance the reliability and efficiency of its operation in a changing transportation environment. As a development of the research area, a comparative analysis of existing and innovative methods of automated diagnostics, their advantages and disadvantages in determining the parameters and characteristics of electric rolling stock equipment is proposed. The article demonstrates the possibility of using various promising innovative automated diagnostic systems based on information technologies to assess the real condition of electric rolling stock. The transition to predictive control of the operation modes of rolling stock and energy infrastructure of railways will optimize the use of traction force, regenerative braking and compliance with train schedules. The necessity of combining intelligent, technological and technical resources to create a unified system for collecting and obtaining objective information for all levels of diagnostics is substantiated. The combination of various methods of control and identification will ensure the completeness and reliability of information about rolling stock, improve information and control systems by reducing the influence of the “human factor” with the subsequent transition to predictive diagnostic systems.

Keywords: automated diagnostic systems, big data, railway transport, intelligent technologies, Internet of Things, information systems, reliability, neural networks, predictive analytics, prescriptive diagnostic system, end-to-end digital technologies, maintenance and repair, electric rolling stock.

For citation: E.L. Ryzhova, “Application of information technology in diagnostic systems for electric rolling stock equipment – methods, examples of implementation, development prospects”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 38-60, 2025. EDN CCTDNX

I. Введение

В процессе эксплуатации техническое состояние электропоезда ухудшается из-за износа деталей и механизмов, поломок и других факторов.

Это приводит к снижению ресурса надежности, заложенного при проектировании. Следствием являются отказы, аварии, нарушение графика движения поездов и перерасход энергии или топлива. Основная задача научно-технического развития ОАО «РЖД» – предупреждение этих явлений и обеспечение безопасности движения. Одной из ключевых целей является снижение энергоемкости перевозок, необходимость регулярной и эффективной технической диагностики, обслуживания электропоездов для поддержания их в исправном состоянии, обеспечения безопасности движения и снижения эксплуатационных затрат. Это является актуальным и требует теоретических и экспериментальных исследований.

Для решения данной задачи необходимы разработка и внедрение интеллектуальных предикативных и аналитических систем, построение которых выдвигает строгие требования к уровню цифровизации железнодорожного комплекса. Целью исследования является определение методов и технологий цифровой диагностики состояния поезда на основе анализа данных, получаемых с различных датчиков контроля состояния электроподвижного состава (ЭПС). На сегодняшний день существующий ручной контроль состояния поездов подвержен человеческим ошибкам. В рамках цифровой трансформации необходима устойчивая работа и совершенствование автоматизированных систем диагностики (СД). Использование современных мобильных, стационарных и встроенных средств контроля и передачи информации в диагностические центры минимизирует влияние человеческого фактора [1]. Для успешной автоматизации необходимы актуализация нормативной базы, повышение квалификации персонала и внедрение инновационных информационных технологий. Использование автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) состояния поездов и переход от планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) к обслуживанию по фактическому состоянию, основанному на данных, полученных от этих систем, позволяет осуществлять прогнозирование технического состояния оборудования, повысить безопасность и эффективности контроля состояния ЭПС, сократить затраты на обслуживание и ремонт [2].

II. Объект и методика

Эффективность перевозочного процесса напрямую зависит от характеристик и надежности ЭПС, которая, в свою очередь, определяется качеством технического обслуживания и ремонта. Усложнение конструкции электропоездов и электропоездов увеличивает значимость повышения технической и экономической эффективности оборудования ЭПС. Отказы электрооборудования, особенно в системах автоматического регулирования и управления, приводят к ощутимому материальному ущербу. Обострение проблемы надежности оборудования ЭПС объясняется увеличением сложности технических систем и повышением требований к качеству их работы,

экстремальными условиями эксплуатации (высокие скорости, ускорения, температуры, вибрация и т.д.), полной или частичной автоматизацией и, как следствие, исключением прямого контроля человеком систем и оборудования ЭПС [3, 4].

Наиболее распространенными проблемами эксплуатационного характера, влияющими на износ оборудования ЭПС, являются факторы, которые ускоряют износ деталей и узлов локомотивов:

- перепады температур, например, низкие температуры вызывают обледенение контактных частей аппаратов или высокие температуры приводят к пересыханию изоляции;

- влажность воздуха влияет на состояние изоляции токоведущих частей и лакокрасочных покрытий, особенно сильно при резких перепадах температуры;

- запыленность воздуха повышает электропроводимость поверхности изоляции;

- вибрационные и динамические нагрузки ускоряют износ изоляции, нарушают плотность соединений, разрушают сварные швы и детали [5, 6].

Для анализа влияния эксплуатационных факторов используются методы и исследования, направленные на снижение их негативного воздействия на износ оборудования ЭПС. Методы технической диагностики дают возможность оценивать техническое состояние изделий, обнаруживать и определять место нахождения неисправностей, прогнозировать остаточный ресурс [7]. Математическое моделирование позволяет разрабатывать математические модели для выявления видов отказов и учета технических характеристик оборудования [8]. Экспериментальные исследования также определяют влияние эксплуатационных факторов на износ оборудования ЭПС. Например, для определения интенсивности изнашивания щеток тяговых электродвигателей используют метод гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа [9]. При исследовании износа бандажей колесных пар выявлено, что на участках со сложным профилем пути (с долей кривых более 25 %) в условиях тяжеловесного движения и повышения скоростей наблюдается высокая интенсивность и неравномерность изнашивания гребней бандажей [8]. Исследование влияния токовой нагрузки на износ контактных элементов токоприемника установило, что повышение плотности тягового тока до 1000 А/см увеличивает износ угольных вставок токоприемника в 3,13 раза, металлокерамических на железной основе – в 2,6 раза, на медной основе – в 2,75 раза [10].

Согласно ГОСТ 34709-2021 и ГОСТ 34913-2022, системы диагностики железнодорожного подвижного состава должны соответствовать требованиям:

- сохранять работоспособное состояние во всех заданных условиях и режимах эксплуатации;

- обеспечивать надежное хранение информации, исключающее ее потерю в случае технических сбоев;

- представлять информацию о результатах диагностирования пользователю в форме, удобной для восприятия;

- соответствовать требованиям законодательства и нормативных документов по обеспечению защиты информации и соблюдению коммерческой тайны;

- обеспечивать автоматизацию контроля основных технологических процессов эксплуатации, обслуживания и ремонта устройств по фактическому техническому состоянию;

- гарантировать техническую диагностику и мониторинг технических средств с целью обеспечения заданных параметров функционирования, оперативной реакции на возникновение нестандартных ситуаций, прогнозирования поведения систем [11, 12].

