

УДК: 629.4.077

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА – ОТ ОДИНОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДО РОБОТИЗИРОВАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Долгий Александр Игоревич, к.т.н., Генеральный директор, АО «НИИАС», Москва, Россия,
E-mail: a.dolgiy@vniias.ru

Кудюкин Владимир Валерьевич, Заместитель Генерального директора, АО «НИИАС», Москва, Россия,
E-mail: v.kudukin@vniias.ru

Хатламаджиян Акоп Ервандович, к.т.н., Заместитель Генерального директора, АО «НИИАС», Москва,
Россия, E-mail: a.hatlamadzhyan@vniias.ru

Шаповалов Василий Витальевич, к.т.н., Начальник Научно-технического комплекса программно-аппаратных
комплексов диагностики инфраструктуры АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: v.shapovalov@vniias.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлен комплексный анализ эволюции, современного состояния и перспектив развития систем контроля и диагностики железнодорожного подвижного состава. Проведен детальный обзор мировых тенденций, включая поэтапный переход от локальных датчиков к интегрированным интеллектуальным и роботизированным комплексам, основанным на технологиях машинного зрения, лазерного сканирования, предиктивной аналитики и искусственного интеллекта. Особое внимание удалено отечественным разработкам, в частности, Интегрированному посту автоматизированного приема и диагностики подвижного состава (ППСС) и его развитию. Описаны принципы гибридной модели обработки данных, архитектура и функциональные возможности ППСС, а также его модульное расширение, включая системы ПАК-М и «Элемент». Рассмотрены подходы к интеграции диагностических систем в информационно-управляющие комплексы станций, реализации предиктивного обслуживания и созданию роботизированных диагностических кластеров. Статья адресована специалистам в области железнодорожного транспорта, диагностики, автоматизации и информационных технологий.

Ключевые слова: диагностика подвижного состава, интегрированный диагностический комплекс, ППСС, предиктивная аналитика, искусственный интеллект, машинное зрение, роботизация, техническое обслуживание по состоянию, железнодорожный транспорт, АО «НИИАС».

MONITORING AND DIAGNOSTICS OF ROLLING STOCK – FROM SINGLE DEVICES TO ROBOTIC DIAGNOSTIC COMPLEXES

Alexander I. Dolgiy, Candidate of Technical Sciences, General Director, JSC NIIAS, Moscow, Russia,
E-mail: a.dolgiy@vniias.ru

Vladimir V. Kudyukin, Deputy General Director, JSC NIIAS, Moscow, Russia, E-mail: v.kudukin@vniias.ru
Agop Y. Khatlamadzhyan, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director, JSC NIIAS, Moscow, Russia,
E-mail: a.hatlamadzhyan@vniias.ru

Vasily V. Shapovalov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific and Technical Complex of Software and
Hardware Complexes for Infrastructure Diagnostics of JSC NIIAS, Moscow, Russia, E-mail: v.shapovalov@vniias.ru

ANNOTATION

The article presents a comprehensive analysis of the evolution, current state and prospects for the development of control and diagnostic systems for railway rolling stock. A detailed review of global trends has been conducted, including a step-by-step transition from local sensors to integrated intelligent and robotic complexes based on machine vision, laser scanning, predictive analytics and artificial intelligence technologies. Special attention is paid to domestic developments, in particular, the Integrated Post for Automated Reception and Diagnostics of Rolling Stock and its development. The principles of the hybrid data processing model, the architecture and functionality of the PPSS, as well as its modular expansion, including the PAK-M and Element systems, are described. Approaches to the integration of diagnostic systems into information and control complexes of stations, the implementation of predictive maintenance and the creation

of robotic diagnostic clusters are considered. The article is addressed to specialists in the field of railway transport, diagnostics, automation and information technology.

Keywords: diagnostics of rolling stock, integrated diagnostic system, PPSS, predictive analytics, artificial intelligence, machine vision, robotics, condition maintenance, railway transport, JSC NIIAS.

Введение

Необходимость развития средств диагностики подвижного состава определяется ростом требований к качеству перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, научно-техническим прогрессом и является одним из ключевых обеспечивающих элементов реализации концептуального подхода к созданию современной платформы управления перевозочным процессом в ОАО «РЖД» [1].

Основными направлениями совершенствования средств диагностики являются:

- создание систем, базирующихся на комплексировании разнородных диагностических признаков и интегральных критериях безопасности;
- развитие подходов к диагностированию на основе предиктивной аналитики с переходом к обслуживанию подвижного состава «по состоянию»;
- совершенствование процессов диагностирования узлов подвижного состава на основе новых физических принципов и современных методов моделирования, а также цифровой обработки данных.

Стационарные средства диагностирования подвижного состава на ходу поезда в настоящее время находятся на этапе бурного качественного развития, вызванного как растущими запросами и требованиями железнодорожной отрасли, так и появлением принципиально новых научно-технических подходов и средств. Такими средствами прежде всего являются машинное зрение, лазерное сканирование и триангуляционные измерения, применение высокоточных и высокочувствительных сенсоров физических величин (вибраакустических, тензометрических, тепловых и др.).

В рамках реализации стратегических задач цифровой трансформации железнодорожного транспорта в России, обозначенных в ОАО «РЖД», создание и внедрение интеллектуальных систем контроля и диагностики становится ключевым фактором обеспечения безопасности, надежности и экономической эффективности перевозочного процесса. Российская практика, основываясь на глубоком анализе мирового опыта, демонстрирует самостоятельный и конкурентоспособный путь развития, от модернизации унаследованных систем к созданию передовых комплексных решений.

Целью данной статьи является системное изложение эволюции технологий диагностики, анализ передовых зарубежных практик и, что наиболее важно, детальное освещение российских достижений в этой области. Особый акцент делается на результатах научно-технической деятельности АО «НИИАС», приведших к разработке и широкому внедрению на сети железных дорог России принципиально новой платформы – Интегрированного поста автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС). Данный комплекс представляет базис для формирования единой межхозяйственной платформы, обеспечивающей переход к малолюдным и безлюдным технологиям.

В статье последовательно рассматриваются: глобальные тренды и этапы развития диагностических систем; технологическая архитектура современных комплексов; роль искусственного интеллекта; региональные особенности; экономические и регуляторные аспекты. На этой основе подробно раскрывается отечественный опыт, включая концепцию гибридной модели обработки данных, структуру и функциональность ППСС, направления его развития (ПАК-М, «Элемент», модуль ДКБ), а также перспективы интеграции в цифровые станционные комплексы и создания распределенных диагностических кластеров. Таким образом, работа предоставляет целостное представление о современном уровне и будущих направлениях автоматизации процессов диагностики в российских условиях.

1. Подробный обзор зарубежных решений по контролю и диагностике подвижного состава

Анализ современного состояния зарубежных разработок в области диагностики железнодорожного подвижного состава выявляет масштабную технологическую трансформацию, охватывающую все аспекты технического обслуживания и контроля безопасности. Этот переход носит системный характер и представляет собой эволюцию от локальных измерительных процедур к глобальным интеллектуальным экосистемам управления жизненным циклом активов.

Исследования показывают, что ключевым драйвером изменений стало осознание экономической неэффективности и операционных рисков, присущих традиционным методам обслуживания, основанным на планово-предупредительных ремонтах и визуальном контроле. Новая парадигма предполагает непрерывный мониторинг технического состояния в реальном времени с прогнозированием остаточного ресурса компонентов [2, 6].

1.1 Смена технологических поколений диагностических систем

Исторический анализ демонстрирует четыре четко выраженных этапа развития.

На первом этапе (до 2000-х годов) доминировали ручные методы инспекции с использованием простых измерительных инструментов – шаблонов, микрометров, мерительных линеек. Этот период характеризовался высокой субъективностью оценок, низкой производительностью и практически полным отсутствием возможностей для выявления скрытых дефектов.

Второй этап (2000-2010-е годы) ознаменовался появлением стационарных путевых систем с базовым набором датчиков – детекторов перегрева буks (hot-box detectors), систем контроля габаритов, детекторов дефектов колес. Эти решения позволили автоматизировать контроль наиболее критических параметров и осуществлять круглосуточный мониторинг [2, 5].

Третий этап (2010-2020-е годы) принес качественный скачок в виде интегрированных мультисенсорных комплексов, объединяющих разнородные измерительные технологии в единые архитектуры. Именно в этот период получили широкое распространение путевые порталы полного цикла, оснащенные камерами высокого разрешения, тепловизорами, лазерными сканерами и рельсовыми датчиками нагрузки. Параллельно началось активное внедрение концепции бортовых инструментальных вагонов (IRV), превращающих обычные эксплуатационные поезда в мобильные диагностические лаборатории [8, 10].

Современный четвертый этап (2020-е годы и далее) характеризуется развитием автономных роботизированных систем и глубокой интеграцией искусственного интеллекта в процессы анализа данных. На смену системам, лишь обнаруживающим дефекты, приходят интеллектуальные платформы, способные прогнозировать развитие повреждений, оценивать остаточный ресурс и формировать прескриптивные рекомендации по оптимальному обслуживанию [9-10].

1.2 Технологическая архитектура современных диагностических комплексов

Современные системы диагностики представляют собой сложные киберфизические системы, архитектура которых включает несколько взаимосвязанных уровней. На нижнем сенсорном уровне располагается многообразие измерительных устройств, каждый из которых решает специфические задачи. Визуальные системы на основе высокоскоростных камер с разрешением, достаточным для обнаружения дефектов размером от нескольких миллиметров, обеспечивают мониторинг поверхности катания колес, боковых поверхностей вагонов, идентификацию инвентарных номеров [3-4]. Тепловизионные камеры, работающие в длинноволновом инфракрасном диапазоне, позволяют осуществлять бесконтактный контроль температурного состояния критических узлов – тормозных систем, буksовых узлов, подшипников, электрооборудования, а также контролировать уровень заполнения цистерн [2, 5].

Лазерные сканеры и системы структурированного света реализуют точное профилирование колесных пар с формированием их трехмерных моделей в реальном времени. Эти технологии обеспечивают измерение диаметра колес, толщины обода,

выявления отклонений от круглости (out-of-round), а также контроль габаритных параметров подвижного состава [3-4]. Акустические и ультразвуковые методы, включая анализ акустической эмиссии и импульсную ультразвуковую дефектоскопию, предназначены для выявления внутренних дефектов в материалах – усталостных трещин, расслоений, неметаллических включений [7].

Особое место занимают датчики деформации и силы, встраиваемые непосредственно в рельсовую структуру. Эти устройства измеряют динамические нагрузки от проходящего подвижного состава, выявляют перегрузки колес, неравномерное распределение массы по осям, что является критически важным для предотвращения повреждений как пути, так и самого подвижного состава [6].

Над сенсорным уровнем располагается платформа сбора и первичной обработки данных, реализующая принципы edge computing. Локальные вычислительные модули, размещаемые на диагностических постах, осуществляют фильтрацию сигналов, выделение признаков, предварительную классификацию и генерацию тревожных сообщений при обнаружении отклонений, превышающих установленные пороговые значения. Такая архитектура позволяет минимизировать объем передаваемых по сетям данных и обеспечить быстрое реагирование на критические ситуации даже при временной потере связи с центральными системами [2, 5].

