

УДК 629.4.027

К. А. ЕМЕЛЬЯНОВА, магистр, Р. И. ЧЕРНИН, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Приведены тенденции использования предиктивной диагностики сложных технических объектов и систем в различных отраслях промышленности и преимущества её использования, отмечены основные проблемы при использовании, а также сделан вывод о целесообразности разработки методов предиктивной диагностики для железнодорожного подвижного состава и его элементов с целью снижения затрат и повышения безопасности движения поездов.

Предиктивный анализ как таковой нашёл широкое применение в различных областях человеческой деятельности: в бизнес-технологиях, строительстве и технике.

Для уменьшения влияния реактивного типа принятия решений (немедленная реакция на уже возникшую проблему, а не действия, направленные на её предотвращение) в сфере технического обслуживания и ремонта подвижного состава важно переходить к проактивному типу, так как это позволяет предотвратить неисправность или отодвинуть её на неопределённое время. Реализация этого перехода возможна путём использования предиктивной диагностики подвижного состава и его элементов, основанной на анализе данных из прошлого и настоящего для выявления закономерностей, позволяющих прогнозировать следующие события или состояние объекта контроля (рисунок 1).

Для обоснования актуальности внедрения предиктивной диагностики в сфере эксплуатации подвижного состава проведён анализ исследования работ различных авторов.



Рисунок 1 – Место предиктивной диагностики в жизненном цикле оборудования (P-F кривая) [3, с. 56, рисунок 1]

В рамках данного анализа рассмотрены ключевые аспекты воздействия предиктивных методов на эффективность эксплуатации оборудования и подвижного состава, а также потенциальные экономические и безопасностные преимущества. Ниже представлена таблица 1 с систематизированной информацией, отражающей основные выводы и задачи, связанные с внедрением предиктивной диагностики в соответствующих сферах.

Таблица 1 – Результаты анализа использования предиктивной диагностики в различных отраслях

Тема исследования	Описание	Вывод
Использование предиктивной диагностики в судоремонтном производстве	Предиктивная диагностика применяется для технологического оборудования с целью снижения риска аварий и простоев, оптимизации обслуживания и ремонта, повышения надёжности и долговечности оборудования, снижения операционных расходов и улучшения планирования производства [1]	Внедрение предиктивной диагностики в судоремонтном производстве способствует повышению эффективности, безопасности и экономичности эксплуатации оборудования
Применение предиктивной аналитики в строительстве	В строительной отрасли прогностическая аналитика используется для составления более точных бюджетов, учитывающих возможные риски и факторы, а также для прогнозирования потребностей в материальных ресурсах и финансовых потоках на основе исторических данных [2]	Прогностическая аналитика помогает улучшить планирование, снизить неопределённость и повысить эффективность управленческих решений
Предиктивная диагностика высоковольтных электродвигателей	В публикации [3] представлена функциональная схема жизненного цикла оборудования (см. рисунок 1), в которой выделено место предиктивной диагностики. Проведен анализ статистических данных по дефектам высоковольтных электродвигателей, сформирован набор параметров для диагностической модели, применены методы машинного обучения для раннего обнаружения отклонений. Полученные результаты являются подготовительной стадией для дальнейшего развития системы предиктивной диагностики	Создана база и методы для внедрения системы предиктивной диагностики электродвигателей, которая позволит своевременно выявлять дефекты и повысит надёжность оборудования
Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля состояния локомотивов	В [4] созданы нейросетевые эталонные диагностические модели, подтвержденные устойчивой сходимостью результатов моделирования и реальных данных подсистем диагностики тепловозов модели 2ТЭ116У. Кроме того, предложены методы интеллектуальной обработки информации – обнаружение буксования колесных пар и автоматическая настройка характеристик системы автоматического регулирования тягового генератора	Разработанные модели и методы позволяют повысить надёжность и автоматизированность диагностики тепловозного оборудования, что способствует повышению его эффективности и безопасности