При очевидной эффективности применения систем диагностики существуют и проблемы:

- низкая эффективность традиционных методов контроля и сложности проведения диагностики вручную, что не обеспечивает оперативность и точность диагностики;

- сложности обеспечения информационной безопасности при интеграции автоматизированного рабочего места линейного электромеханика с системой диагностики;

- проблематичность правильной интерпретации момента возникновения того или иного события при анализе журналов работы системы;

- сложности в измерении высокочастотной вибрации подшипниковых узлов некоторых машин [13-15].

На железнодорожном транспорте в России и в целом по миру поезда отправляются в депо для ремонта, но каждый лишний проведенный там день становится источником прямых потерь и дополнительных расходов из-за простоя локомотивов. Еще несколько лет назад телеметрические данные поездов обрабатывались вручную инженерами-диагностами. Они просматривали отчеты о работе поезда за несколько суток. Это подвергало информацию риску некорректной интерпретации, и часть ошибок могла быть упущена. Разработанная двухуровневая система технического диагностирования и текущего ремонта электронных устройств ЭПС с применением АСТД определила стратегию развития диагностических комплексов. Чтобы компенсировать снижение надежности из-за усложнения конструкции, необходимо увеличивать объем контроля состояния деталей, узлов и агрегатов, а также повышать качество и эффективность этого контроля. При существующем процессе технического обслуживания и текущего ремонта большая часть времени обслуживания тратится на выявление и локализацию неис-

правностей, а не на их устранение. Поэтому совершенствование систем диагностики, позволяющих эффективно выявлять и прогнозировать неисправности, повышает эффективность использования времени и ресурсов на техническое обслуживание [16].

III. Результаты исследования

ОАО «РЖД» постоянно улучшает системы диагностики, предлагая также сторонним разработчикам участвовать в этом процессе. Для прогнозирования поведения железнодорожных транспортных средств современные системы предиктивной аналитики вовлекают искусственный интеллект, машинное зрение, дополненную реальность и другие технологии, чтобы повысить надежность локомотивов. С использованием искусственного интеллекта, больших данных и машинного обучения на основе алгоритмов, предиктивная аналитика способна предсказывать сбои и поломки. Чем больше данных доступно для анализа, тем более точными становятся прогнозы. Локомотив, оснащенный современными сенсорами, передает огромные объемы данных, невозможные для анализа человеком. Обработка этих данных с использованием систем искусственного интеллекта позволяет оптимизировать параметры надежности и уменьшить количество поломок [17].

Методы цифровой диагностики включают функциональное и тестовое диагностирование, использование диагностических моделей, которые воспроизводят процессы отказов и восстановления работоспособности оборудования ЭПС. Функциональное диагностирование ЭПС заключается в исполнении системой заданных функций при заданных параметрах и позволяет выявить причины нарушения ее функционирования. Тестовое диагностирование позволяет проверить техническое состояние и параметры системы и ее элементов по тестовому воздействию на нее, а также причины их отклонения от заданных значений. В качестве диагностических используются логические модели, графы причинно-следственных связей, с помощью которых воспроизводят процессы отказов и восстановления работоспособности оборудования ЭПС. С помощью математической модели объекта контроля можно создать наиболее рациональные методы диагностирования системы в целом или отдельных ее функциональных узлов и блоков [18].

Примером реализации цифровой диагностики является система диагностики состояния токоприемников ЭПС, к неисправности которых могут привести следующие факторы:

- воздействие экстремальных ударных нагрузок и давление воздушной среды;
- воздействие атмосферных явлений (токоприемники подвержены влиянию дождя, снега, ледообразования и ветра);

– ненормальное взаимодействие с деталями контактной сети или плохое качество ремонта, например, из-за этого перекашиваются подвижные рамы токоприемника;

– удары полоза о контактный провод, когда контактный провод не натянут по всей длине равномерно: в некоторых местах он провисает, а в некоторых, наоборот, слишком сильно натянут;

– дефекты полоза и угольной вставки, что приводит к некорректному нажатию полоза на контактный провод;

– изнашивание накладок или ухудшение контакта из-за нарушения регулировки токоприемника;

– некорректное регулирование клапана может стать причиной ударов токоприемника и возникновению отколов и трещин.

Для диагностики токоприемников применяются различные методы: измерения значений статического нажатия с помощью электромеханических датчиков, контроль температуры системы подвижных рам токоприемников во время движения, измерение времени подъема и опускания токоприемников с помощью секундомера, использование стрелочного динамометра – для контроля статической характеристики нажатия токоприемника [18-21].

Система диагностики [23] основана на визуально-программной обработке данных с видеокамер для отслеживания перемещения контактного провода и выявления неисправностей токоприемника. Своевременное определение неисправности токоприемников локомотивов позволяет предотвратить обрыв контактного провода и повысить безопасность движения на магистрали [18, 22, 23].

СД токоприемников имеет преимущества по сравнению с другими методами диагностики оборудования ЭПС:

– своевременное выявление неисправностей токоприемника и предотвращение повреждений контактной сети;

– автоматическое поддержание оптимальных параметров взаимодействия токоприемника и контактного провода;

– снижение эксплуатационных расходов за счет точной диагностики и оптимизации ТОиР.

Некоторые недостатки систем диагностики токоприемников:

– чувствительность к погодным условиям и уровню освещенности – снег, сильный дождь и вспышки молний могут приводить к ложному срабатыванию;

– дестабилизирующие факторы в условиях проведения измерений (климат, электромагнитные поля, аэродинамика);

– необходимость в широкополосном канале передачи данных до контрольного пункта установки системы, что дорого и не всегда технически реализуемо;

– сложность в реализации алгоритмов распознавания изображений и обнаружения дефектов токоприемников в автоматическом режиме, что требует участия оператора;

– сложность видеорегистрации из-за высокой скорости движения ЭПС, что усложняет обработку данных;

– необходимость обеспечения необходимого уровня освещенности токоприемника в любое время суток для непрерывной работы диагностического комплекса. Применение мощного прожектора в темное время суток ослепляет машинистов проходящих локомотивов.

Поэтому требуется дальнейшая проработка методов прогнозирования и диагностики, а также способов предиктивного поиска оптимальных состояний оборудования ЭПС в современных условиях процесса перевозок [19, 24, 25].

Системы диагностики токоприемников успешно применяются в ряде зарубежных компаний: предиктивная аналитика системы *Alstom HealthHub* с использованием датчиков и *TrainScanner*, китайские автоматизированные диагностические тоннели *CRRC* с тепловизорами и лазерными сканерами, системы с использованием камер с ИИ в метро Сингапура и Гонконга, шведская система автоматического мониторинга *Sensys* с использованием цифрового фотоаппарата [14, 19].