Следующий уровень – сетевая инфраструктура, обеспечивающая агрегацию данных от множества разнесенных географически измерительных постов, их синхронизацию и передачу в централизованные системы анализа. Для этих целей используются как проводные (Ethernet, оптоволоконные линии), так и беспроводные технологии передачи данных, включая специализированные радиоканалы и сотовые сети [2, 5].

Верхний уровень системы представляет собой централизованную аналитическую платформу, выполняющую углубленный анализ накопленных данных, выявление долгосрочных трендов, корреляцию информации от различных источников, формирование прогнозных моделей и генерацию управляющих воздействий для систем планирования технического обслуживания.

1.3 Роль искусственного интеллекта и машинного обучения

Интеллектуализация диагностических систем является одним из наиболее значимых трендов последнего десятилетия. Методы машинного обучения и глубокого обучения применяются на различных этапах обработки данных, существенно повышая эффективность и достоверность диагностики [7, 10].

В задачах классификации визуальных дефектов (трещин, выщербин, коррозионных повреждений) наиболее эффективно зарекомендовали себя сверточные нейронные сети (CNN), способные автоматически выделять характерные признаки из изображений без ручного проектирования признаковых пространств. Эти архитектуры демонстрируют высокую точность при распознавании сложных паттернов, адаптируются к изменяющимся условиям освещенности и загрязненности поверхностей [10].

Для анализа временных рядов, получаемых от вибрационных, акустических и динамических датчиков, широко применяются рекуррентные нейронные сети, в частности архитектуры с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Эти модели способны учитывать долгосрочные зависимости в последовательностях данных, что критически важно для прогнозирования развития дефектов и оценки остаточного ресурса оборудования [10].

Особое значение приобретают технологии слияния данных от множества разнородных датчиков (sensor fusion). Байесовские методы, глубокие архитектуры с множественными входами позволяют интегрировать информацию визуальных, тепловизионных, акустических и вибрационных каналов, существенно повышая достоверность диагностических заключений и снижая вероятность ложных срабатываний [10-11].

Генеративно-состязательные сети (GAN) находят применение в решении проблемы дисбаланса классов, характерной для диагностических задач, где примеры критических дефектов встречаются значительно реже нормальных состояний. Эти модели позволяют синтезировать дополнительные обучающие примеры редких дефектов, улучшая сбалансированность наборов данных и повышая качество обучения классификаторов [10].

1.4 Региональные особенности развития технологий

Анализ международного опыта выявляет существенные различия в подходах и приоритетах развития диагностических технологий в различных регионах мира, обусловленные историческими, экономическими и организационными факторами [4, 6-8].

В Европе доминирует системный подход, ориентированный на создание интероперабельных решений, интегрируемых в общеевропейскую железнодорожную систему. Стандартизация под эгидой Европейского союза железных дорог (ERA) и комитетов CEN/CENELEC охватывает не только технические характеристики оборудования, но и форматы данных, протоколы обмена, процедуры сертификации. Ключевым направлением развития является интеграция систем диагностики с Европейской системой управления железнодорожным движением (ERTMS), что создает единое информационное пространство для управления перевозочным процессом и техническим обслуживанием. Особое внимание уделяется концепции инструментальных вагонов (IRV), позволяющих осуществлять непрерывный мониторинг состояния инфраструктуры в процессе эксплуатации [8].

Североамериканский подход характеризуется прагматичностью и ориентацией на решение конкретных операционных задач, прежде всего – предотвращение сходов подвижного состава. На сети железных дорог США и Канады получили массовое распространение придорожные (wayside) диагностические системы, устанавливаемые на критически важных участках. Особое развитие получили акустические детекторы подшипников, системы контроля ударных нагрузок на колеса (Wheel Impact Load Detectors), тепловизионные системы обнаружения перегрева букс. Стандартизация в рамках Ассоциации американских железных дорог (AAR) обеспечивает совместимость оборудования различных производителей. Крупнейшие операторы (BNSF, Union Pacific, Canadian National) активно внедряют программы предиктивного обслуживания, основанные на анализе больших данных и использовании IoT-платформ [6-7].

Азиатский регион, и особенно Китай, демонстрирует наиболее динамичное развитие и масштабность внедрения. Создание крупнейшей в мире сети высокоскоростных железных дорог потребовало разработки и реализации комплексных программ автоматизации технического обслуживания. Китайские решения отличаются высокой степенью интеграции – типичным примером являются автоматизированные станции приемки и диагностики (PRISM), устанавливаемые на входах в депо. Эти системы объединяют многолинейное структурированное освещение для контроля геометрии колес, высокоразрешающие камеры для выявления поверхностных дефектов, тепловизоры, лазерные сканеры для габаритного контроля [3-4]. Государственная поддержка способствует развитию собственных производителей диагностического оборудования и созданию законченных технологических цепочек.

Японский подход сохраняет фокус на достижении высочайших показателей надежности и точности, что особенно критично для высокоскоростных линий Shinkansen. Диагностические системы здесь отличаются прецизионностью измерений, развитыми алгоритмами обработки сигналов, глубокой интеграцией с системами управления движением. Особое внимание уделяется ультразвуковым методам контроля колесных пар и созданию роботизированных комплексов для автоматизированных депо [4].

1.5 Экономические аспекты внедрения

Переход к современным системам диагностики сопряжен со значительными инвестициями, анализ экономической эффективности которых требует комплексного подхода. Капитальные затраты (CAPEX) включают стоимость диагностического оборудования, несущих конструкций (порталов, платформ), вычислительной инфраструктуры, монтажа и пусконаладки, интеграции с существующими системами, обучения персонала. Стоимость базовых путевых систем начинается от нескольких сотен тысяч долларов, тогда как комплексные автоматизированные порталы могут требовать инвестиций в миллионы долларов. Роботизированные комплексы для депо относятся к наиболее капиталоемким решениям [10].

Операционные затраты (OPEX) включают техническое обслуживание и калибровку оборудования, расходные материалы, энергопотребление, лицензионные платежи за программное обеспечение, затраты на персонал для эксплуатации и анализа данных, обновление и модернизацию систем.

Прямые экономические выгоды от внедрения современных систем диагностики включают сокращение незапланированных простоев, снижение затрат на аварийные ремонты, оптимизацию графиков технического обслуживания, продление срока службы компонентов, уменьшение потребности в инспекционном персонале, экономию на запасных частях за счет своевременной замены. Косвенные выгоды проявляются в повышении надежности и доступности подвижного состава, улучшении репутации оператора, снижении рисков аварий, соответствии регуляторным требованиям, накоплении данных для долгосрочного планирования [10].

Оценка возврата инвестиций (ROI) зависит от множества факторов: масштаба внедрения, интенсивности эксплуатации, текущего уровня отказов, стоимости простоев, эффективности внедренных систем, организационной готовности к изменениям. Типичные сроки окупаемости составляют 2-5 лет для базовых систем мониторинга, 3-7 лет для комплексных автоматизированных решений, 5-10 лет для роботизированных систем с более высокой неопределенностью оценок [10].

1.6 Технические стандарты и регулирование

Развитие систем диагностики происходит в условиях ужесточающихся требований безопасности и стандартизации. Международные стандарты IEC 62278 (RAMS – надежность, готовность, ремонтопригодность и безопасность) и серия европейских стандартов EN 50126/128/129 задают общие рамки для разработки и внедрения систем, связанных с безопасностью железнодорожного транспорта. Стандарты ISO 9712 и EN 473 регламентируют квалификацию персонала неразрушающего контроля, тогда как ISO 17025 устанавливает требования к компетентности испытательных лабораторий [10].

В Европейском союзе технические спецификации интероперабельности (TSI) и требования Европейского агентства по железным дорогам (ERA) формируют детальные правила проектирования, сертификации и эксплуатации диагностического оборудования. В Северной Америке регулирование осуществляют Федеральная администрация железных дорог США (FRA) и Transport Canada, тогда как стандарты Ассоциации американских железных дорог (AAR) устанавливают отраслевые технические требования. В Азии действуют национальные системы стандартизации: GB стандарты в Китае, JIS в Японии, Indian Railway Standards в Индии [10].

Процесс сертификации диагностических систем включает валидацию проектной документации, испытания прототипов, полевые испытания, оценку соответствия стандартам безопасности, получение разрешения на эксплуатацию. Особое внимание уделяется квалификации персонала – обучению и сертификации операторов систем, специалистов по неразрушающему контролю, аналитиков данных [10].

1.7 Перспективы и направления развития

Будущее развитие систем диагностики подвижного состава будет определяться несколькими ключевыми трендами. В краткосрочной перспективе (1-3 года) ожидается дальнейшее распространение интегрированных мультисенсорных систем, расширение применения машинного обучения для анализа данных, увеличение числа внедрений бортовых инструментальных систем, развитие облачных платформ для управления данными мониторинга [10].

В среднесрочной перспективе (3-7 лет) прогнозируется коммерциализация роботизированных инспекционных комплексов для депо, широкое внедрение цифровых двойников подвижного состава, развитие прескриптивных систем обслуживания, предлагающих не только прогнозы, но и конкретные рекомендации по действиям, стандартизация протоколов обмена данными между различными системами, появление новых бизнес-моделей, таких как Monitoring-as-a-Service [9-10].

Долгосрочные перспективы (7+ лет) связаны с созданием полностью автономных систем диагностики и обслуживания, интеграцией с автономными поездами, разработкой самообучающихся систем, адаптирующихся к новым условиям эксплуатации, созданием роботизированных комплексов, способных выполнять не только диагностику, но и ремонтные операции, формированием глобальных платформ обмена данными и лучшими практиками [10].

Критическими факторами успеха на пути к полной автоматизации являются технологическая надежность и точность диагностических систем, интеграционная совместимость компонентов, масштабируемость решений, обеспечение кибербезопасности, поддержка руководства и наличие четкой стратегии, развитие компетенций персонала, культура, ориентированная на данные и инновации, экономическая обоснованность инвестиций и четкий расчет возврата инвестиций [2, 7, 10].

Таким образом, современные зарубежные решения в области контроля и диагностики подвижного состава представляют собой сложные интегрированные системы, объединяющие передовые сенсорные технологии, методы искусственного интеллекта и робототехнические платформы. Их внедрение позволяет осуществить переход от реактивного к предиктивному и прескриптивному обслуживанию, что обеспечивает существенное повышение безопасности, надежности и экономической эффективности железнодорожного транспорта. Успешная реализация таких проектов требует комплексного подхода, учитывающего технологические возможности, экономические ограничения, регуляторные требования и организационную готовность к трансформации процессов технического обслуживания.

1.8 История вопроса в России

Еще 15-20 лет назад многие из применяемых сегодня методов диагностирования подвижного состава казались фантастикой, а перечень диагностируемых узлов и параметров подвижного состава был крайне ограниченным. Набор средств контроля и диагностики включал в себя небольшое число приборов и устройств, которые были обособлены и работали независимо друг от друга.

Развитие средств диагностирования подвижного состава на ходу поезда начиналось с приборов обнаружения нагретых аварийных букс ПОНАБ (конец 60-х -70-е годы прошлого века) и ДИСК-Б (конец 70-х – середина 90-х годов прошлого века).

