

УДК 629.432

Анализ новых технологий в эксплуатации и диагностике подвижного состава метрополитена

Нодиржон Турсунбаевич АБДУРАХМАНОВ

независимый исследователь

Ташкентский государственный транспортный университет

Узбекистан, Ташкент

nodirjon8828@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются современные тенденции и технологии в эксплуатации и диагностике подвижного состава метрополитена. Особое внимание уделено цифровым двойникам, системам предиктивного обслуживания, телематике и энергоэффективным решениям. На основе актуальных статистических данных показаны ключевые направления развития и их влияние на надежность работы метрополитена, аспекты обеспечения безопасности и устойчивости движения в метрополитене, надежности, непрерывности и безопасности электроподвижного состава.

Ключевые слова: метрополитен, эксплуатация, диагностика, цифровой двойник, предиктивное обслуживание, телематика, энергоэффективность.

Метрополитеннинг ҳаракатланувчи таркибини ишлатиш ва диагностика қилишда янги технологиялар таҳлили

Нодиржон Турсунбаевич АБДУРАХМАНОВ

Мустақил изланувчи

Тошкент давлат транспорт университети

Тошкент, Ўзбекистон

nodirjon8828@mail.ru

Аннотация

Ушбу мақолада метрополитеннинг ҳаракатланувчи таркибини ишлатиш ва диагностика қилишда янги технологиялар, тенденциялари муҳокама қилинади. Рақамли эгизаклар, предиктив тизимлар, телематика ва энергия тежайдиган ечимларга алоҳида эътибор берилади. Замонавий статистик маълумотларга асосланиб, ривожланишнинг асосий йўналишлари ва уларнинг метрополитен ҳаракатланувчи таркибини ишончилигига таъсири кўрсатилган. Метрода ҳаракат хавфсизлиги ва барқарорлигини, электр ҳаракатланувчи таркибнинг ишончилиги, узлуксизлиги ва хавфсизлигини таъминлаш масалалари таҳлил қилинган.

Таянч сўзлар: метрополитен, диагностика, рақамли эгизак, телематика, энергия самарадорлиги, электр ҳаракат таркиби, ҳаракат хавфсизлиги.

Современные метрополитены сталкиваются с необходимостью обеспечения высокой надежности, безопасности и энергоэффективности перевозок. Рост пассажиропотока, увеличение интенсивности движения и требования к снижению эксплуатационных затрат стимулируют переход к новым подходам в обслуживании подвижного состава, в частности цифровизации процессов эксплуатации и обслуживания.

На рубеже 2024–2025 гг. активно внедряются технологии цифровизации, предиктивной аналитики и автоматизированного контроля технического состояния. Особую актуальность приобретают системы Condition-Based Maintenance, цифровые двойники и wayside-инспекция, а также интеграция данных с системами сигнализации и энергоучета.

Традиционная система планово-предупредительных ремонтов уступает место методам обслуживания по состоянию. Операторы уходят от ППР по календарю к обслуживанию по состоянию (Condition-Based Maintenance) с машинным обучением: мониторят телеметрию тяговых приводов, редукторов, буксовых подшипников, дверных систем, HV-кабинетов и т. д.; данные идут в платформы класса Railigent X (Siemens) и HMAX (Hitachi) для прогноза отказов и планирования ремонтов. Пример – внедрение HMAX в метрополитене Копенгагена (датчики на поездах + интегрированная платформа). В сентябре 2024 года компания Hitachi Rail подписала контракт с Копенгагенским метрополитеном на поставку индивидуальной модели HMAX (Hyper Mobility Asset Expert). Это универсальная цифровая платформа, которая предоставляет транспортным операторам решения для повышения качества предоставляемых ими услуг. Решение HMAX основано на технологии искусственного интеллекта NVIDIA и помогает клиентам Hitachi Rail по всему миру повышать надежность, экономичность и доступность железных дорог. Решение, ускоренное с помощью Nvidia, будет передавать данные в режиме реального времени с путей и поездов на интегрированную платформу мониторинга инфраструктуры, что позволит

оптимизировать эксплуатацию и техническое обслуживание.

Hitachi Rail установит датчики на поездах метро и интегрирует данные в режиме реального времени в специальную версию платформы мониторинга инфраструктуры HMAX. Датчики будут включать в себя систему мониторинга вибрации и передавать данные о работе подсистем транспортных средств, состоянии тележек и колесных пар, а также о состоянии путей. Платформа позволяет собирать данные в режиме реального времени и использовать мощную технологию искусственного интеллекта для значительного повышения скорости, простоты и глубины анализа. Решение может обеспечить раннее выявление любых проблем, связанных с техническим обслуживанием и оптимизацией обслуживания.