Интеллектуальные датчики, которые используются для автоматической диагностики оборудования ЭПС, позволяют автоматически обрабатывать результаты измерений, выполнять самодиагностику оборудования ЭПС, сократить затраты на установку и обслуживание оборудования, повысить надежность за счет возможности самостоятельно обрабатывать результаты измерений, сокращая влияние человеческого фактора. При выборе интеллектуального датчика важно убедиться, что датчик подходит для конкретной системы, с которой он будет интегрироваться. Необходимо выбирать датчики с точными показателями, чтобы повысить стабильность в заданной среде. Также нужно учитывать радиус связи датчика, чтобы обеспечить его достаточную протяженность до необходимого места. Примером успешного применения интеллектуальных датчиков на ЭПС является комплексная СД электропоездов «КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-ТР3», предназначенная для диагностирования колесно-моторных блоков, тормозного оборудования, токоприемника, изоляции силовых и вспомогательных электрических цепей [21].

Для дистанционного контроля состояния подвижного состава используются искусственные нейронные сети, которые быстро обрабатывают большие объемы информации, снижая влияния человеческого фактора, сокращая затраты на техническое обслуживание и устранение неисправностей и улучшая общую эффективность работы железнодорожной инфраструктуры. Для реализации нейросетевых моделей диагностики оборудования

ЭПС разработана автоматизированная система «Доверенная среда локомотивного комплекса», в которой используются алгоритмы и модели прогнозирования отказов оборудования локомотивов на основе обработки бортовой телеметрии и данных. Искусственный интеллект (ИИ) выявляет аномалии в работе оборудования электровозов и тепловозов, а затем оценивает остаточный ресурс. Система диагностики технического состояния вагонов и локомотивов с помощью ИИ позволяет предотвращать потенциальные поломки и проводить сервисные работы до возникновения аварийных ситуаций. Дальнейшее развитие этих систем и применение передовых технологий позволит значительно улучшить процессы технического обслуживания и ремонта ЭПС. Однако использование нейронных сетей в контроле состояния подвижного состава имеет некоторые ограничения. Для работы нейросетевых диагностических комплексов необходимы мощные аппаратные средства. Также могут возникать ошибки из-за сложности настройки модели для работы в режиме реального времени, а также отсутствия обучающих данных или неправильных настроек сети. Необходимость принятия решений в условиях неопределенности связано с нестационарностью физических процессов в движении транспортных потоков, сложностью их математического описания и зависимостью характеристик от внешних условий. Кроме того, для применения нейронных сетей в железнодорожной отрасли остаются неизученными некоторые вопросы, связанные с архитектурой сетей, способами обучения, объемом обучающей выборки и программными продуктами для реализации моделей [26-29].

Еще несколько лет назад телеметрические данные поездов обрабатывались людьми. Примером успешного внедрения искусственного интеллекта в железнодорожную отрасль является система «Умный локомотив», внедрение которой началось в 2016 г. Система не только автоматизировала сбор и обработку данных о состоянии поездов и инфраструктуры, но и позволила значительно повысить безопасность и эффективность железнодорожных перевозок. Данные о состоянии техники поступают от датчиков, сенсоров и микропроцессорных систем управления, которые регистрируют параметры работы ЭПС. Каждый раз, когда локомотив направляется в депо на обслуживание или ремонт, телеметрические данные, записанные в пути следования, считываются с бортовой системы и загружаются в программу «Умный локомотив». Там они автоматически конвертируются и обрабатываются, запуская алгоритмы для выявления неисправных датчиков. Это позволяет в режиме реального времени оценивать состояние локомотивов и прогнозировать потенциальные отказы узлов локомотива до возможного возникновения аварии. Таким образом, риск происшествий и аварий в пути уменьшается до минимума, поскольку большинство поломок обнаруживается за месяц до их фактического возникновения. На текущий момент система «Умный локомотив» анализирует 23 вида оборудования поездов по

более чем 300 параметрам, что позволяет выявить около 60 категорий сбоев и автоматически выявлять нарушения эксплуатации, связанные с ошибками персонала. Только за 2024 г. использование системы «Умный локомотив» предотвратило аварии, выявив 100 тыс. потенциальных поломок [30, 31]. Некоторые компании уже используют нейросетевые технологии в железнодорожной отрасли. Концерн «Телематика» разработал комплексы для диагностики подвижного состава и грузов, используя нейросетевые разработки. Технология позволяет в режиме реального времени создавать 3D-модель составов, определять габариты, вес, нагревы, отрицательную динамику. Искусственный интеллект использует данные о погоде для автоматической корректировки планов поездок и скоростей движения поездов на основе метеоданных [30, 32, 33].

В дополнение к «Умному локомотиву», РЖД активно внедряет и другие системы диагностики, основанные на нейросетевых технологиях и предназначенные для мониторинга состояния подвижного состава. Эти системы позволяют автоматизировать процессы, выявлять дефекты на ранних стадиях и прогнозировать отказы, что способствует повышению безопасности и эффективности железнодорожных перевозок:

- автоматизированная система определения вагонов с отрицательной динамикой выявляет вагоны с повышенными колебаниями, что может указывать на проблемы с ходовой частью;

- система «Техновизор» автоматизирует визуальный контроль элементов подвижного состава с использованием технического зрения и высокоскоростных камер;

- пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях выполняет комплексную оценку состояния подвижного состава, прогнозирует ресурс грузовых вагонов и автоматизирует процессы на сортировочных станциях;

- система лазерного контроля отрицательной динамики и габарита выявляет негабарит подвижного состава и его локализацию на 3D-модели, а также опасные колебания;

- система контроля веса и вертикальных динамических нагрузок измеряет массу подвижного состава в режиме движения, определяет неравномерную загрузку вагонов и выявляет дефекты колес;

- комплекс технических измерений геометрических параметров колесных пар вагонов измеряет геометрические параметры колес, выявляет износ и дефекты;

- универсальный мобильный прибор «Доктор-100У» осуществляет технический контроль и диагностирование параметров электрического оборудования [34].

Исследования в области ИИ на железных дорогах в основном находятся на ранних стадиях. Система «Умный локомотив» и другие нейросетевые технологии являются ярким примером успешного применения ИИ в данной отрасли. Они демонстрируют потенциал ИИ для повышения безопасности, эффективности и снижения затрат. Однако для широкого внедрения ИИ в железнодорожной отрасли необходимо решать существующие вызовы, такие как высокие начальные затраты, необходимость инвестиций в разработку и внедрение ИИ-систем и обучения персонала для работы с новыми технологиями, проблемы интеграции ИИ в устаревшие системы существующей инфраструктуры и обеспечение защиты данных от киберугроз. Также необходимо развитие стандартизированной методологической базы применения ИИ [28, 29, 35]. Для минимизации рисков необходимо проводить тщательное планирование внедрения ИИ, учитывать возможные проблемы и разрабатывать меры по их устранению.