С появлением современных микропроцессорных устройств в 1998-2002 годах научно-производственным центром «Инфотекс» (НПЦ «Инфотекс») были разработаны и внедрены комплексы технических средств для модернизации ПОНАБ (КТСМ-01) и ДИСК (КТСМ-01Д). В данной аппаратуре впервые была заложена возможность передачи результатов диагностики на соседние станции и в центральный диагностический пост благодаря использованию системы передачи данных линейных пунктов (СПД ЛП) на базе концентраторов информации КИ-6М.

Данные технические решения послужили основой для создания автоматизированной системы контроля подвижного состава (АСКПС), активное внедрение которой проводилось на сети железных дорог России в начале 2000-х годов.

Еще одним направлением развития средств диагностирования подвижного состава на ходу поезда стало внедрение устройств контроля габарита подвижного состава. Наиболее простым и эффективным способом выявления нарушений нижнего габарита стало применение устройства контроля схода подвижного состава (УКСПС). Несмотря на однократный принцип действия, основанный на изломе регистрирующего элемента частями подвижного состава, находящимися вне габарита, устройство активно внедрялось и продолжает эксплуатироваться в настоящее время.

На основе проведенного анализа международного опыта и технологических трендов в области контроля и диагностики подвижного состава становится очевидно, что мировая практика последовательно эволюционирует от применения отдельных датчиков и ручных методов к созданию комплексных, интегрированных и интеллектуальных систем. Зарубежные решения демонстрируют активный переход к автоматизированным стационарным порталам, бортовым инструментальным системам и, как наиболее перспективное направление, к мобильным роботизированным платформам, способным проводить автономную диагностику. Ключевыми драйверами этой трансформации выступают технологии машинного зрения, лазерного сканирования, предиктивной аналитики на основе искусственного интеллекта и стремление к переходу от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому и прогнозируемому состоянию.

В этом глобальном контексте представляется крайне важным и своевременным детально рассмотреть отечественный опыт и достижения в создании современных диагностических комплексов. Активное развитие данного направления в России, в частности, масштабная научно-техническая деятельность АО «НИИАС» с начала 2000-х годов, привело к

формированию собственного, конкурентоспособного технологического пути. Начав с модернизации унаследованных систем, таких как ПОНАБ и ДИСК, отечественные специалисты создали и внедрили на сети ОАО «РЖД» принципиально новые решения, соответствующие мировому уровню. Центральным элементом этой работы стал Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС), который не только представляет собой законченный роботизированный диагностический комплекс, но и служит аппаратно-программной платформой для дальнейшего развития. Именно этот комплекс стал основой для единой межхозяйственной платформы, обеспечивающей переход на малолюдные технологии при техническом и коммерческом осмотре.

Таким образом, логичным продолжением обзора мирового опыта является подробное освещение российских разработок, демонстрирующих конкретную реализацию концепции интегрированной диагностики, начиная от гибридной модели обработки данных и заканчивая практическими результатами внедрения и перспективами создания распределенных диагностических кластеров.

2. Гибридная модель комплексирования диагностических данных

Эффективная централизованная обработка разнородной информации, полученной от диагностических систем различных типов, является для железнодорожного транспорта одной из наиболее востребованных проблем, решение которой оказывает значительный эффект как на экономические показатели функционирования железнодорожной инфраструктуры, так и на уровень безопасности железнодорожных перевозок.

Анализ современных тенденций развития отечественных и зарубежных информационно-диагностических систем свидетельствует о малой эффективности традиционного подхода к решению указанной проблемы, основанного на раздельном использовании одной или нескольких диагностических моделей с последующим объединением результатов по простым мажоритарным принципам или нескольким критериям.

Впервые при создании объекта диагностической инфраструктуры была создана гибридная модель единого интегрированного поста приема составов на сортировочной станции (ППСС), позволяющая реализовать новый подход к решению проблемы интеллектуальной централизованной обработки разнородной информации с использованием когнитивных сенсоров, снабженных логико-лингвистической прагматикой, способной объединять разнородные данные, полученные от разных источников информации, и вырабатывать на их основе адекватные диагностические решения относительно технического состояния подвижного состава и железнодорожной инфраструктуры.

Верхний уровень иерархической интеллектуальной системы осуществляет интеграцию полученных от подсистем частных оценок в единый показатель тревоги для конечного пользователя. Математическую основу верхнего иерархического уровня интеллектуальной системы составляют гранулярные логические семантики (рисунок 1).

Была разработана обобщенная иерархическая структурная схема единой интеллектуальной среды функционирования ППСС, отражающая все этапы процесса получения и интеллектуальной обработки информации в соответствии с предложенной гибридной моделью.

Повышение показателя подтверждаемости неисправностей, обусловленное внедрением современных методов комплексной обработки гетерогенной информации, использующих разрабатываемую интеллектуальную гибридную модель, позволило на новом уровне реализовать малолюдный режим работы. Это достигнуто путем выбора на шкалах измеряемых диагностических параметров таких диапазонов значений, соответствующих верхним уровням тревог («Тревога 2»), при которых показатели подтверждаемости равны 100%, и дополнительного подтверждения человеком наличия неисправности не требуется.

На основе разработанной гибридной модели базируется интеллектуальная система прогнозирования технического состояния подвижного состава и объектов инфраструктуры, которая позволяет на основе комплексных данных диагностики выявлять предотказные состояния единиц подвижного состава, определять категорийную вероятность их схода, а также оценивать степень их негативного влияния на железнодорожную инфраструктуру.

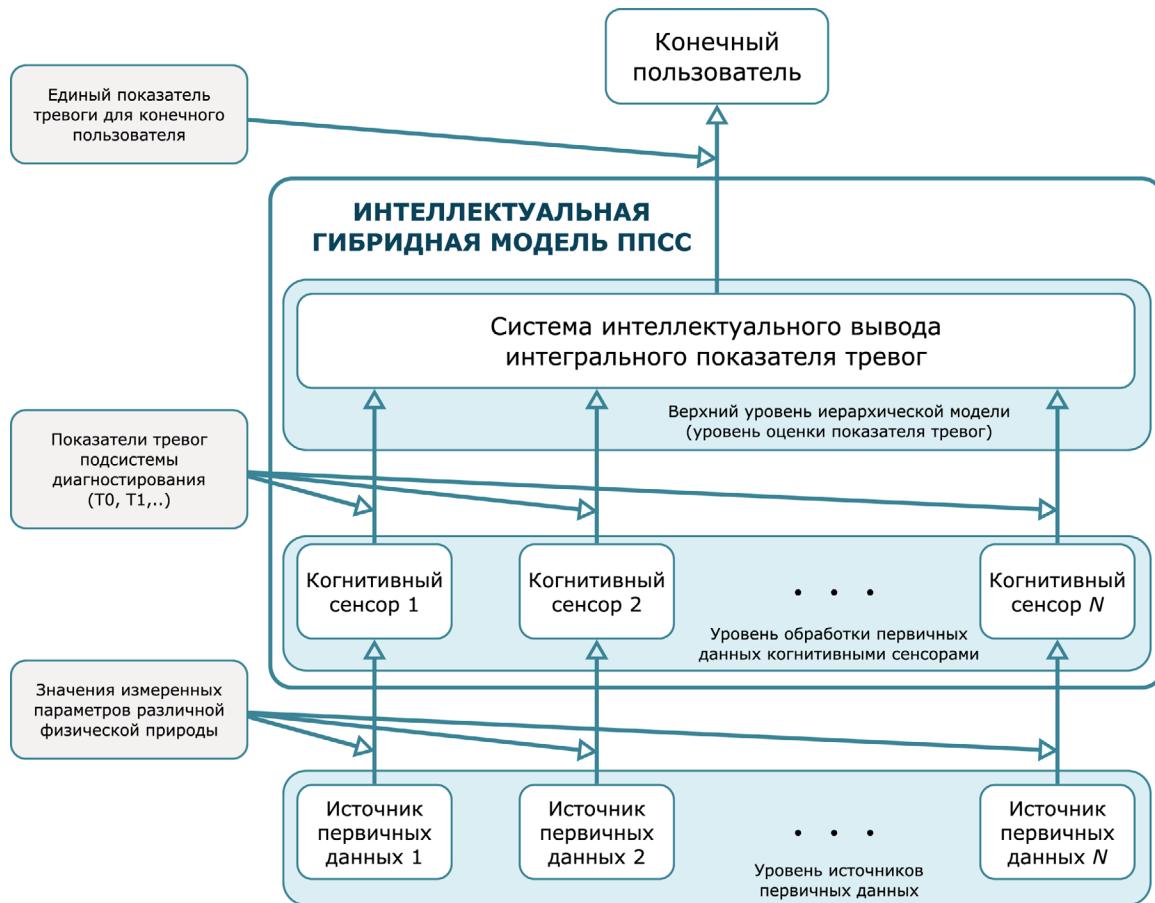


Рис. 1 – Структурная схема иерархической интеллектуальной среды

3. Интегрированный пост автоматизированного приема и обработки подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС)

Комплекс ППСС представляет собой первую в практике РЖД комплексную диагностическую систему, которая была не только реализована, но и успешно внедрена (тиражирована) на сети железных дорог.

Его ключевым преимуществом является возможность проведения единого, совмещенного технического и коммерческого осмотра подвижного состава непосредственно в парке приема. Это достигается за счет глубокой автоматизации традиционных технологических процессов [12-14].

Функциональность ППСС построена на двух основаниях:

1. **Интеграция данных** от существующих диагностических систем (таких как КТСМ, КТИ, ПАК и др.).
2. **Внедрение нового, полностью автоматического функционала**, основанного на передовых технологиях:
 - **Машинное зрение** для визуального контроля: определение положения фрикционных клиньев, наличия и толщины тормозных колодок, распознавания инвентарных номеров, трафаретных надписей и знаков опасности.
 - **Тензометрия** для контроля нагрузок и целостности: измерение массы вагонов, выявление неравномерной загрузки, смещения центра тяжести и дефектов поверхности катания колес.

- **3D-сканирование** для геометрического анализа: обнаружение отрицательной динамики вагонов, дефектов кузова и нарушений габарита.
- **Дистанционный сбор данных** для мониторинга в реальном времени: автоматическое считывание информации с датчиков контроля состояния, установленных непосредственно на подвижном составе.

Таким образом, ППСС формирует целостную цифровую картину состояния каждого вагона, объединяя как унаследованные, так и принципиально новые источники диагностической информации. Визуальная организация измерительного участка комплекса показана на рисунке 2.



Рис. 2 – Измерительный участок комплекса ППСС

Структурная схема ППСС представлена на рисунке 3.