Цель внедрения HMAX в Копенгагенском метрополитене –перейти от системы технического обслуживания, основанной на времени, к системе, основанной на состоянии. Например, использование датчиков для определения изменений в конструкции тележек поездов позволит проводить более раннее и менее затратное техническое обслуживание для поддержания работоспособности колесных пар. Кроме того, отказ от планового технического обслуживания может позволить поездам дольше работать без вмешательства и увеличить общий срок службы колесных пар. Данные в режиме реального времени также позволят платформе выявлять оптимизации на основе данных, которые могут повысить надежность, например, определять оптимальную скорость движения на протяжении всего пути. Использование сенсоров и алгоритмов машинного обучения позволяет прогнозировать вероятность отказа узлов и агрегатов, оптимизировать графики ремонтов и сокращать внеплановые простои [1].



Рисунок-1. Динамика рынка телематики (2025–2030 гг.)

Цифровые двойники подвижного состава

Digital Twin – цифровой двойник, обеспечивающий моделирование работы поезда и инфраструктуры. Его использование позволяет анализировать взаимодействие колесных пар, ходовой части и тягового оборудования. Внедрение цифровых моделей позволяет повысить точность прогнозирования и снизить износ элементов [2].

Интеграция поезд+путь: единые модели состояния колес/рельсов, энергии и торможения с обменом данными между бортом, депо и wayside-порталами. Такие функции, как управление парком подвижного состава, приложения для поездов, удаленное включение поездов и обновление программного обеспечения, системы технического обслуживания на основе искусственного интеллекта с Railigent X и многие другие, стали возможны благодаря стандартизированному подходу Siemens Mobility к экосистеме, который позволяет интегрировать данные из различных источников с помощью API. В результате некоторые технологии, используемые в новой городской электричке в Мюнхене, поставляются непосредственно компанией Siemens Mobility, а другие разрабатываются самим оператором. Siemens Mobility – это отдельно управляемая компания в составе Siemens AG, являющаяся лидером в области интеллектуальных транспортных решений. В число ее основных направлений входят подвижной состав, автоматизация и электрификация железных дорог, программное обеспечение.

Доля рынка Digital Twin для метро по регионам (2024 г.)

Регион	Доля рынка (%)
Европа	35
Азия	30
Северная Америка	25
Прочие	10

Распределение рынка digital twin (2024)



Рисунок-2. Структура внедрения цифровых двойников в метро

Wayside-инспекционные комплексы

Автоматизированные wayside(обочина)-порталы, оснащенные лазерными и видеосистемами, позволяют выявлять износ колесных пар, измерение износа гребня, поиск ползунов, дефектов букс, перегрев букс и повреждения кузова в реальном времени [3]. Искусственный интеллект обеспечивает высокую скорость обработки данных и исключает субъективные ошибки при осмотре. Решения уровня Veena Vision (с 2022 в составе Wabtec) и аналогичные комплексы располагаются на входах/выходах из депо и критических участках линий. Бесконтактные системы Veena Vision, основанные на машинном зрении, позволяют оценить состояние подвижного состава – от отдельных компонентов до всего состава в целом. Эти системы, установленные на железных дорогах, также обеспечивают сигнализацию, оповещения и отчеты в режиме реального времени, что позволяет управлять

техническим обслуживанием подвижного состава. Ключевым продуктом, разработанным и изготовленным компанией Veena Vision, является WheelView (вид колеса) – динамический профилограф колес, который можно установить на главной направляющей и который позволяет профилировать и измерять колеса на скорости до 130 км/ч. Полученный профиль и записанные измерения используются для выявления колес, не соответствующих отраслевым стандартам, и, что самое важное, эти данные можно использовать для профилактического обслуживания. В результате получаем парк колес, которые соответствуют минимальным стандартам, и можем планировать замену колес, чтобы сократить время простоя оборудования. Аналогичным оборудованием являются системы BrakeView (обзор тормоза) и TruckView (обзор тележки), которые выполняют функции измерения тормозных колодок (как колодочных, так и дисковых) и фрикционных накладок тележки или тележки с буксами. Для оптимизации процессов технического обслуживания также используются так называемые системы мониторинга поездов на путях (WTMS). Wayside Train Monitoring System (WTMS) – система мониторинга движения поездов, которая используется в железнодорожной отрасли.

Некоторые функции WTMS:

обеспечение безопасности. Система предоставляет информацию о движении поездов в реальном времени, что помогает предотвратить столкновения и сход с рельсов;

повышение эффективности. Мониторинг движения поездов позволяет оптимизировать расписание, сократить задержки и повысить общую эффективность работы железной дороги;

увеличение пропускной способности. WTMS позволяет увеличить трафик поездов на существующих линиях за счет более близкого расположения поездов и улучшения использования пропускной способности путей;

снижение затрат на обслуживание. WTMS может выявлять потенциальные проблемы с путями на ранних стадиях, что снижает необходимость в дорогостоящих ремонтных работах.