ОАО «РЖД» активно внедряет различные системы диагностики на основе нейросетей, что позволяет значительно повысить безопасность и эффективность железнодорожных перевозок. Наиболее инновационным проектом в области диагностирования оборудования ЭПС является разработка прескриптивной системы диагностирования (ПСД). Эта система представляет собой программно-аппаратный комплекс с цифровым двойником электропоезда, который использует нейронные сети для анализа данных о техническом состоянии электропоезда, поступающих в режиме реального времени. Разработка ПСД является одним из наиболее перспективных направлений в этой области, поскольку она позволяет прогнозировать отказы оборудования и принимать превентивные меры, что снижает риски аварий и сокращает эксплуатационные расходы. В дальнейшем развитие и масштабирование этой технологий позволит создать более надежную и эффективную железнодорожную систему. К ключевым особенностям ПСД относятся: раннее обнаружение дефектов на стадии их формирования, повышение достоверности и точности диагностики технического состояния оборудования, прогнозирование безаварийной работы оборудования, снижение риска отказов и unplanned остановок ЭПС, уменьшение затрат на ремонт и обслуживание. Разработка системы ПСД электропоезда ЭС2Г «Ласточка» ведется при участии АО «Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ) и других организаций. Система может отправить предупреждающий сигнал машинисту и диспетчеру при обнаружении отклонений в работе оборудования ЭПС, даже если параметры находятся в пределах нормальных значений [36]. Планируется установка системы на подвижные составы с разным уровнем автоматизации. Разработка аналогичных систем прескриптивной диагностики также ведется компаниями *Mitsubishi Rail GE Transportation* (Япония), *Siemens* (Германия), *Sung Shin Rolling Stock Technology Limited* (Южная Корея) [34].

Преимуществами прескриптивных систем диагностики являются:

– точное планирование ремонта и снижение количества простоев ЭПС, что уменьшает количество и время задержек поездов, а значит, и затраты, связанные с их неплановым простоем: исключены издержки, вызванные нарушением графика движения;

– выявление расхождения параметров и своевременное планирование ремонтных работ: эффективная и регулярная диагностика помогает обнаружить неисправность еще до ее проявления, снижая тем самым количество отказов.

Вместе с тем, эффективность прескриптивных систем диагностики зависит от качества входных данных: если входные предположения неверны, то результаты на выходе будут неточными. Кроме того, прескриптивная аналитика подходит только для краткосрочных решений, а не для долгосрочных, так как становится менее надежной, если требуется больше времени [37-40].

ОАО «РЖД» стали одной из первых компаний России, начавших процесс использования больших данных и предиктивной аналитики, что позволяет прогнозировать отказы железнодорожного ЭПС на основе анализа закономерностей, выявленных в процессе эксплуатации. Переход от планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому состоянию становится возможным благодаря развитию технологий «Интернета вещей», искусственного интеллекта и анализу больших данных. Они позволяют своевременно выявлять неисправности, минимизировать простои и снижать затраты на ремонт. Большие данные позволяют прогнозировать отказы на основе анализа закономерностей, выявленных в процессе эксплуатации. «Интернет вещей» (*IoT*) обеспечивает сбор данных в режиме реального времени от оборудования, установленного на подвижном составе и инфраструктуре. Система «Доверенная среда локомотивного комплекса», основанная на больших данных и предиктивной аналитике, обеспечивает защиту данных от неправомерного доступа, выявляет аномалии, указывающие на потенциальные неисправности, и составляет прогнозы о вероятности отказа оборудования в будущем, позволяет проводить профилактические работы до того, как проблема приведет к серьезным последствиям. Чем больше информации доступно искусственному интеллекту (ИИ), тем точнее будет прогноз. Для анализа используются как ранее внесенные данные, так и информация, собранная в режиме реального времени [41-43].

Можно привести следующие примеры использования предиктивной аналитики в железнодорожном транспорте.

1. Система «Умный локомотив» позволяет в режиме реального времени оценивать состояние машины и прогнозировать отказ узлов еще до поломки. Когда локомотив заезжает в депо, с его бортовой системы считы-

вают информацию, которую он записал в процессе пути, и загружают в программу для обработки. Алгоритмы выявляют неисправные датчики и прогнозируют вероятность отказа какого-либо узла в ближайшем будущем.

2. Программный комплекс AURORA_i выявляет дефекты колесных пар и прогнозирует их поломки. Когда локомотив заезжает в депо, технология с помощью сканеров определяет состояние тормозной колодки, а предиктивная аналитика прогнозирует вероятность поломки деталей и помогает принимать решения о необходимости их замены [44, 45].

В ОАО «РЖД» ведется разработка технических требований к перспективным локомотивам, в которых будут использоваться интеллектуальные технологии при проведении ремонта. Замена планово-предупредительного ремонта на ремонт только тех деталей, которые действительно нуждаются в нем на данный момент, на основе данных о их фактическом состоянии с использованием «Интернета вещей» и ИИ является перспективным направлением развития железнодорожной отрасли, которое позволяет повысить надежность, оптимизировать затраты и увеличить срок службы оборудования. Внедрение этих технологий требует значительных инвестиций и разработки новых алгоритмов и методик, но в долгосрочной перспективе может принести значительные экономические и эксплуатационные выгоды. Такой подход помогает сэкономить на эксплуатационных и трудовых затратах, сократить время простоя оборудования и продлить его срок службы. Например, интеллектуальный автоматизированный прогностический комплекс оборудования, оснащенный программным обеспечением с элементами искусственного интеллекта, электронной базой по всем видам отказов оборудования и собственной сенсорной системой. Специальные датчики размещаются на движущихся частях оборудования и считывают различные дефекты с помощью инновационной импульсно-волновой технологии. Благодаря этому методу диагностики, комплекс безошибочно определяет ресурс техники и прогнозирует оставшийся срок службы оборудования и позволяет перейти на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию [43, 46].

Преимуществами перехода к ремонту по фактическому состоянию являются:

– *экономия средств*: избегая ненужные ремонты и замены, можно снизить эксплуатационные затраты, поломки устраняются до того, как они приведут к дорогим простоям или повреждениям;

– *продление срока службы оборудования*: благодаря своевременному выявлению проблем можно избежать серьезных повреждений и поломок, что увеличивает срок службы оборудования;

– *минимизация простоя*: обслуживание проводится по мере необходимости, до появления критических неисправностей;

– *улучшение безопасности и надежности*: точное отслеживание состояния оборудования позволяет уменьшить вероятность аварий и сбоев;

– *сокращение потребности в запасных частях, материалах и оборудовании*: планирование сроков приобретения запасных частей происходит по мере их необходимости;

– *избавление от «внезапных» поломок механизмов* и остановок производства;

– *возможность планировать сроки и содержание* технического обслуживания и ремонта;

– *повышение общей культуры производства* и квалификации персонала [47, 48].