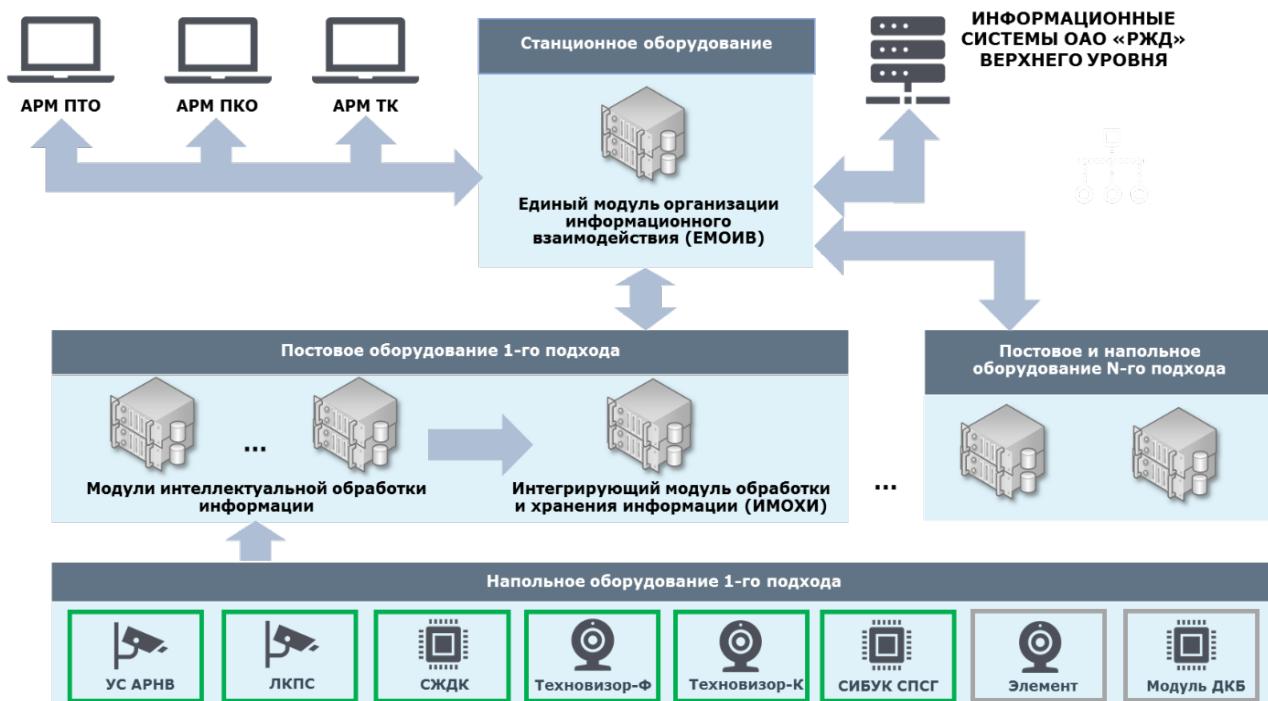


Рис. 3 – Структурная схема ППСС

Ключевым компонентом ППСС является единый модуль организации информационного взаимодействия (ЕМОИВ), который обеспечивает координацию работы всех модулей комплекса, автоматизацию процессов диагностирования и прогнозирования состояния подвижного состава. Корректная интерпретация результатов технического и коммерческого осмотра вагонов и грузов основывается на комплексировании модулем информации, поступающей от разнородных источников диагностических данных. Сформированные диагностические признаки передаются модулем в автоматизированные системы вагонного хозяйства в части технического обслуживания, хозяйства грузовой и коммерческой работы в части коммерческого осмотра, и информационно-управляющие системы в части управления процессами перевозок.

Особое внимание АО «НИИАС» уделяется важности метрологического обеспечения подсистем ППСС. В составе подсистем ППСС применены следующие типы средств измерения:

1. Модули, взвешивающие СЖДК.ВМ. Являются основой для реализации функционала подсистемы контроля веса и вертикальных динамических нагрузок (СЖДК). В СЖДК реализован принцип поколесного взвешивания единиц подвижного состава, что делает возможными как измерение веса, так и контроль неравномерности погрузки и смещения груза в пути следования. На СЖДК.ВМ получено свидетельство об утверждении типа средств измерения с погрешностью измерения веса от 0,2% до 1% в зависимости от скорости в диапазоне скоростей до 90 км/ч.
2. Модули фотограмметрических измерений линейных размеров «Техновизор». Впервые в мировой практике реализовано бесконтактное оптическое измерение линейных размеров элементов грузового подвижного состава. Зарегистрирован тип средств измерений с пределами допускаемой абсолютной погрешности измерений линейных размеров до ± 1 мм.
3. Модули лазерного измерения отрицательной динамики и габарита подвижного состава в составе системы лазерного контроля подвижного состава (ЛКПС). Важнейшим результатом, позволяющим в автоматическом режиме производить измерение габаритов и параметров отрицательной динамики грузовых вагонов в составе движущегося поезда стало утверждение в качестве типа средства измерения метрологического модуля ЛКПС.

4. Развитие функциональных возможностей ППСС

Модульная архитектура ППСС, представленная на рисунке 3, позволяет наращивать набор автоматически диагностируемых параметров с учетом актуального уровня развития программно-технических средств и технологий. Основными новыми модулями комплекса ППСС, расширяющими его функциональные возможности являются:

- система акустического контроля буксовых узлов модернизированная (ПАК-М);
- система контроля сохранности элементов подвижного состава (Элемент).

4.1 Система акустического контроля буксовых узлов модернизированная (ПАК-М)

В начале второго десятилетия нашего века на сети дорог ОАО «РЖД» впервые была внедрена разработанная АО «НИИАС» система контроля буксовых узлов Пост акустического контроля (ПАК). Системы ПАК достаточно эффективно эксплуатировались на сети железных дорог ОАО «РЖД» и за этот период выявили тысячи неисправных буксовых узлов. Вместе с тем, к концу второго десятилетия возникла острая необходимость в их серьезной модернизации.

В ходе инициативной разработки, начатой в 2019 году, специалистами АО «НИИАС» была проведена глубокая модернизация поста акустического контроля. Фактически, была создана новая система, получившая обозначение ПАК-М [15].

Модернизация затронула как аппаратную часть ПАК, так и программное обеспечение. На рисунке 4 представлен общий вид измерительного участка ПАК-М с установленным напольным оборудованием системы.



Рис. 4 – Общий вид измерительного участка ПАК-М

Система построена полностью на отечественных компонентах и позволяет выявлять неисправности как обычных роликовых, так и кассетных подшипников. Программный модуль учета пространственно-частотных характеристик электро-акустического тракта позволяет обеспечить единство измерений акустических сигналов буксовых узлов разными установками ПАК-М и реализовать контроль развития неисправностей.

Это открывает путь к развитию предиктивной аналитики состояния буксовых узлов по их шумовым сигналам, и, в перспективе, к снижению числа отцепок грузовых вагонов в пределах гарантийных плеч по показаниям аппаратуре типа КТСМ.

В составе ПО используются алгоритмы машинного обучения. Все это позволяет без особых доработок расширять функционал при необходимости диагностирования новых типов буксовых узлов.

Процесс развития дефектов буксовых подшипников иллюстрирует рисунок 5, на котором приведены типовые тренды технического состояния буксового подшипника и стоимости его технического обслуживания.

Этапы 2-3 имеют достаточно большую продолжительность, соответствующую нескольким тысячам километров пробега. Обнаружение дефектов на этих этапах и использование предиктивного трендового анализа обеспечивает организацию планирования технического обслуживания по фактическому и прогнозному состоянию. Обязательным условием здесь является многократный проход диагностируемых буксовых узлов через системы ПАК-М.

Наиболее коротким этапом развития дефектов буксовых узлов является этап 5, продолжительность которого обеспечивает пробеги не более сотен километров. Выявленные на этом этапе дефекты приводят к немедленным отцепам, что является одним из факторов высокой стоимости проводимых ТО. При этом несвоевременное обнаружение дефектов на данном этапе может приводить к фатальным последствиям, вследствие чего основным временем интервалом выявления дефектов буксовых узлов должны являться этапы 2-4.

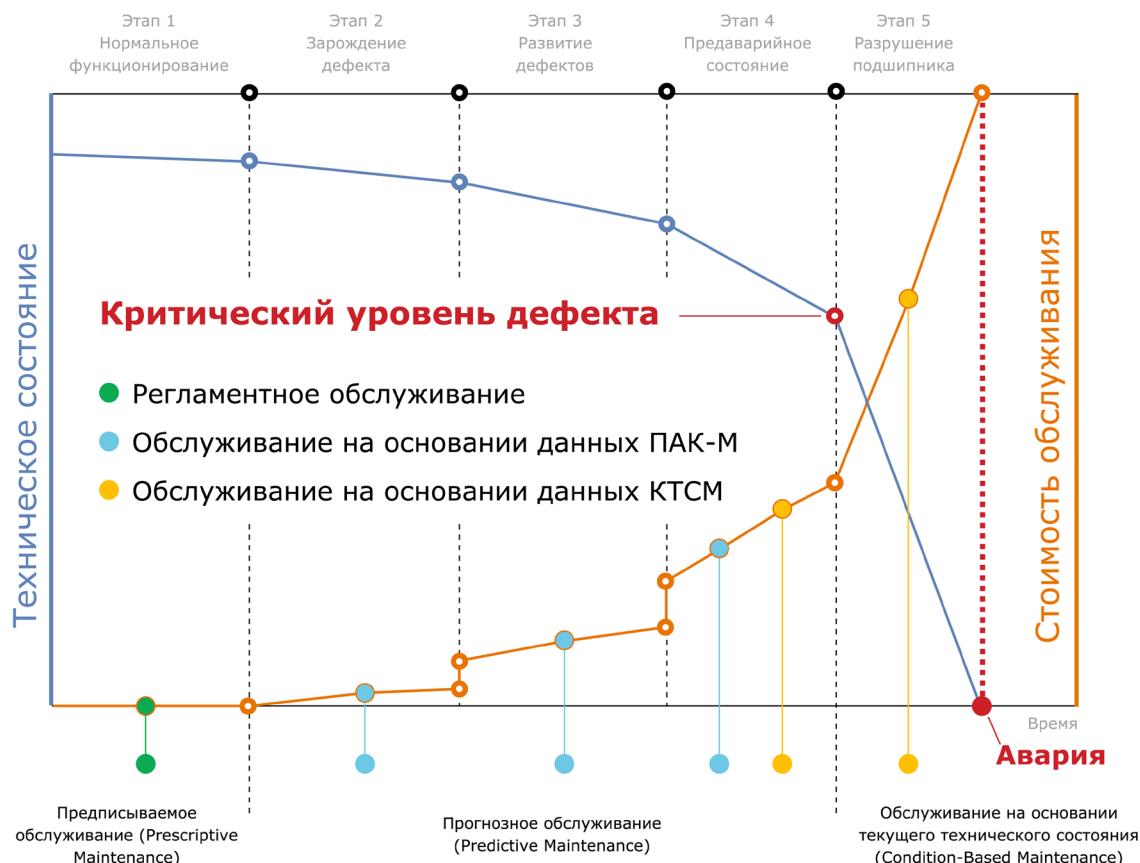


Рис. 5 – Этапы развития дефектов буксовых подшипниковых узлов и стоимость технического обслуживания

С учетом вышесказанного внедрение ПАК-М на железнодорожной сети позволяет:

- сократить количество неплановых остановок поездов;
- снизить время на обслуживание технических средств;
- рационально планировать работы по устранению неисправностей с учетом возможностей ремонтных предприятий за счет выявления ранней стадии развития и прогнозирования отказа;
- сократить затраты на заводской ремонт за счет раннего выявления дефекта.