Продолжение таблицы 1

Тема исследования	Описание	Вывод
Разработка и тестирование диагностических и прогнозных моделей для тепловозов. Экономическая эффективность системы предиктивного контроля	В [5] разработаны, обучены и протестированы диагностические модели системы смазки, характеризующие текущее состояние, на реальных данных (2014 – 2019 гг.). Построены и протестированы прогнозные модели на базе однослойных нейронных сетей с точностью не менее 96 % на 30 суток. Оценка показывает, что внедрение системы на парк из 273 секций моделей 2ТЭ116У и ТЭП70БС позволит сэкономить более 35 млн рублей в год, при окупаемости примерно 2 года	Созданы эффективные системы диагностики и прогнозирования для тепловозов, что позволяет обеспечивать их надежную эксплуатацию и плановое техническое обслуживание. Внедрение системы предиктивного контроля выгодно и позволяет быстро окупить затраты, повышая эффективность эксплуатации тепловозов
Повышение эффективности эксплуатации газодинамического оборудования с помощью предиктивной аналитики для снижения числа отказов [6]	Теоретические основы и практический опыт применения системы предиктивной аналитики. Повышение эффективности эксплуатации	Высокая эффективность аналитики снижает отказы, уменьшает затраты на ремонт. Совмещение классических моделей и машинного обучения позволяет точнее выявлять проблемы и вовремя реагировать
Последние достижения и тенденции в системах предиктивного производства в условиях большого объема данных [7]	Ключевые компоненты системы предиктивной аналитики включают следующие этапы: сбор и хранение данных для формирования баз данных; предобработку данных (очистка, удаление шумов, выбросов, нормализация и синхронизация временных рядов); анализ и извлечение ключевых признаков; построение прогностических моделей с помощью алгоритмов регрессии, нейронных сетей, деревьев решений и др.; оценку и валидацию моделей; интеграцию системы в существующую инфраструктуру мониторинга	Эти компоненты образуют полную цепочку для реализации эффективной системы предиктивной аналитики, которая может обеспечить точное предсказание и автоматизацию управленческих решений. Успех системы зависит от правильного выполнения каждого этапа
Ограничения использования системы предиктивной аналитики	Требуется высокий уровень качества исходных данных, поскольку эффективность моделей существенно зависит от точности, полноты и своевременности данных. Интеграция системы в существующую инфраструктуру сложна и требует значительных усилий, особенно при несовместимости технологий. Высокая вычислительная нагрузка возникает из-за необходимости обработки больших объемов данных в режиме реального времени, что требует современных мощных вычислительных ресурсов. Некоторые модели, особенно глубокого обучения, являются «черными ящиками», что затрудняет их интерпретацию и усложняет принятие управленческих решений на их основе	Эти ограничения подчеркивают необходимость инвестировать в качество и подготовку данных, развивать инфраструктуру и учитывать особенности моделей, чтобы успешно внедрять системы предиктивной аналитики. Они также свидетельствуют о существующих вызовах, связанных с вычислительной мощностью и интерпретируемостью результатов
Методы предиктивного анализа для сложных технических систем [8]	Основные подходящие методы включают: 1. Регрессионные методы: линейная, логистическая, множественная логистическая регрессия, пробит-регрессия, анализ временных рядов, классификационные и регрессионные деревья, многомерные адаптивные регрессионные сплайны. 2. Методы машинного обучения: искусственные нейронные сети, многослойный перцептрон, радиальные базисные функции, метод опорных векторов, наивный байесовский классификатор, метод ближайших соседей, геопространственное предсказательное моделирование, генетический алгоритм	Предложенные методы обеспечивают широкий инструментарий для анализа и прогноза в сфере технических систем, позволяя учитывать различную природу данных и сложности моделей. Выбор конкретного метода зависит от задачи, структуры данных и цели анализа
Задача предиктивного анализа в техническом обслуживании оборудования	Применение предиктивных алгоритмов и методов машинного обучения позволяет осуществлять непрерывный анализ больших объемов данных о текущем состоянии оборудования, выявлять ранние признаки возможных отказов и прогнозировать их возникновение, что способствует своевременному техническому обслуживанию и ремонту	Использование прогнозной аналитики улучшает надежность и эффективность эксплуатации оборудования, способствует снижению затрат за счет предупреждения аварий и оптимизации планов технического обслуживания
Основные проблемы использования предиктивной диагностики и аналитики	1 Проблема унификации прогностической модели – данные, полученные для одного элемента оборудования, не могут применяться к аналогичным устройствам. 2 Проблема экспертной оценки – трудность найти специалиста с достаточным опытом в узкой области. 3 Проблема сбора и интерпретации данных – качество обучения нейросетей зависит от глубины архива и периодичности данных. 4 Проблема ранжирования по критичности – необходимо учитывать важность различных прогнозов, чтобы приоритеты были ясны. Также выделяется проблема «ошибки выжившего», когда модель учится только на неисправностях, уже имевших место, что ограничивает возможность выявлять все виды неисправностей, поэтому предлагается обучение на нормальных состояниях	Несмотря на существующие сложности, предиктивная диагностика достигла высокого уровня эффективности и продолжает развиваться за счет расширения базы знаний, повышения качества данных и улучшения сенсорных технологий