Внедрение сквозных цифровых технологий является новым перспективным направлением в технологии диагностирования объектов железнодорожной инфраструктуры в целом и позволяет мониторить и управлять различными аспектами железнодорожного транспорта в режиме реального времени. Это дает возможность получать актуальную информацию о состоянии путей, локомотивов, вагонов и грузов, а также обеспечивать их взаимодействие и координацию. Например, согласно одному из исследований, контроль состояния контактной сети с помощью автономных аэромобильных систем, используется для автоматического определения состояния несущего троса, струн, грузов компенсаторов, измерения толщины контактного провода и габаритных размеров зигзага контактного провода [43, 49].

Ожидается, что применение предиктивной аналитики в железнодорожной отрасли будет расширяться путем развития нейросетевых моделей:

– беспилотные авиационные системы диагностики смогут полностью автоматизировать процесс технического контроля, заменив ручной осмотр подвижного состава;

– интеграция нейросетевых технологий с блокчейн-технологиями позволит обеспечить полную прозрачность учета данных о состоянии техники и истории ремонтов;

– развитие самовосстанавливающихся технологий самодиагностики позволит автоматически устранять мелкие неисправности оборудования без вмешательства человека;

– безопасная обработка данных, основанная на последних тенденциях в области облачных вычислений.

Использование подобных систем помогает контролировать состояние контактной сети, оборудования ЭПС, оперативно устранять неисправности и повышать безопасность движения поездов [42, 43, 50, 51].

IV. Заключение

Ключевым фактором перехода к автоматизированным и интеллектуальным системам технической диагностики ЭПС является использование информационно-управляющих комплексов на базе ПЭВМ и

дистанционно управляемых цифровых измерительных приборов, что существенно ускоряет процесс автоматизации. При внедрении новых информационных технологий в системы технического диагностирования ЭПС необходимо учитывать, что программное обеспечение систем автоматизированной диагностики устаревает, и их необходимо заменять новыми. Использование инновационных технологий диагностики состояния оборудования ЭПС на железнодорожном транспорте даст возможность оценить не только реальное состояние системы в целом, учитывая всевозможные связи между событиями, но и ее ресурс, своевременно определить неисправность и существенно снизить затраты на содержание и ремонт подвижного состава, обеспечить быструю проверки исправности локомотива, выбрать рациональной системы ремонта с учетом фактического технического состояния узлов и агрегатов, повысить надежности подвижного состава в эксплуатации. Создание единой системы автоматического сбора исходных данных путем объединения интеллектуальных, технологических и технических ресурсов позволит отказаться от традиционных методов диагностирования, упростить процесс проектирования и эксплуатации диагностических систем, расширить множество диагностических признаков, повышая полноту и глубину диагностирования и прогнозирования. Развитие интеллектуальных и автоматизированных систем диагностики ЭПС является приоритетным направлением для повышения надежности, безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. Поэтому информационные технологии в системах диагностирования оборудования ЭПС будут внедряться на большом числе технически сложных и уникальных транспортных средств. Использование передовых информационных технологий позволит перейти к более эффективным системам ремонта и обслуживания подвижного состава, что приведет к снижению эксплуатационных расходов и повышению конкурентоспособности железнодорожного транспорта. Перспективы внедрения этих технологий в транспортной отрасли – ближайшее десятилетие.

© Рыжова Е.Л., 2025

Поступила в редакцию 29.07.2025

Принята к публикации 15.08.2025

Received 29.07.2025

Accepted 15.08.2025

Библиографический список

- [1] Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017. – М.: ОАО «РЖД», 2017. – 92 с.

- [2] Семенов А. П., Валинский О. С., Лубягов А. М. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 26–32.
- [3] Галкин В.Г., Парамзин В.П., Четвергов В.А. Надежность тягового подвижного состава. М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
- [4] Худонов А.М., Исмаилов Ш.К., Смирнов В.П. Надежность предельно нагруженного оборудования электровозов Восточного региона // Актуальные аспекты организации работы железнодорожного транспорта. Иркутск, 2006. – С. 36.
- [5] Буйносов А.П., Стаценко К.А. Надежность электроподвижного состава. Екатеринбург, 2016. – 34 с.
- [6] Находкин В.М., Яковлев Д.В., Черепашенцев Р.Г. Ремонт электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1989. – 295 с.
- [7] Карпов В.А. Определение ресурса деталей и узлов тягового подвижного состава по результатам инструментального и неразрушающего контроля (на примере элементов колёсной пары электровоза ВЛ80С): дис. канд. техн. наук, РУТ (МИИТ), Москва, 2020. – 131 с.
- [8] Иванов П.Ю. Повышение эксплуатационной надежности асинхронных вспомогательных машин магистральных электровозов переменного тока: дис. канд. техн. наук, ОмГУПС, Омск, 2015. – 198 с.
- [9] Байсадыков М.Ф. Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей: дис. канд. техн. наук, ОмГТУ, Омск, 2020. – 156 с.
- [10] Ступаков С. А. Филиппов В. М. Исследование влияния токовой нагрузки на износ контактных элементов токоприемника электроподвижного состава // Известия Трансба. 2011. № 1 (5). С. 37-42.
- [11] ГОСТ 34709–2021. Стационарные средства диагностики железнодорожного подвижного состава на ходу поезда. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2021.
- [12] ГОСТ 34913-2022. Системы технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
- [13] Ефанов Д. В. Особенности функционирования систем технического диагностирования и мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 3. С. 333-354.
- [14] Владимиров Д. С. Анализ мирового опыта применения систем предиктивной диагностики железнодорожного транспорта // Молодой ученый. 2025. № 23 (574). С. 71-76.
- [15] Чайковская Г.А. Интеграция средств диагностики и контроля в микропроцессорных системах ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 6. С. 8-9.
- [16] Герцензон М.А., Тумашевич А.А., Борисов А.А. Контроль состояния подвижного состава железнодорожного транспорта. М.: Юрайт, 2016. – 240 с.
- [17] Замятина Н.В., Камаев В.И. Контроль технического состояния электрифицированных железных дорог. М.: МЭИ, 2016. – 176 с.