ПАК-М размещаются в стратегически важных по интенсивности движения пунктах на сети дорог. Это позволяет выявлять дефекты подшипников буксовых узлов на ранних стадиях развития в зоне оборота грузовых вагонов до нескольких тысяч километров, отслеживать тренды развития неисправностей. С учетом этого, появляется перспектива существенного снижения количества внеплановых остановок поездов по тревожным показаниям аппаратуры типа КТСМ.

Модульные аппаратно-программные решения, применяемые в системе ПАК-М, позволяют легко интегрировать ее в состав комплекса ППСС.

4.2 Система контроля сохранности элементов подвижного состава «Элемент»

Важной и актуальной проблемой, приносящей большие финансовые потери и непосредственно влияющей на безопасность движения, является разборудование грузовых вагонов.

Система контроля сохранности элементов подвижного состава «Элемент» [16] позволяет автоматизировать процесс контроля наличия важнейших узлов тормозного оборудования грузовых вагонов с выявлением отсутствующих деталей. Создание системы позволило выявлять в автоматическом режиме отсутствие таких элементов, как авторежим и авторегулятор, а также контролировать в автоматизированном режиме сохранность прочих узлов тормозного оборудования вагонов.

Работа системы основана на технологии машинного зрения, позволяющей формировать и обрабатывать детализированные изображения компонентов единиц подвижного состава при технологических скоростях движения. Высокая достоверность автоматического анализа состояния объектов подвагонного пространства обеспечивается применением нейронных сетей.

В системе Элемент использован метрологический модуль «Техновизор». Это позволило впервые производить на движущихся грузовых вагонах измерение фотограмметрическим методом таких важных параметров регулировки тормозной рычажной передачи, как А-большое и а-малое.

Регистрирующее оборудование системы «Элемент» представлено на рисунке 6.



Рис. 6 – Регистрирующее оборудование системы «Элемент»

На рисунке 7 представлен информационно-диагностический интерфейс системы «Элемент» при работе в составе ППСС.

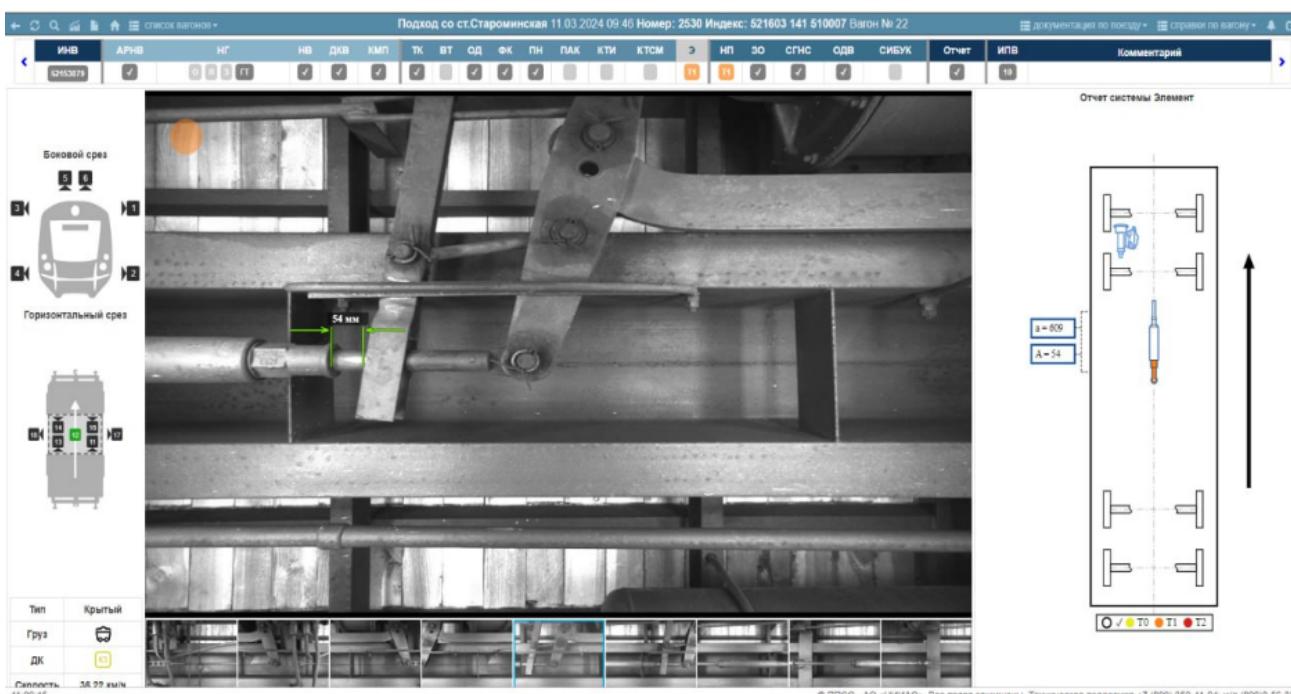


Рис. 7 – Информационно-диагностический интерфейс системы «Элемент» при работе в составе ППСС

В целях предотвращения загрязнения смотровых стекол камер системы АО «НИИАС» разработана и запатентована подсистема «воздушного лезвия» [17]. Уникальность технологии заключается в формировании мощного направленного воздушного потока, препятствующего попаданию пыли, атмосферных осадков и капель технологических жидкостей на смотровые стекла камеры во время движения поезда.

В настоящее время в рамках реализации проекта «Цифровая железнодорожная станция» системой «Элемент» дооснащены пять комплексов ППСС на подходах к станции Челябинск-Главный Южно-Уральской железной дороги. По результатам эксплуатации системы «Элемент» по данным с точек контроля на подходах к станции Челябинск-Главный в среднем за месяц выявляется около 60 случаев разборцов вагонов.

4.3 Реализация подхода к приоритетной браковке подвижного состава на основе дополнительного критерия безопасности

Дальнейшим развитием принципа комплексирования диагностических признаков, реализованного в ППСС, стал предложенный АО «НИИАС» подход приоритетной браковки подвижного состава, находящегося в наихудшем состоянии, на основе дополнительного критерия безопасности (ДКБ).

В рамках реализации инвестиционного проекта «Цифровая железнодорожная станция» на ст. Челябинск-Главный АО «НИИАС» ведутся работы по развитию функциональных возможностей ППСС в части автоматического выявления вагонов, находящихся в наихудшем техническом состоянии.

При этом реализуются мероприятия по разработке и внедрению модуля формирования критерия безусловной отцепки вагонов в текущий отцепочный ремонт (далее Модуль ДКБ), с внедрением опытных образцов на ст. Входная Западно-Сибирской железной дороги и ст. Челябинск-Главный Южно-Уральской железной дороги.

Модуль ДКБ позволяет минимизировать степень негативного влияния человеческого фактора на процесс принятия решения о браковке за счет внедрения комплексного организационно-технологического подхода к браковке вагонов с использованием данных от ППСС, а также от внешних систем вагонной диагностики (КТИ, КТСМ, ПАК/ПАК-М).

Указанный подход характеризует возможность постановки вагонов в рейс, в зависимости от результатов комплексного анализа обнаруженных неисправностей и прогнозирования динамики ухудшения состояния вагона в пути следования.

В основе подхода лежит принцип использования части ремонтных ресурсов станции на безусловную браковку неисправных вагонов с высокой вероятностью негативного влияния на безопасность перевозочного процесса.

В соответствии с целевой схемой организации процесса автоматической браковки грузовых вагонов, находящихся в наихудшем техническом состоянии, ППСС, оснащенный модулем ДКБ, формирует и передает в ЕК АСУВ тревожные показания по функции «ДКБ», на основании которых ЕК АСУВ автоматически принимает решение о формировании уведомления ВУ-23 ВЦ.

При этом обеспечивается прозрачность оценки технического состояния подвижного состава, значительно снижается негативное влияние человеческого фактора на процесс принятия решения о браковке вагонов, находящихся в наихудшем техническом состоянии. Обеспечивается вывод из эксплуатации вагонов, негативно влияющих на инфраструктуру, так же снижается нагрузка на процесс организации движения по пути следования поезда в части маневровой работы на промежуточных станциях.

В соответствии с результатами имитационного моделирования работы функции «ДКБ» на ст. Челябинск-Главный произведена оценка степени влияния неисправностей, выявленных ППСС, эксплуатируемыми на указанных станциях, на формирование тревожных показаний по функции «ДКБ».

Наибольшее количество вагонов с тревожным показанием по «ДКБ» имеют неисправности, связанные с износом фрикционных клиньев, наличием дефектов поверхности катания колесных пар и шумом буксовых узлов.

При этом, наибольшее влияние на формирование тревожного показания по функции «ДКБ» оказывают неисправности, связанные с износом фрикционного клина (52%) и шумом буксовых узлов (26%).

Специалистами АО «НИИАС» проведено моделирование динамики изменения технического состояния вагонного парка при внедрении ДКБ на ст. Челябинск-Главный.

На диаграмме, представленной на рисунке 8, представлена прогнозируемая динамика изменения структуры тревожных показаний, сформированных ППСС.

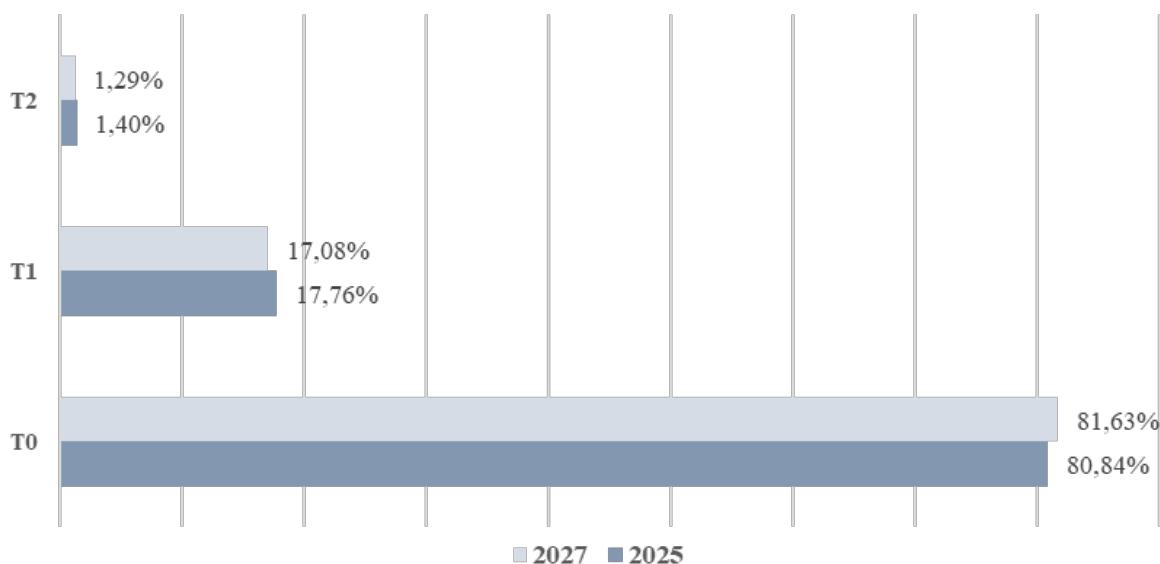


Рис. 8 – Прогнозируемая динамика изменения структуры тревожных показаний, сформированных ППСС.