Тема исследования	Описание	Вывод
Перспективы разработки методов для подвижного состава и его элементов	Безопасность и надежность подвижного состава могут быть обеспечены за счет прогнозирования потенциальных проблем на ранних стадиях, что поможет предотвратить аварии и снизить расходы. Также важно оптимизировать техническое обслуживание и своевременно устранять дефекты для продления срока службы элементов, что уменьшит затраты на ремонт	Разработка таких методов способна значительно повысить безопасность, эффективность и экономичность эксплуатации подвижного состава
Перспективы разработки методов для подвижного состава и его элементов	Безопасность и надежность подвижного состава могут быть обеспечены за счет прогнозирования потенциальных проблем на ранних стадиях, что поможет предотвратить аварии и снизить расходы. Также важно оптимизировать техническое обслуживание и своевременно устранять дефекты для продления срока службы элементов, что уменьшит затраты на замену и ремонт	Разработка таких методов способна значительно повысить безопасность, эффективность и экономичность эксплуатации подвижного состава
Анализ отцепок грузовых вагонов в РФ и необходимость предиктивной диагностики	В I квартале 2024 года суммарно отцеплено 334 тысячи грузовых вагонов в текущий ремонт (ТР-1 и ТР-2). Анализ показал, что основные неисправности распределены по узлам так: колесная пара (65,6 %), тележка (16,9 %), автосцепное устройство (12,5 %), автотормозное оборудование (3,3 %), кузов (1,4 %) и прочие (0,3 %). Более 80 % от общего числа отцепок приходится на ходовые части грузовых вагонов, что делает разработку методики предиктивной диагностики этих компонентов важной научно-технической задачей. Ее решение позволит снизить эксплуатационные расходы и повысить безопасность движения [10]	Основная часть неисправностей грузовых вагонов связана с ходовыми частями, что обосновывает необходимость внедрения предиктивных методов для их диагностики с целью повышения надежности и эффективности эксплуатации
Актуальность внедрения предиктивной диагностики подвижного состава	В работе [11] подчеркивается, что переход от обслуживания на основе среднестатистических данных (например, наработка на отказ и вероятность безотказной работы в гарантийный период) к обслуживанию по фактическому техническому состоянию является эффективным способом снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт	Внедрение предиктивной диагностики позволяет оптимизировать сроки и объемы технического обслуживания, что ведет к существенной экономии расходов и повышению надежности подвижного состава

Список литературы

1 **Неснова, М. В.** Внедрение предиктивной диагностики технологического оборудования на судостроительном производстве / М. В. Неснова // Журнал прикладных исследований. Сетевой научно-практический журнал. – 2023. – № 12. – С. 53–58. – DOI: 10.47576/2949-1878-2023-12-53/.

2 **Камаева, Ю. В.** Перспективы использования предиктивной аналитики в строительстве / Ю. В. Камаева, Л. А. Адамцевич // Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 11, № 2 (39). – С. 91–99. – DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-12-12.

3 **Кирьянов, Н. А.** Предиктивная диагностика высоковольтных электродвигателей / Н. А. Кирьянов, А. Н. Комков // Интеллектуальная электротехника. – 2024. – № 2. – С. 53–68. – EDN: UNPLGC.

4 **Грачёв, В. В.** Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / В. В. Грачёв ; ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – СПб., 2019. – 34 с.

5 **Федотов, М. В.** Предиктивная диагностика оборудования тепловоза на основе интеллектуального анализа данных : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / М. В. Федотов ; ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – СПб., 2021. – 18 с.

6 **Москвитин, В. В.** Повышение эффективности эксплуатации газодинамического оборудования посредством ис-

пользования системы предиктивной аналитики для снижения числа отказов оборудования / В. В. Москвитин // Вестник АГТИ. – 2025. – № 1. Ч. 1. – С. 51–73.

7 Последние достижения и тенденции в системах предиктивного производства в условиях большого объема данных / J. Lee, E. Lapira, V. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2013. – № 1 (1). – P. 38–41. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2013.03.002.

8 **Ильичев, В. Ю.** Использование методов предиктивной аналитики для обработки сигналов с датчиков частоты вращения роторных машин / В. Ю. Ильичев, Е. А. Юрик // Научное обозрение. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 22–26. – URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1226> (дата обращения: 25.09.2025).

9 **Брюхова, А. А.** Проблемы предиктивной диагностики и аналитики / А. А. Брюхова, Т. Н. Костюнина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 335–338.

10 **Агафонов, М. С.** Отцепки грузовых вагонов в неплановый ремонт в первом полугодии 2024 г. / М. С. Агафонов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2024. – № 2 (79). – С. 11–13.

11 **Адауров, А. С.** Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и предиктивной диагностики стационарными средствами диагностики подвижного состава на ходу поезда / А. С. Адауров, А. С. Семенова // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт : сб. материалов II Междунар. конф., Москва, 24–25 авг. 2023 г. – М. : Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2023. – С. 13–17. – EDN ZHARYR // НЭБ eLIBRARY.

Получено 10.11.2025

K. A. Yemialyanava, R. I. Chernin. Application of predictive diagnostics of railway rolling and its elements.

The article presents trends in the use of predictive diagnostics of complex technical facilities and systems in various industries and the advantages of its use, highlights the main problems with its use, and concludes that it is advisable to develop predictive diagnostic methods for railway rolling stock and its elements in order to reduce costs and improve train safety.