- [18] Пышный И. М. Информационные технологии и системы диагностирования при эксплуатации и обслуживании электроподвижного состава. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. – 65 с.
- [19] Дорошук Д.В. Перспективы развития диагностики состояния токоприемников // Межд. науч.-практ. конф. «Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов», Ноябрь 16-17, 2023, Гомель, Беларусь: БелГУТ, 2023. С. 33-34.
- [20] Слатин А.И. Совершенствование методов диагностирования токоприемников электрического транспорта: автореф. дис. канд. техн. наук, ОмГУПС, Омск, 2024. – 20 с.
- [21] Костюков В.Н., Костюков Ал.В., Стариков В.А. Мониторинг состояния токоприемников МВПС с помощью системы интеллектуальных датчиков // Датчики и Системы. 2007. № 10. С. 33-38.
- [22] Лелеков В.Б., Кулев Ю.В. Система диагностики состояния токоприемников электроподвижного состава, Пат. №113498 RU, заявл. 01.09.2011; опубл. 20.02.2012.
- [23] Кулев Ю.В., Лелеков В.Б. Способ диагностики неисправности токоприёмников локомотивов и устройство для его осуществления, Пат. № 2722761 RU, заявл. 07.02.2019; опубл. 03.06.2020.
- [24] Смердин А.Н., Голубков А.С., Найден С.Н. Автоматизированная система диагностики состояния токоприемников электроподвижного состава на основе видеоизмерительного комплекса // Известия Транссиба. 2012. № 2(10). С. 103-109.
- [25] Костюков В.Н., Костюков А.В., Стариков В.А. Система диагностики токоприемников, Пат. № 2315275 RU, заявл. 26.06.2006, опубл. 20.01.2008.
- [26] Язынин В.С., Барановский А.М., Забродин А.В. Модель системы дистанционного контроля состояния электроподвижного состава с применением искусственных нейронных сетей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 1 (33). С. 27-37. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37.
- [27] Сидоров А.В., Михеев С.В., Осьмушин А.А. Диагностика состояния транспортной инфраструктуры с использованием нейронных сетей // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 215.
- [28] Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2(57). С. 33-41. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33
- [29] Скворцова И.В., Чаюк С.В., Багаева И.В., Нурулин М.Ю. Интеграция искусственного интеллекта в железнодорожный транспорт: вызовы, возможности и перспективы развития // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2025. № 3-1. С. 156-160. DOI 10.17513/vaael.4040
- [30] Бочегов М.А., Медникова О.В. Искусственный интеллект на железной дороге // Проблемы науки. 2024. № 4(85). С. 7-12.
- [31] Лакин И.К, Павлов В.В., Мельников В.А. «Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2018. №1. С. 53–56.

- [32] Как искусственный интеллект захватил железную дорогу // РЖД Цифровой. [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZYUnZTnG4kyL3Tk8> (дата обращения: 29.07.2025).
- [33] Алексей Нащекин: «Дорогам нужен интеллект». [Электронный ресурс]. URL: https://www.vedomosti.ru/technologies/industries_and_markets/characters/2023/12/24/1012718-dorogam-nuzhen-intellekt (дата обращения: 29.07.2025).
- [34] Универсальный мобильный прибор технического контроля и диагностирования параметров электрического оборудования с прогнозированием остаточного ресурса (Доктор-100У) // [Электронный ресурс]. URL: <https://zterail.ru/generate-pdf/37> (дата обращения: 29.07.2025).
- [35] Sarp S., Kuzlu M., Jovanovic V., Polat Z., Guler O. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains // European Transport Research Review. 2024. Vol. 16. 58. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5
- [36] Ададунов А.С., Федорова В.И., Бойко А.М. Общие принципы построения предиктивной системы диагностики нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и первые экспериментальные данные // Национальная Ассоциация Ученых. 2022. № 75-2. С. 14-22.
- [37] Прогноз отличный: как предсказать необходимость ремонта поездов. [Электронный ресурс]. URL: <https://rzddigital.ru/projects/prognoz-otlichnyy-kak-predskazat-neobkhodimost-remonta-poezdov/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [38] В России разрабатывают систему диагностики для оценки состояния электропоездов. [Электронный ресурс]. URL: <https://www1.ru/news/2024/05/29/v-rossii-razrabatyvaiut-sistemu-diagnostiki-dlia-ocenki-sostoiانيا-eletropoezdov.html> (дата обращения: 29.07.2025).
- [39] ВНИИЖТ разработал систему диагностики для беспилотных «Ласточек». [Электронный ресурс]. URL: https://gudok.ru/content/science_education/1616519/ (дата обращения: 29.07.2025).
- [40] Прескриптивная аналитика: определение, принцип работы и примеры. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.investopedia.com/terms/p/prescriptive-analytics.asp> (дата обращения: 29.07.2025).
- [41] Как цифровизация меняет железные дороги в России и мире. [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/6842d77e9a79477d0ae68392?from=copy> (дата обращения: 29.07.2025).
- [42] Как искусственный интеллект меняет техническое обслуживание ЖД транспорта? [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyat-tekhnicheskoe-obsluživanie-zhd-transporta> (дата обращения: 29.07.2025).
- [43] Фроленков С.А. Совершенствование диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог на основе сквозных цифровых технологий: дис. канд. техн. наук, СамГУПС, Самара, 2023. – 181 с.
- [44] 10 новых технологий и инноваций в железнодорожной отрасли в 2025 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://innovanews.ru/info/innovations/10-novykh-tekhnologij-i-innovatsij-v-zheleznodorozhnoj-otrasli-v-2025-godu/> (дата обращения: 29.07.2025).

- [45] Прескриптивная аналитика. [Электронный ресурс]. URL: <https://rzdigital.ru/technology/prediktivnaya-analitika/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [46] Ростех разработал «умный» комплекс для предиктивной диагностики оборудования. [Электронный ресурс]. URL: <https://rostec.ru/media/pressrelease/rostekh-razrabotal-umnyu-kompleks-dlya-prediktivnoy-diagnostiki-oborudovaniya/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [47] Что такое обслуживание по фактическому техническому состоянию? [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.vibray.ru/post/14/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [48] Система технического обслуживания и ремонта оборудования по фактическому состоянию. [Электронный ресурс]. URL: <https://rempromob.ru/obslyuzhivanie-pofakticheskomu-sostojaniju-ofs/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [49] Внедрение технологий цифровой железной дороги – как новые инновации изменят транспортную отрасль. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusbiletnapoezd.ru/tickets/articles/vnedrenie-texnologii-cifrovoi-zeleznoi-dorogi/> (дата обращения: 29.07.2025).
- [50] Озеров А.В., Куроптева А.П. Современные системы технической диагностики и мониторинга на железнодорожном транспорте // Наука и технологии железных дорог. 2024. Т. 8. № 1(29). С. 3-13.
- [51] Стадниченко С.Ю. Интеллектуальные компоненты для системы автоматизированного мониторинга и диагностики на железнодорожном транспорте // Молодой ученый. 2012. № 11 (46). С. 98-102.