Указанная диаграмма свидетельствует о снижении доли тревожных показаний аварийного и предаварийного уровня Т2 и Т1 и увеличении доли тревожных показаний диагностического уровня Т0 в общем количестве тревог ППСС. То есть показатель технического состояния грузового подвижного состава, курсирующего по путям ОАО «РЖД» по результатам моделирования улучшится.

Первые результаты практического применения данного подхода на станциях Челябинск-Главный ЮУЖД и Входная ЗСЖД позволяет судить о высокой эффективности предложенного подхода. Автоматическое выявление грузовых вагонов, находящихся в

наихудшем техническом состоянии, производилось согласно утвержденной методике формирования безусловной отцепки вагонов в ТОР. Так, только за месяц (с 15.09.25 по 14.10.25) опытной эксплуатации Модуля ДКБ на станции Челябинск-Главный были отцеплены 56 забракованных вагонов. Подтверждаемость показаний составила 100%.

Очевидно, что существенное влияние на состояние вагонного парка Модуль ДКБ окажет только в случае его внедрения на всей сети. При этом степень его влияния может быть точно определена на основе статистических данных, которые появятся после ввода Модуля ДКБ в эксплуатацию.

4.4 Интеграция ППСС в станционные информационно-управляющие комплексы

В рамках решения задачи цифровизации сортировочного комплекса железнодорожной станции специалистами АО «НИИАС» разработана схема информационного взаимодействия модулей станции (рис. 10), в которой ППСС выступает основным источником данных, позволяющих повысить перерабатывающую способность автоматизированных сортировочных горок. Пилотным объектом реализации данного подхода стала ст. Челябинск-Главный Южно-Уральской железной дороги. При этом комплекс ППСС формирует следующие дополнительные информационные потоки:

1. Передача данных о технических характеристиках вагонов (тип, габарит, парусность, физический вес и др.) и о состоянии их узлов (дефекты поверхности катания колес, износ тормозных колодок и др.), влияющих на ходовые свойства отцепа, в управляющую систему «Комплексная система автоматизации управления сортировочным процессом (КСАУ СП)» для учета в алгоритмах интервального и прицельного регулирования скорости движения отцепов.
2. Передача в АСУ СТ информации для автоматического предзаполнения уведомления формы ВУ-23 по факту обнаруженных технических неисправностей в диагностируемых вагонах.
3. Передача данных о фактическом натурном листе поезда в систему контроля и подготовки информации о перемещениях вагонов и локомотивов на станции в реальном времени (СКПИ ПВЛ РВ) для повышения качества распознавания подвижных единиц.

Дополнительный информационный поток 1 позволяет учесть факторы, оказывающие влияние на динамику движения отцепов и повысить степень адаптивности управления процессом роспуска.

Так, например, управление роспуском с учетом силы ветра и аэродинамического сопротивления вагона производится в КСАУ СП на базе получаемого из ППСС набора значений площади проекций вагона, вычисленных с шагом 5 градусов по 3D-модели вагона и груза, построенной системой ЛКПС (рисунок 9).

Расчет силы, действующей на вагон, производится в КСАУ СП по формуле:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 ,$$

где, ρ – плотность воздуха, A – общая площадь объекта по направлению потока воздуха, C_d – безразмерный коэффициент сопротивления, v – скорость объекта относительно среды.

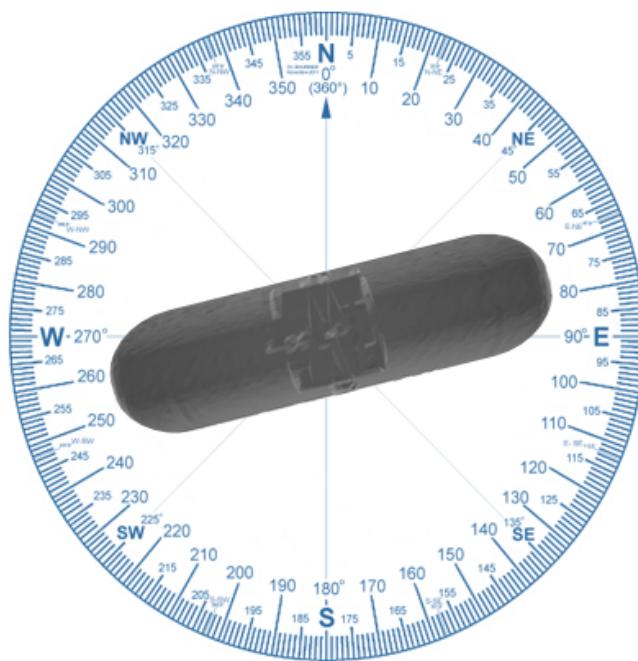


Рис. 9 – Определение набора значений площади проекций вагона, полученных из 3D-модели вагона и груза, построенной системой ЛКПС

Основными эффектами интеграции ППСС с информационно-управляющими системами и комплексами сортировочной станции являются:

1. Увеличение перерабатывающей способности сортировочной горки.
2. Автоматизация процессов браковки вагонов и формирования сортировочного листа.
3. Повышение достоверности коммерческого осмотра подвижного состава во взаимодействии с Подсистемой интеллектуального коммерческого осмотра поездов и вагонов в составе Автоматизированной системы оперативного контроля и анализа качества коммерческой работы и безопасности грузовых перевозок (АСКМ ИКО).
4. Снижение числа внеплановых отцепок подвижного состава за счет реализации ППСС алгоритмов предиктивной аналитики состояния подвижного состава и груза.
5. Повышение скорости обработки вагонопотока и эффективности планирования работы полигонов.

ППСС послужил катализатором для развития новых подходов к созданию диагностических средств и внедрению диагностических комплексов для автоматизации технологических процессов диагностики на различных объектах железнодорожного транспорта и в различных хозяйствах.

Так, в ходе работы над проектом «Цифровая железнодорожная станция» (ЦЖС), реализующем концепцию создания станции-автомата, потребовалось организовать функционал автоматизированной комплексной системы контроля магистральных локомотивов в движении на стационарных постах на подходах к станции Челябинск-Главный. Общие принципы построения системы и гибридная модель комплексирования диагностических признаков, реализованные в ППСС, позволили создать модульную Автоматизированную систему контроля локомотивов (АСКОЛ), реализующую функционал контроля токоприемников локомотивов, контроля сдвига бандажей колес, наличия трещин и обратного прогиба рессор локомотивов, диагностирования тормозных колодок, контроля дефектов поверхности катания и геометрии колес, выявления дефектов кузова, распознавания инвентарных номеров локомотивов.

В настоящее время система АСКОЛ смонтирована на подходе к станции Челябинск-Главный, ее ввод в эксплуатацию позволит, совместно с ППСС, решить задачу автоматизации диагностирования всех единиц подвижного состава в поездах, прибывающих на сортировочную станцию.

Еще одной важной задачей, которую требуется решать при переходе к технологии автоматизированной обработки поездов является задача контроля технического состояния грузовых вагонов в пунктах технической передачи вагонов с путей необщего на пути общего пользования. Эта задача решается АО «НИИАС» путем разработки и внедрения системы контроля грузовых вагонов в пунктах технической передачи (КПТП). В настоящий момент опытный образец системы готовится к вводу в опытную эксплуатацию на ст. Дубровка ЮУЖД.

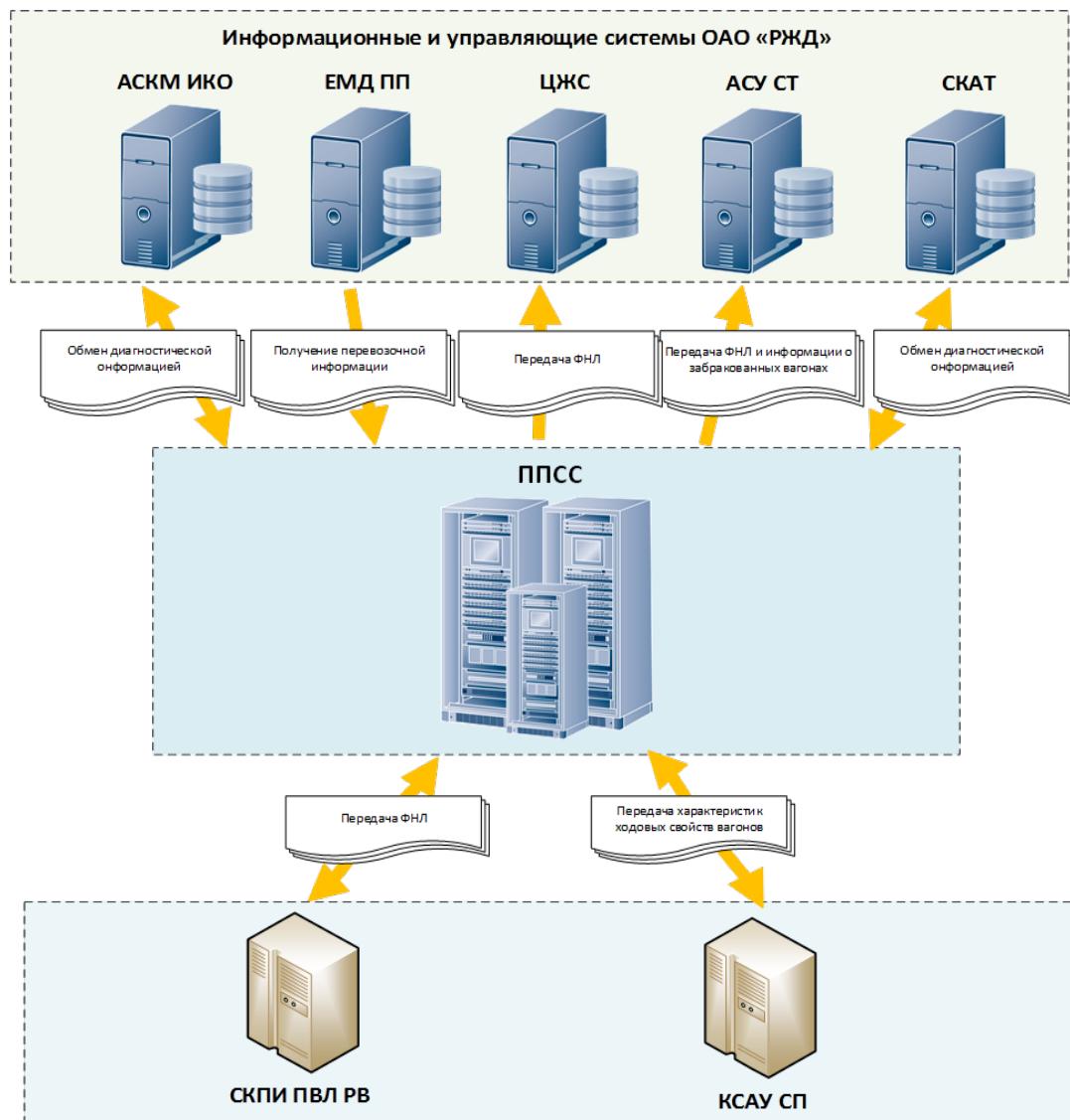


Рис. 10 – Схема информационного взаимодействия комплекса ППСС со смежными системами

Принцип контроля состояния вагонов, реализуемый в данной системе, основан как на контроле технического состояния вагонов при приеме с путей промышленных предприятий на пути общего пользования, так и на сравнении с их состоянием при передаче на пути необщего пользования. С этой целью измерительные участки системы КПТП организуются как перед входными, так и после выходных путей промышленных предприятий. Такой подход позволяет не только выявлять поврежденные вагоны, возвращаемые с территории промышленных предприятий на пути общего пользования, но и определять фактическое место повреждения.