В Германии WTMS также называют системами мониторинга поездов на путях, в Швейцарии – центрами управления поездами (ZKE), в Австрии – контрольно-пропускными пунктами. Их задача – фиксировать техническое состояние проходящих поездов.

Интеграция диагностических данных с системами сигнализации

Современные системы управления поездом на основе связи СВТС (Communication-Based Train Control) не только обеспечивают управление движением, но и собирают эксплуатационные показатели: динамику движения, состояние дверных механизмов, отклонения в работе тяговых систем [4]. Их интеграция с сервисными платформами повышает качество прогнозирования отказов. Модернизации СВТС (напр., Берлин U5/U8) прямо привязаны к росту провозной способности и стабильности хода; данные СВТС становятся источником эксплуатационных KPI (headway, пробуксовка, захлопывания дверей), которые подмешивают в предиктивные модели по составам. Siemens Mobility впервые внедрит систему управления поездами на основе связи (Communications-Based Train Control System, СВТС) на линиях метро U5 и U8 в Берлине. Решение Trainguard MT СВТС обеспечит полуавтоматическую работу (GoA2: уровень автоматизации) на линии U5 к 2029 году и на линии U8 к 2032 году, увеличив пропускную способность этих линий примерно на 30 %.

Технология позволяет сократить интервалы движения до менее чем 100 секунд. Это технологическое достижение также значительно повысит надежность и пунктуальность двух линий метро. BVG U5 и U8 будут оснащены Trainguard MT общей протяженностью маршрута 40 км, который включает все 26 станций на линии U5 и 24 станции на линии U8. Когда СВТС будет установлен, полуавтоматическое управление позволит поездам непрерывно поддерживать связь с обочиной пути, двигаться автоматически с заданными интервалами безопасности, выполнять экстренное торможение, а также разгоняться и тормозить автономно. Теперь машинист может сосредоточиться на посадке и высадке пассажиров, визуально контролировать маршрут и принимать экстренные меры. Благодаря данным о

местоположении и скорости поезда в режиме реального времени на линии может курсировать больше поездов с меньшим интервалом.

Энергоэффективность и учет потребления

Сертифицированные системы учета энергии (EN 50463) и интеллектуальные системы вождения (DAS – Driver Advisory Systems) позволяют повысить эффективность использования рекуперативного торможения и снизить расходы на тяговую энергию [5]. Активно внедряется сертифицированный учет тяговой энергии по EN 50463 и Driver Advisory/eco-driving на основе телеметрии. Для метрополитена это означает прямое снижение ОПЕХ и доказуемый учет рекуперации.

Таблица 2

Эффект от внедрения AI в обслуживание метрополитена

Показатель	Эффект (%)
Снижение затрат	15
Снижение энергопотребления	10

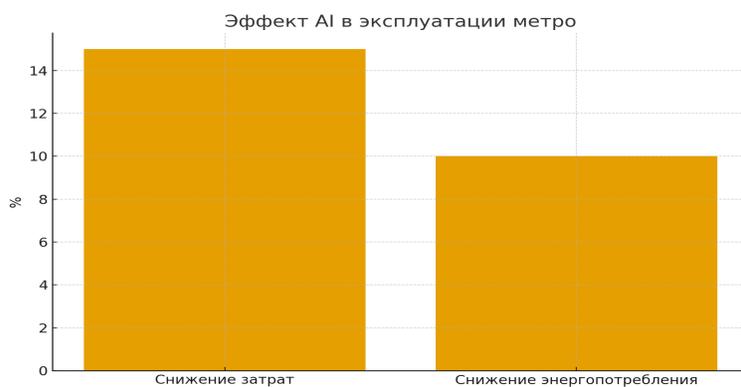


Рисунок-3. Энергоэффективность при использовании AI в метро

Кибербезопасность подвижного состава

Рост цифровизации требует защиты критической инфраструктуры от киберугроз. В 2025 году основными нормативами являются CLC/TS 50701 и IEC 62443, которые устанавливают требования к защите систем диагностики, связи и управления [6].

В этом документе железнодорожным операторам, системным интеграторам и поставщикам продукции предлагаются рекомендации и спецификации по управлению кибербезопасностью в контексте процесса жизненного цикла RAMS, описанного в стандарте EN 50126.

RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety – «Безотказность, Готовность, Ремонтопригодность, Безопасность») – методология комплексного управления надежностью и безопасностью объектов железнодорожного транспорта.

Некоторые задачи RAMS на транспорте:

- оперативный учет данных по нарушениям безопасности движения поездов;
- контроль работы ревизоров;
- учет и контроль устранения отказов технических средств;
- контроль проведения осмотров станций;
- контроль генеральных осмотров пути;
- учет нарушений, допущенных работниками хозяйства перевозок;
- контроль оснащенности путей станций и прилегающих перегонов;
- оценка показателей надежности объектов инфраструктуры и рисков, связанных с безопасностью движения.

Стандарт Евросоюза CLC/TS 50701:2023 «Железнодорожные приложения – Кибербезопасность» направлен на внедрение последовательного подхода к управлению безопасностью железнодорожных систем, относится к сфере связи, сигнализации и обработки данных, а также к подвижному составу и стационарным установкам. В этом документе рассматриваются не требования к функциональной безопасности железнодорожных систем, а требования, связанные с угрозами и уязвимостями в системе безопасности, для устранения которых необходимо

принимать конкретные меры и управлять ими на протяжении всего жизненного цикла. Цель этого документа – гарантировать, что характеристики RAMS железнодорожных систем/подсистем/оборудования не будут снижены, утрачены или скомпрометированы в случае кибератак. Модели безопасности, концепции и процесс оценки рисков, описанные в этом документе, основаны на стандартах серии IEC/EN IEC 62443. Документ соответствует требованиям к управлению безопасностью, изложенным в стандарте IEC 62443 2 1, который, в свою очередь, основан на стандартах EN ISO/IEC 27001 и EN ISO 27002.

Интеллектуальные депо и телекоммуникации

Использование сетей LTE/5G позволяет интегрировать телеметрию поездов с информационными системами депо. Это формирует концепцию «цифрового депо», где техническое обслуживание максимально автоматизировано и поддерживается аналитикой в реальном времени [7]. Депо – это сложный механизм для обслуживания вагонов метро, который требует от всех участников максимально высокой концентрации. Важно, с одной стороны, повысить коэффициент готовности к эксплуатации – основной показатель эффективности сервисного обслуживания вагонов метро, а с другой – обеспечить высокое качество ремонта, которое позволяет увеличить сроки эксплуатации и безаварийной работы. Цифровые решения дают возможность повысить производительность труда на 30% и сократить временные затраты на производственные операции. Данные о состоянии вагонов метро и проводимых с ними манипуляциях поступают в ситуационный центр. Специалисты отслеживают все процессы в режиме реального времени на мобильном устройстве с помощью специальных приложений, которые предусмотрены для каждого этапа ремонта и обслуживания вагонов метро.

Это, безусловно, уменьшает временные и трудовые затраты на сбор данных о состоянии машины и повышает объективность полученной информации. Такая трансформация позволяет эффективно применять инструменты цифровизации для контроля качества и повышает производительность и безопасности работ, а предиктивная аналитика снижает издержки и устраняет неплановый выход

оборудования из строя. Все решения в совокупности обеспечивают содержание парка вагонов метро в оптимальном состоянии.

Развитие технологий эксплуатации и диагностики подвижного состава метрополитена связано с цифровизацией и внедрением предиктивных систем. Рассмотренные примеры показывают, что цифровые двойники, телематика и энергоэффективные решения уже сегодня обеспечивают снижение затрат и повышение надежности работы метрополитена.

Новые технологии в эксплуатации и диагностике подвижного состава метрополитена формируют переход к модели интеллектуальной эксплуатации, основанной на предиктивной аналитике, цифровых двойниках и интеграции эксплуатационных данных. Основными трендами 2025 года являются:

- переход к обслуживанию по состоянию;
- внедрение цифровых двойников;
- развитие автоматизированных wayside-систем;
- интеграция диагностики с системами СВТС;
- повышение энергоэффективности и учет потребления;
- рост требований к кибербезопасности;
- создание «цифровых депо».

Реализация данных решений позволит повысить надежность перевозок, сократить затраты и обеспечить устойчивое развитие метрополитенов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Siemens Mobility. Railigent X: Digital solutions for predictive maintenance. – Берлин: Siemens, 2024.
2. Hitachi Rail. HMAX predictive maintenance platform. – Лондон: Hitachi, 2023.
3. Wabtec Corp. Wayside monitoring systems overview. – Питтсбург: Wabtec, 2023.
4. UITP. СВТС deployment and integration with asset management. – Брюссель: UITP, 2024.

5. European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50463-1:2017+A1:2024. Railway applications – Energy measurement. – Брюссель: CENELEC, 2024.
6. CENELEC. CLC/TS 50701:2021. Railway applications – Cybersecurity. – Брюссель: CENELEC, 2021.
7. IEC. IEC 62443-2-1:2024. Industrial communication networks – Cybersecurity management systems. – Женева: IEC, 2024.
8. Beena Vision. Automated inspection systems for rail vehicles. – Атланта: Beena Vision Systems, 2023.
9. Alstom. Smart depot solutions for metro systems. – Париж: Alstom, 2024.
10. InnoTrans. Innovations in railway diagnostics and monitoring. – Берлин: InnoTrans, 2024.