References

- [1] The concept of implementation of the complex scientific and technical project “Digital Railway” No. 1285r. Approved by the order of JSC Russian Railways dated 05.12.2017. Moscow: JSC Russian Railways, 2017.
- [2] A.P. Semenov, O.S. Valinsky and A.M. Lubyagov, “Cifrovoe depo – tekhnologicheskaya osnova cifrovoj transformacii lokomotivnogo kompleksa [Digital depot – the technological basis of the digital transformation of the locomotive complex]”, *Zheleznodorozhnyj transport [Railway transport]*, no. 3, pp. 26-32, 2020 (in Russian).
- [3] V.G. Galkin, V.P. Paramzin and V.A. Chetvergov, *Nadyozhnost' tyagovogo podvizhnogo sostava [Reliability of traction rolling stock]*. Moscow: Transport, 1981 (in Russian).
- [4] A.M. Khudonogov, Sh.K. Ismailov, and V.P. Smirnov, “Nadyozhnost' predel'no nagruzhennogo oborudovaniya elektrovozov Vostochnogo regiona [Reliability of the maximum-load equipment of electric locomotives in the Eastern region]”, *Aktual'nye aspekty organizacii raboty zheleznodorozhnogo transporta [Actual Aspects of Railway Transport Organization: Collection of Scientific Articles]*, pp. 36-40, 2006 (in Russian).
- [5] A.P. Buinosov and K.A. Statsenko, *Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of Electric Rolling Stock]*. Yekaterinburg: USURT, 2016 (in Russian).
- [6] V.M. Nakhodkin, D.V. Yakovlev and R.G. Cherepashenets, *Remont elektropodvizhnogo sostava [Repair of Electric Rolling Stock]*. Moscow: Transport, 1989 (in Russian).

- [7] V.A. Karpov, “*Opređenje resursa detalj i uzlov tyagovogo podvizhnogo sostava po rezul'tatam instrumental'nogo i nerazrushayushchego kontrolya (na primere elementov kolyosnoj pary elektrovoza VL80S) [Determination of the Resource of Parts and Units of Traction Rolling Stock Based on the Results of Instrumental and Non-Destructive Testing (Using the Example of the Wheelset Elements of the VL80S Electric Locomotive)]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, 2020 (in Russian).
- [8] P.Yu. Ivanov, “*Povyshenie ekspluatacionnoj nadezhnosti asinhronnyh vspomogatel'nyh mashin magistral'nyh elektrovozov peremennogo toka [Increase of operational reliability of asynchronous auxiliary machines of mainline AC electric locomotives]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, 2015 (in Russian).
- [9] M.F. Baisadykov, “*Razrabotka metoda ocenki intensivnosti iznashivaniya i algoritma prognozirovaniya ostatochnogo resursa shchetok tyagovyh elektrodvigatelej [Development of a method for estimating the intensity of wear and an algorithm for predicting the residual life of brushes of traction electric motors]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 2020 (in Russian).
- [10] S.A. Stupakov and V.M. Filippov, “Research of influence of current load on deterioration of contact elements of the current collector of the electrorolling stock”, *Journal of Transsib Railway Studies*, no. 1 (5), pp. 37-42, 2011.
- [11] Stationary Means of Diagnostics of Railway Rolling Stock on the Move of a Train. General Technical Requirements, GOST 34709-2021, 2021.
- [12] Systems of technical diagnostics and monitoring of railway automation and telemechanics of high-speed railway lines. General technical requirements, GOST 34913-2022, 2023.
- [13] D.V. Efanov, “Features of the functioning of technical diagnosis and monitoring systems of railway infrastructure objects”, *Automation in Transport*, vol. 4, no. 3, pp. 333-354, 2018.
- [14] D.S. Vladimirov, “Analiz mirovogo opyta primeneniya sistem prediktivnoj diagnostiki zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of the global experience in applying predictive diagnostics systems for railway transport young scientist]”, *Molodoj uchenyj [Young scientist]*, no. 23 (574), pp. 71-76, 2025 (in Russian).
- [15] G.A. Tchaikovskaya, “Integraciya sredstv diagnostiki i kontrolya v mikroprocesornyyh sistemah ZhAT [Integration of Diagnostics and Control Tools in Microprocessor-Based Automotive Systems]”, *Automation, communications, informatics*, no. 6, pp. 8-9, 2012 (in Russian).
- [16] M.A. Gertsenzon, A.A. Tumashevich, A.A. Borisov, *Kontrol' sostoyaniya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Control of the state of rolling stock of railway transport]*. Moscow: Yurayt, 2016 (in Russian).
- [17] N.V. Zamyatina and V.I. Kamaev, *Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya elektrificirovannyh zheleznnyh dorog [Control of the technical condition of electrified railways]*. Moscow: MPEI, 2016 (in Russian).
- [18] I.M. Pyshny, *Informacionnye tekhnologii i sistemy diagnostirovaniya pri ekspluatatsii i obsluzhivanii elektropodvizhnogo sostava [Information technologies and diagnostic systems for the operation and maintenance of electric rolling stock]*. Yekaterinburg: USURT, 2016 (in Russian).

- [19] D. V. Doroshchuk, “Perspektivy razvitiya diagnostiki sostoyaniya tokopriemnikov [Prospects for the development of current collector condition diagnostics]”, in proc. *Innovacionnoe razvitie transportnogo i stroitel'nogo kompleksov [Innovative Development of the Transport and Construction Complexes]*, Nov. 16-17, 2023, Gomel, Belarus, pp. 33-34 (in Russian).
- [20] A.I. Slatin, “Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya tokopriemnikov elektricheskogo transporta [Improvement of methods for diagnosing electric transport current collectors]”, Cand. of Tech. S. thesis, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, 2024 (in Russian).
- [21] V.N. Kostyukov, A.V. Kostyukov and V.A. Starikov “Monitoring the condition of current collectors of the MBPS using the system of intelligent sensors”, *Sensors and Systems*, no. 10, pp. 33-38, 2007.
- [22] V.B. Lelekov, Yu.V. Kulev, “Sistema diagnostiki sostoyaniya tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava [Diagnostic system for the condition of electric rolling stock pantographs]”, Patent RU 113498 U1, Sept. 01, 2011 (in Russian).
- [23] Yu.V. Kulev, V. B. Lelekov, “Method of diagnosing faults of locomotive current collectors and device for implementation thereof”, Patent RU 2722761 C1, Feb. 07, 2019.
- [24] A.N. Smerdin, A.S. Golubkov and S.N. Nayden, “Automated system for diagnosis of state pantograph based on computer vision complex”, *Journal of Transsib Railway Studies*, no. 2(10), pp. 103-109, 2012.
- [25] V.N. Kostyukov, A.V. Kostyukov and V.A. Starikov, “System of diagnostics of current collectors”, Patent RU 2315275 C1, Jun. 26, 2006.
- [26] V.S. Yazynin, A.M. Baranovsky and A.V. Zabrodin, “The model of remote monitoring system for electric rolling stock condition using artificial neural networks”, *Intellectual Technologies on Transport*, no. 1 (33), pp. 27-37, 2023. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37
- [27] A.V. Sidorov, S.V. Mikheev and A.A. Osmushin, “Diagnostics of the transport infrastructure condition using neural networks”, *Modern Problems of Science and Education*, no. 6, pp. 215, 2013.
- [28] D.A. Sivitsky, “Experience analysis and using prospects of artificial neural networks on railway transport”, *The Siberian Transport University Bulletin*, no. 2(57), pp. 33-41, 2021. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33
- [29] I.V. Skvortsova, S.V. Chayuk, I.V. Bagaeva and M.Yu. Nurulin, “Integration of artificial intelligence into railway transport: Challenges, opportunities, and development prospects”, *Vestnik Altajskoj Akademii Ekonomiki i Prava [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]*, no. 3-1, pp. 156-160, 2025. DOI 10.17513/vaeel.4040 (in Russian).
- [30] M.A. Bochegov and O.V. Mednikova, “Iskusstvennyj intellekt na zheleznoj doroge [Artificial intelligence on the railway]”, *Problemy nauki [Problems of Science]*, no. 4(85), pp. 7-12, 2024 (in Russian).
- [31] I.K. Lakin, V.V. Pavlov and V.A. Melnikov, “«Umnij lokomotiv»: diagnostirovanie tyagovyh elektrodvigatelej teplovozov s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya [«Smart locomotive»: diagnostics of traction electric motors of diesel locomotives using machine learning methods]”, *Transport Rossijskoj Federacii*, no. 1, pp. 53-56, 2018 (in Russian).