В КПТП реализован функционал диагностирования грузовых вагонов по более, чем 57 диагностическим признакам (включая диагностирование зазоров в скользунах, выявление дефектов поверхности катания колесных дисков, контроль геометрии кузова и т.д.), что в два раза превышает объем диагностических параметров, проверяемых в ППСС.

Еще одним важным звеном в реализации задачи автоматизации процессов диагностирования подвижного состава является автоматизация приемки грузовых вагонов в эксплуатацию после плановых видов ремонта. Данный функционал решает разрабатываемая в настоящее время система контроля грузовых вагонов при выходе из ремонта (КПВР).

В рамках этого технологического процесса дополнительно приходится решать задачи контроля несоответствия комплектации вагонов данным информационных систем с обнаружением и распознаванием клейм на деталях грузовых вагонов, контроля состояния и измерения параметров компонентов вагона, находящихся в труднодоступных местах, контроля ходовой части, автосцепки и поглощающего аппарата, включая контроль соответствия сроков службы компонентов, надписей на вагоне и т.д.

4.5 Роботизация процессов диагностирования подвижного состава

Проведенный анализ показывает, что диагностирование ряда параметров узлов грузового вагона в движении с помощью методов, используемых в системах ППСС и КПТП невозможно или крайне затруднено.

Современный этап развития промышленности и транспорта характеризуется бурным развитием роботизации технологических процессов на базе машинного зрения и искусственного интеллекта. Безусловно, данное направление является крайне перспективным для использования при решении задачи перехода к безлюдным технологиям диагностирования железнодорожного подвижного состава.

В этой связи в ходе работы над проектом КПВР специалистами АО «НИИАС» активно прорабатывается использование для решения данной задачи биоморфных роботов, способных производить контроль и измерение требуемых параметров на неподвижных вагонах.

Робот-собака или робот на гусеничной платформе, оснащенные манипуляторами с установленными на них необходимыми регистрирующими и измерительными средствами, способны приблизиться на необходимое расстояние к объекту обследования, оптимально позиционироваться относительно него с помощью встроенной системы машинного зрения и произвести необходимые измерения (рисунок 11).

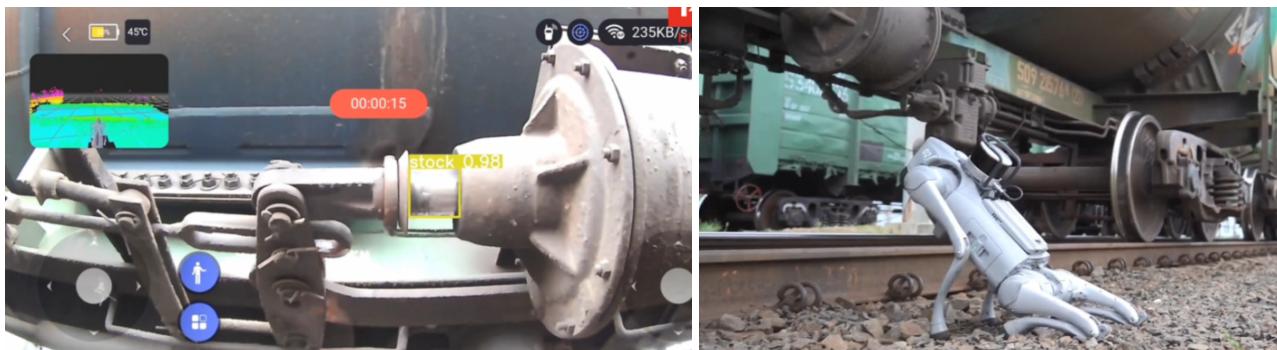


Рис. 11 – Исследовательские испытания экспериментального образца биоморфного робота, реализующего задачу обследования узлов грузового вагона

Развитие данного направления открывает широкие возможности для реализации технологий, основанных на скоординированных действиях нескольких функционально дополняющих друг друга роботов и роевых алгоритмах управления группами роботов.

Подходы, реализованные при разработке и внедрении таких комплексных диагностических систем, как ППСС, АСКОЛ, КПТП, КПВР, позволяют организовать взаимодействие этих систем между собой, а также с информационными системами АО «РЖД» верхнего уровня (в том числе ЕК АСУ В, ЕК АСУ Т, АСКМ ИКО, СКАТ и т.д.) и ремонтными предприятиями вагонного и локомотивного комплекса как на станционном, так и на дорожном уровне, и открывают путь к созданию станционных или распределенных региональных диагностических кластеров (хабов), основанных на автоматизации и роботизации технологических процессов диагностирования подвижного состава. Возможная схема взаимодействия объектов диагностического кластера представлена на рисунке 12.

Диагностические кластеры при данном подходе являются «входными воротами» и источником оперативных, полных и достоверных данных для управляющих станционных

комплексов Цифровая железнодорожная станция (ЦЖС), а в дальнейшем и полигонных комплексов управления, и фундаментом для трансформации технологии работы крупных железнодорожных станций. Они определяют дальнейший порядок переработки составов на сортировочной станции, исключают из переработки «больные» вагоны, оптимизируют процесс ремонта неисправных вагонов с учетом свободных ресурсов ремонтных предприятий и наличия запчастей, обеспечивают информацией робототехнические комплексы ЦЖС и системы горочной автоматики.

Информация, аккумулируемая в информационной системе регионального диагностического центра, позволит осуществлять консолидацию и нормализацию разнородных данных, а также выявлять закономерности между диагностическими данными, формируемыми различными диагностическими средствами и системами, и показателями эффективности перевозочного процесса на сети ОАО «РЖД».

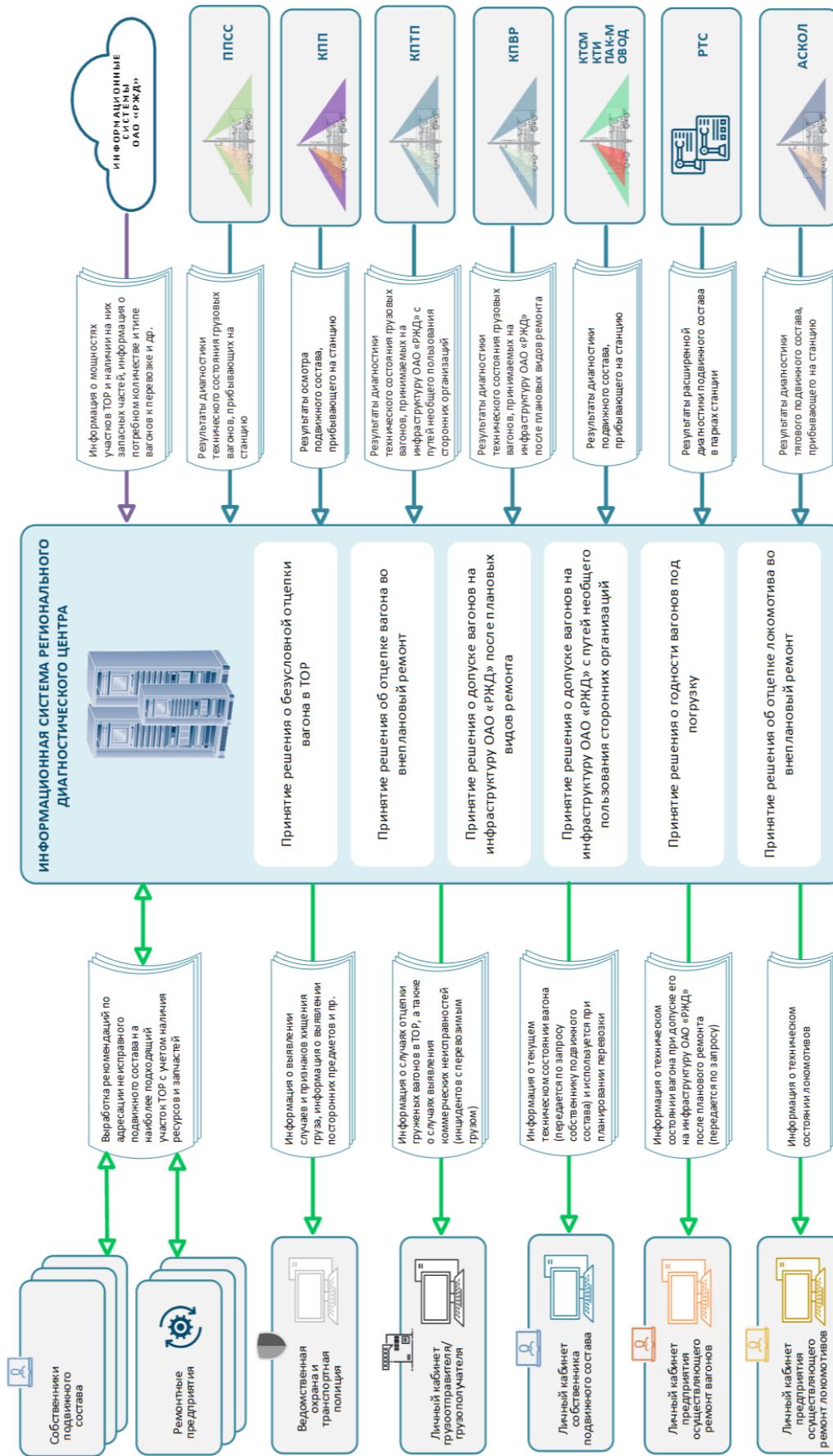


Рис. 12 – Схема взаимодействия объектов диагностического кластера

Заключение

В статье представлен комплексный подход к процессу диагностирования подвижного состава. Эксплуатация ППСС и внедрение комплексов и систем, являющихся дальнейшим его развитием, порождают дополнительные синергетические эффекты, способствующие повышению качества работы диагностической инфраструктуры и смежных систем.

Представлены примеры новых программно-технических средств, которые интегрируются в состав диагностических комплексов и позволяют расширить перечень диагностируемых параметров, повысить степень автоматизации технологических процессов, сократить издержки и время доставки грузов, перейти к предиктивной аналитике процессов.

Описаны подходы, позволяющие автоматизировать и роботизировать процессы диагностирования и браковки подвижного состава, объединять диагностические системы в диагностические кластеры и интегрировать их в перспективные станционные и полигонные цифровые информационно-управляющие комплексы.

Таблица 1 систематизирует ключевые аспекты зарубежных решений и разработок АО «НИИАС» в области диагностики подвижного состава.

На основе такого сравнительного анализа зарубежных решений и разработок АО «НИИАС» можно сделать несколько фундаментальных выводов.

Прежде всего, наблюдается значительная конвергенция технологических траекторий. АО «НИИАС» развивается в полном соответствии с общемировыми трендами, последовательно проходя путь от автоматизации отдельных процессов к созданию интегрированных интеллектуальных систем. ППСС в этом смысле воплощает в себе ключевые принципы современной диагностики: модульность, мультисенсорность и глубокую автоматизацию осмотра на ходу поезда.

При этом АО «НИИАС» демонстрирует ярко выраженную уникальность в области методологии обработки информации. Если мировой тренд сосредоточен на применении стандартных алгоритмов машинного обучения, то российский институт развивает собственную глубокую компетенцию в создании гибридных моделей анализа данных. Использование когнитивных сенсоров, гранулярных логических семантик и прагматики для комплексирования разнородных диагностических признаков представляет собой серьезное конкурентное преимущество и научный задел.

Таблица 1
Зарубежные решения и разработки АО «НИИАС»
в области диагностики подвижного состава

Аспект	Зарубежные решения (мировые тренды)	Разработки АО «НИИАС» (на примере ППСС и др.)
Эволюция	От одиночных датчиков → стационарные порталы → бортовые IRV-системы → роботизированные платформы.	ПАК → комплекс ППСС → системы АСКОЛ, КПТП, КПВР → роботизированные хабы.
Архитектура систем	Модульные путевые порталы, бортовые Instrumented Revenue Vehicles (IRV), мобильные роботы.	Модульная архитектура ППСС с единым модулем организации информационного взаимодействия (ЕМОИВ).
Ключевые технологии	Машинное зрение, лазерное сканирование, тепловизионный контроль, акустическая эмиссия, вибродиагностика, IoT, AI/ML.	Машинное зрение, лазерное сканирование (ЛКПС), тензометрия (СЖДК), акустический контроль (ПАК-М), 3D-сканирование, гибридная модель обработки данных.

Аспект	Зарубежные решения (мировые тренды)	Разработки АО «НИИАС» (на примере ППСС и др.)
Интеграция данных	Sensor fusion (ранняя, поздняя), облачные платформы, централизованные аналитические системы.	Гибридная модель комплексирования диагностических признаков с использованием гранулярных логических семантик и когнитивных сенсоров.
Предиктивная аналитика	Активное применение ML (CNN, RNN, Random Forest) для прогноза отказов, цифровые двойники.	Развитие предиктивной аналитики на основе трендов (ПАК-М), прогнозирование состояния на основе гибридной модели.
Автоматизация процессов	Автоматическая инспекция на ходу, системы типа PRISM (Китай), Automated System for Commercial Inspection.	Полная автоматизация технического и коммерческого осмотра в ППСС, интеграция со СКАТ и КСАУ СП.
Роботизация	Мобильные роботы-инспекторы для депо, дроны, автономные платформы (стадия пилотов и внедрения).	Экспериментальные биоморфные роботы для обследования неподвижных вагонов (КПВР), планы по созданию диагностических кластеров.
Метрологическое обеспечение	Соответствие международным стандартам (ISO, IEC, EN), сертификация по ASTM, квалификация персонала по ISO 9712.	Разработка и утверждение типов средств измерения (СЖДК.ВМ, «Техновизор», ЛКПС), патентование решений (воздушное лезвие).
Экономические модели	CAPEX/OPEX-модели, Monitoring-as-a-Service, партнерства, ROI-ориентированный подход.	Внедрение в рамках инвестиционных проектов («Цифровая железная дорога», «Цифровая железнодорожная станция»), оценка экономического эффекта через снижение отцепок.
Региональные особенности	Европа: стандартизация (ERTMS, TSI), IRV. Сев. Америка: wayside detectors, акцент на грузовые перевозки. Азия: масштабное внедрение (PRISM в Китае), высокая автоматизация.	Создание комплексов под специфику сети РЖД, внедрение на ключевых станциях (Челябинск-Главный, Входная), развитие для сортировочных станций и пунктов передачи.
Уровень внедрения	От пилотных проектов (роботы) до массового внедрения (путевые порталы, IRV в ЕС и США).	Серийное внедрение ППСС, ПАК-М на сети РЖД, опытная эксплуатация, КПТП, модуля ДКБ; эксперименты с роботами.
Безопасность и регуляторика	Соответствие директивам ЕС (ERA), FRA (США), стандартам AAR, требованиям RAMS (IEC 62278).	Разработка дополнительного критерия безопасности (ДКБ) для приоритетной браковки, интеграция с системами безопасности РЖД.
Перспективы	Цифровые двойники, автономные роботизированные комплексы, прескриптивная аналитика, глобальные платформы данных.	Создание диагностических кластеров (хабов), интеграция всех систем (ППСС, АСКОЛ, КПТП, КПВР) в единую цифровую экосистему станции.

Эта работа направлена не просто на обнаружение дефектов, а на формирование целостной оценки состояния и прогноза его изменения, что соответствует высшему уровню развития диагностических систем – предиктивно-прескриптивному.

Важнейшим отличием является глубокая практико-ориентированность и системность подхода АО «НИИАС». Разработки института изначально встроены в технологические процессы ОАО «РЖД» и нацелены на решение конкретных производственных задач – от автоматизации приемки на сортировочных станциях до контроля сохранности оборудования и приоритетной браковки вагонов. Создаваемая экосистема (ППСС, АСКОЛ, КПТП, КПВР) охватывает полный жизненный цикл взаимодействия с подвижным составом, что свидетельствует о стратегическом, а не точечном подходе к цифровизации. Высокая степень внедренческой готовности и тиражируемости решений на сети дорог подтверждает их эффективность и востребованность.

В то же время, как и в общемировой практике, направление роботизации физических процессов диагностики в АО «НИИАС» находится на стадии экспериментальной разработки. Работы над биоморфными роботами для обследования неподвижных вагонов соответствуют глобальному тренду, но пока отстают от уровня пилотных промышленных внедрений, наблюдаемых у некоторых зарубежных коллег. Это закономерно определяет данное направление как одно из ключевых для будущих исследований.

Резюмируя, можно сказать, что АО «НИИАС» не только успешно адаптирует глобальные технологические тренды к масштабам и специфике российской железнодорожной сети, но и ведет самостоятельную научно-техническую работу, создавая уникальные решения в области интеллектуального анализа данных и комплексной интеграции диагностики в управление перевозочным процессом. Это позволяет говорить о формировании собственного, конкурентоспособного технологического пути в области диагностики подвижного состава.

Список использованной литературы

1. Долгий А. И. Концептуальный подход к построению современной платформы управления перевозочным процессом в ОАО «РЖД» // Труды АО «НИИАС»: сб. ст. – М.: АО «НИИАС», 2021. – Т. 1, Вып. 11. – С. 9–31.
2. V. B. Degtyar, A. K. Dominin, A. A. Ermakov et al., *Automated System for Commercial Inspection of Trains and Carriages*. Pat. – (2016). [Online]. Available: <https://scispace.com/papers/automated-system-for-commercial-inspection-of-trains-and-3vp8x8t1lu>.
3. I. R. Buchin, A. A. Vasilkov, A. P. Noskov et al., *Integrated Station for Automated Reception and Diagnostics of Rolling Stock (PRISM)*. Pat. – (2020). [Online]. Available: <https://scispace.com/papers/integrated-station-for-automated-reception-and-diagnostics-4pdrxah5vq>.
4. S. Guo, S. Yin, and H. Xie, “A Distributed Measurement System to Detect Train Wheel Condition,” in *Proc. AINIT*, 2024. DOI: 10.1109/ainit61980.2024.10581416.
5. A. O. Kalabekov, O. A. Kalabekov, A. A. Nemtsev et al., *Automated System for Commercial Inspection of Trains and Cars with a Modular Architecture (ASKO PV 3.0)*. Pat. – (2020). [Online]. Available: <https://scispace.com/papers/automated-system-for-commercial-inspection-of-trains-and-4ki8mhs4my>.
6. M. Z. Shaikh, Z. Ahmed, B. S. Chowdhry et al., “State-of-the-Art Wayside Condition Monitoring Systems for Railway Wheels: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13122–13155, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3240167.
7. G. M. Azanaw, “Optimizing Railway Safety and Efficiency: A Comprehensive Review on Advancements in Out-of-Round Wheel Detection Systems,” *Int. J. Inventive Eng. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–15, 2025. DOI: 10.35940/ijies.a1324.12030325.
8. R. Ravitharan, “Safer Rail Operations: Reactive to Proactive Maintenance Using State-of-the-Art Automated In-service Vehicle-Track Condition Monitoring,” in *Proc. ICIRT*, 2018. DOI: 10.1109/ICIRT.2018.8641587.
9. S. Kolathayar, “Peer Review Report For: Digital Twins for Managing Railway Maintenance and Resilience [version 1; peer review: 2 approved],” *Open Res. Europe*, vol. 1, p. 91, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21956/openreseurope.14885.r27389>.
10. E. Tutumluer, S. Nazarian, I. Al-Qadi, and I. Qamhia, Eds., *Advances in Transportation Geotechnics IV: Proc. 4th Int. Conf. Transp. Geotechnics*, vol. 1. Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-77230-7.
11. J. Kim, C.-H. An, S. R. Lee, and J.-H. Han, “A Study on Necessity to Introduce Prognostic Maintenance of Rolling Stock,” in *Proc. Asia Pacific Conf. PHM Soc.*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.36001/phmap.2017.v1i1.2062>.

12. Хатламаджян А. Е., Лебедев А. И. Интегрированный пост автоматизированного приёма и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2019. – № 2 (58). – С. 9–13.
 13. Долгий А.И., Хатламаджян А. Е., Кудюкин В. В., Шаповалов В. В. Устройство определения параметров узлов подвижного состава: пат. на изобр. RU 2668774 C2; заявл. 16.12.2016; опубл. 02.10.2018. Бюл. № 28.
 14. Долгий А. И., Кудюкин В. В., Розенберг Е. Н., Розенберг И. Н., Хатламаджян А. Е., Шаповалов В. В. Система технического и коммерческого контроля состояния поездов: пат. на изобр. RU 2728202 C1; заявл. 02.12.2019; опубл. 28.07.2020. Бюл. № 21.
 15. Гуров Ю. В., Долгий А. И., Куценко А. Н., Пулин А. В., Хатламаджян А. Е., Шаповалов В. В. Способ акустического контроля состояния буксовых узлов движущегося поезда: пат. на изобр. RU 2781416 C1; заявл. 24.05.2022; опубл. 11.10.2022. Бюл. № 28.
 16. Андреев О. А., Долгий А. И., Пулин А. В., Слепых К. В., Хатламаджян А. Е., Шаповалов В. В., Шутько А. Н. Система контроля сохранности элементов подвижного состава: пат. на изобр. RU 2811171 C1; заявл. 17.11.2023; опубл. 11.01.2024. Бюл. № 1.
 17. Андреев О. А., Долгий А. И., Пулин А. В., Хатламаджян А. Е., Шаповалов В. В., Шутько А. Н. Система защиты бесконтактных датчиков технического контроля на железнодорожном пути: пат. на изобр. RU 2800881 C1; заявл. 11.04.2023; опубл. 31.07.2023. Бюл. № 22.
-