- [32] Kak iskusstvennyj intellekt zahvatil zheleznuyu dorogu [How artificial intelligence has taken over the railroad]. [Online]. Available at: <https://dzen.ru/a/ZYUnZTnG4kyL3Tk8> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [33] Aleksej Nashchekin: «Dorogam nuzhen intellekt» [Alexey Nashchekin: “Roads need intelligence”]. [Online]. Available at: https://www.vedomosti.ru/technologies/industries_and_markets/characters/2023/12/24/1012718-dorogam-nuzhen-intellekt (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [34] Universal'nyj mobil'nyj pribor tekhnicheskogo kontrolya i diagnostirovaniya parametrov elektricheskogo oborudovaniya s prognozirovaniem ostatochnogo re-sursa (Doktor-100U) [Universal mobile device for technical control and diagnostics of electrical equipment parameters with residual resource forecasting (Doctor-100U)]. [Online]. Available at: <https://zterail.ru/generate-pdf/37> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [35] S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanović, Z. Polat and O. Guler, “Digitalization of railway transport using AI-based services: digital twin trains”, *European Transport Research Review*, vol. 16, 58, 2024. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5
- [36] A.S. Adadurov, V.I. Fedorova and A.M. Boyko, “General principles of building a predictive diagnostic system for the new electric train ES2G “Lastochka” and the first experimental data”, *National Association of Scientists*, no. 75-2, pp. 14-22, 2022.
- [37] Prognoz otlichnyj: kak predskazat' neobkhodimost' remonta poezdov [The forecast is excellent: how to predict the need for train repairs]. [Online]. Available at: <https://rzdigital.ru/projects/prognoz-otlichnyy-kak-predskazat-neobkhodimost-remonta-poezdov/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [38] V Rossii razrabatyvayut sistemu diagnostiki dlya ocenki sostoyaniya elektropoezdov [Russia is developing a diagnostic system for assessing the condition of electric trains]. [Online]. Available at: <https://www1.ru/news/2024/05/29/v-rossii-razrabatyvaiut-sistemu-diagnostiki-dlia-ocenki-sostoianiiia-eletropoezdov.html> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [39] VNIIZHT razrabotal sistemu diagnostiki dlya bespilotnyh «Lastochek» [Railway Research Institute of JSC Russian Railways has developed a diagnostic system for unmanned Lastochki]. [Online]. Available at: https://gudok.ru/content/science_education/1616519/ (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [40] Preskriptivnaya analitika: opredelenie, princip raboty i primery [Prescriptive Analytics: Definition, Working Principle, and Examples]. [Online]. Available at: <https://www.investopedia.com/terms/p/prescriptive-analytics.asp> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [41] Kak cifrovizaciya menyaet zheleznnye dorogi v Rossii i mire [How digitalization is changing railways in Russia and around the world]. [Online]. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/6842d77e9a79477d0ae68392?from=copy> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [42] Kak iskusstvennyj intellekt menyaet tekhnicheskoe obsluzhivanie ZHD transporta? [How is artificial intelligence changing the maintenance of railway transport?]. [Online]. Available at: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyaet-tekhnicheskoe-obsluzhivanie-zhd-transporta> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).

- [43] S.A. Frolenkov, “*Sovershenstvovanie diagnostiki kontaktnoj seti elektrificirovannykh zhelezných dorog na osnove skvoznykh cifrových tekhnologij [Improvement of Diagnostics of the Contact Network of Electrified Railways Based on End-to-End Digital Technologies]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia, 2024 (in Russian).
- [44] 10 novykh tekhnologij i innovacij v zheleznodorozhnoj otrasli v 2025 godu [10 New Technologies and Innovations in the Railway Industry in 2025]. [Online]. Available at: <https://innovanews.ru/info/innovations/10-novykh-tekhnologij-i-innovatsij-v-zheleznodorozhnoj-otrasli-v-2025-godu/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [45] Preskriptivnaya analitika [Prescriptive analytics]. [Online]. Available at: <https://rzddigital.ru/technology/prediktivnaya-analitika/> (Accessed on 29.07.2025) (in Russian).
- [46] Rostekh razrabotal «umnyj» kompleks dlya prediktivnoj diagnostiki oborudovaniya [Rostec has developed a smart complex for predictive diagnostics of equipment]. [Online]. Available at: <https://rostec.ru/media/pressrelease/rostekh-razrabotal-umnyy-kompleks-dlya-prediktivnoj-diagnostiki-oborudovaniya/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [47] Chto takoe obsluzhivanie po fakticheskomu tekhnicheskomu sostoyaniyu [What is actual technical condition maintenance?] [Online]. Available at: <https://blog.vibray.ru/post/14/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [48] Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya po fakticheskomu sostoyaniyu [The system of maintenance and repair of equipment based on its actual condition]. [Online]. Available at: <https://rempromob.ru/obsluzhivanie-po-fakticheskomu-sostojaniyu-ofs/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [49] Vnedrenie tekhnologij cifrovoy zheleznoj dorogi – kak novye innovacii izmenyat transportnyy otrasl' [The introduction of digital railway technologies – how new innovations will change the transportation industry]. [Online]. Available at: <https://rus-biletnapoezd.ru/tickets/articles/vnedrenie-tekhnologii-cifrovoy-zeleznoj-dorogi/> (Accessed: July 29, 2025) (in Russian).
- [50] A.V. Ozerov and A.P. Kuropteva, “Advanced diagnostic and monitoring systems for railways”, *Nauka i tekhnologii zhelezných dorog [Railway Science and Technology]*, vol. 8, no. 1(29), pp. 3-13, 2024 (in Russian).
- [51] S.Yu. Stadnichenko, “Intelligent components for the system of automated monitoring and diagnostics in railway transport”, *Molodoj uchenyj [Young scientist]*, no. 11 (46), pp. 98-102, 2012 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Рыжова Елена Львовна, кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Elena L. Ryzhova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation.