

УДК 629.42-192

Разработка комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств

М. С. Васильевская, А. Е. Цаплин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Васильевская М. С., Цаплин А. Е.* Разработка комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 133–144. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-133-144

Аннотация

Цель: Разработать концепцию комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств; рассмотреть вопрос о необходимости внедрения современных методов неразрушающего контроля, таких как тепловизионный контроль и технологии искусственного интеллекта (ИИ), для диагностики подвижного состава метрополитена; показать преимущества этих методов по сравнению с традиционными подходами, а также обосновать их применение для повышения безопасности и эффективности эксплуатации подвижного состава. **Методы:** Анализ существующих методов неразрушающего контроля (магнитопорошковый, ультразвуковой, вихретоковый, капиллярный) и их ограничений. Изучение современных технологий, включая тепловизионный контроль и системы машинного зрения с искусственным интеллектом. **Результаты:** Выявлены недостатки традиционных методов неразрушающего контроля, такие как ограниченная применимость для немагнитных материалов, необходимость контактных зон и влияние помех. Показаны преимущества тепловизионного контроля и технологий ИИ, включая дистанционность, высокую точность, возможность раннего обнаружения дефектов и автоматизацию процессов. Предложен комплексный подход к диагностике подвижного состава, сочетающий тепловизионные и электронные средства. Разработана структурная схема диагностического комплекса для электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств. **Практическая значимость:** Внедрение современных методов контроля позволит перейти от планово-предупредительного ремонта к предиктивному обслуживанию, снизит затраты на ремонт, уменьшит количество простоев и повысит безопасность движения. Предложенный диагностический комплекс может быть адаптирован для других депо и транспортных систем.

Ключевые слова: Неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, искусственный интеллект, машинное зрение, диагностика подвижного состава, безопасность движения, предиктивное обслуживание.

Введение

Современные системы неразрушающего контроля играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности эксплуатации подвижного состава метрополитена. Традиционные методы, такие как магнитопорошковый, ультразвуковой, вихретоковый и капиллярный контроль, обладают рядом преимуществ,

включая простоту использования, доступность и точность локализации дефектов. Однако эти методы имеют существенные ограничения, связанные с материалом исследуемых объектов, сложностью доступа к зонам контроля, а также необходимостью предварительной подготовки поверхностей.

В условиях роста пассажиропотока и увеличения нагрузки на инфраструктуру метрополитена особую актуальность приобретают инновационные технологии, такие как тепловизионный контроль и системы диагностики на основе искусственного интеллекта. Эти методы позволяют не только выявлять дефекты на ранних стадиях, но и прогнозировать возможные отказы оборудования, минимизируя простои и снижая затраты на обслуживание.

Традиционные методы неразрушающего контроля

Традиционные методы неразрушающего контроля постоянно адаптируются к современным требованиям и непрерывно совершенствуются, разрабатываются и внедряются новые подходы в магнитопорошковом, ультразвуковом, вихретоковом, капиллярном контроле при диагностировании подвижного состава метрополитена. Однако при очевидных преимуществах традиционных методов неразрушающего контроля, а именно: невысокой стоимости, простоте использования, выявлении внутренних поверхностных и подповерхностных дефектов, точности локализации дефектов, а также сохранении целостности и дальнейшей пригодности для эксплуатации проверяемых деталей и узлов подвижного состава, — существует ряд проблем, которые накладывают ограничения использования указанных методов контроля.

Так, магнитопорошковый метод не может применяться для диагностики деталей и узлов из немагнитных материалов (алюминий, медь и пр.); в случаях, когда на поверхности не обеспечена необходимая зона для нанесения магнитного индикатора или если зона контроля недоступна для осмотра; с несплошностями, плоскости которых параллельны контролируемой поверхности или составляют с ней и направлением намагничивающего поля угол менее 30° ; а также для диагностики сварных швов, выполненных немагнитным электродом. При применении магнитопорошкового метода необходимо предварительно удалить лакокрасочное или другое защитное покрытие при большой его толщине, что не всегда представляется возможным без демонтажа проверяемого объекта. При проведении ультразвукового контроля для передачи ультразвуковых волн необходимо наличие контактных зон; применение данного метода затрудняется при сложных формах дефектов, а также существует реальная проблема шума и помех, которая связана с искажением эхосигналов, что снижает вероятность обнаружения дефектов и увеличивает погрешность измерений.

В современных условиях активно развиваются технологии, основанные на получении информации о проверяемых объектах по их собственному

инфракрасному излучению (тепловизионный контроль), электронные технологии с использованием искусственного интеллекта, которые дают возможность повысить уровень безопасности движения поездов, помогают своевременно анализировать неисправности подвижного состава и выявлять предотказные состояния, а также совершенствуют и оптимизируют существующую систему диагностики.

Рассмотрим более подробно характеристики технических возможностей указанных перспективных методов контроля, область и условия их применения.

Тепловизионный контроль

Инфракрасное излучение, испускаемое телами, температура которых превышает температуру абсолютного нуля, содержит информацию о составляющих эти тела веществах, предыстории тел и их расположении. Восприятие этой информации с помощью системы обнаружения и соответствующая ее обработка позволяют определить и проконтролировать некоторые параметры, которые трудно или невозможно измерить непосредственно [1].

Инфракрасное излучение — это электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого излучения и коротковолновым радиоизлучением с длинами волн λ от около 0,74 мкм до около 1–2 мм. Оно относится к оптическому излучению, однако, в отличие от видимого излучения, не воспринимается человеческим глазом. Взаимодействуя с поверхностью тел, оно нагревает их, поэтому часто его называют тепловым излучением. Условно область инфракрасного излучения разделяют на ближнюю ($\lambda = 0,74–2,5$ мкм), среднюю (2,5–50 мкм) и далекую (50–2000 мкм). Это невидимое глазом излучение с помощью оптико-электронной системы обнаружения преобразуется в информацию, которая, в свою очередь, уже воспринимается нашими органами чувств. Устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности — тепловизор — дистанционно оценивает температурные поля, на его дисплее распределение температуры отображается как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета.

В настоящее время тепловизионный контроль активно внедряется и применяется в железнодорожном хозяйстве всех стран мира [2].

Тепловизоры в локомотивных депо применяются как диагностический комплекс при проведении технического обслуживания и текущего ремонта подвижного состава; для контроля теплового состояния оборудования на технологических участках, испытательных станциях, котельных установках и пр.

Внедрение тепловизионного контроля как наиболее перспективного и эффективного направления развития в диагностике электроподвижного состава позволит Петербургскому метрополитену значительно повысить безопасность движения, что является одной из важнейших задач перевозочного процесса.

Электронные технологии с использованием искусственного интеллекта

Благодаря стремительному развитию науки и технологий искусственный интеллект (ИИ) применяется в большом количестве областей, в том числе и на железной дороге. Современные технологии машинного обучения и анализа больших данных позволяют не только автоматизировать процессы диагностики подвижного состава, но и прогнозировать поломки, минимизировать простои и снижать затраты на обслуживание [3].

Основные технологии ИИ для диагностики [3]:

- сенсоры и Интернет вещей (IoT) — датчики, установленные на критически важных узлах подвижного состава (оси, колеса, тормоза, двигатели), собирают данные о вибрации, температуре, износе и других параметрах;
- компьютерное (так называемое «машинное») зрение — камеры и лазерные сканеры фиксируют мельчайшие дефекты рельсов, колесных пар и контактной сети; машинное зрение позволяет находить трещины, износ и другие повреждения, которые трудно выявить визуально;
- анализ больших данных (Big Data) — алгоритмы обрабатывают информацию, поступающую с датчиков, выявляя аномалии, указывающие на потенциальные неисправности.

Машинное зрение является подразделом инженерии [4], а именно общим набором методов и алгоритмов, позволяющих компьютерам «видеть» при помощи цифровых камер. Машинное зрение как отрасль ИИ использует технологические системы, заменяющие человеческий глаз для измерений и оценки. Эти системы преобразуют захваченные изображения в цифровые сигналы, которые передаются в специализированные системы обработки изображений, далее данные анализируются с учетом таких характеристик, как яркость, цвет и распределение пикселей. Эти цифровые сигналы подвергаются дополнительной обработке, что позволяет получить результаты классификации [5].

Внедрение технологии машинного зрения в процесс диагностирования подвижного состава Петербургского метрополитена позволит повысить уровень безопасности движения поездов, поможет своевременно анализировать неисправности подвижного состава и выявлять предотказные состояния, усовершенствует существующую систему диагностики в части повышения точности обнаружения дефектов, а также в перспективе позволит перейти на иные принципы обслуживания подвижного состава — обслуживание по состоянию.

Комплекс для диагностирования подвижного состава электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств

В рамках государственной программы г. Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга» в 2029 году планируется продлить Невско-Василеостровскую линию от станции «Беговая» до станции «Каменка» с промежуточной станцией «Богатырская» (рис. 1). Предполагается, что максимальная пропускная способность Линии 3 сможет достигать до 40 пар поездов в час, а пассажиропоток составит около 1,3 тысячи человек за сутки.



Рис. 1. Перспективный план развития Петербургского метрополитена

Появление новых станций метро, безусловно, заметно улучшит качество жизни в районе — сократится время доступа в центр города и другие районы на общественном транспорте, появятся удобные альтернативные способы доступа до работы или учебы. Также продление линии метро позволит снизить нагрузку на наземный общественный транспорт.

Однако с открытием новых станций метро остро встает вопрос обслуживания и ремонта подвижного состава Линии 3. Строительство дополнительного депо в ближайшие годы не запланировано, вся нагрузка на обслуживание, ремонт и эксплуатацию подвижного состава Линии 3 ляжет на электродепо «Невское». Предусмотренная в Петербургском метрополитене система видов планового технического обслуживания и ремонта, проводимого периодически, связана с наработкой (пробегом) вагонов. Таким образом, с продлением Линии 3 электропоезда будут быстрее достигать установленных значений пробегов, увеличится количество проводимого технического обслуживания и ремонта вагонов подвижного состава. А для составов типа 81-722/723/724 и их модификаций, которым перед выдачей на линию согласно действующей на метрополитене нормативно-технической документации, выполняется подготовка к работе на линии со сроком действия данных работ 20 ± 4 часа, что в условиях продления линии окажется невыполнимой задачей.

По статистике, на сегодняшний день работниками участка внепланового обслуживания и ремонта электродепо «Невское» осматривается порядка 4000 вагонов в месяц. Согласно Перечню работ по подготовке состава к работе на линии, состоящего из вагонов моделей 81-722, 81-723, 81-724 и их модификаций (через каждые 20 ± 4 часа) [6], после захода состава с линии в депо производится контроль (на ощупь) нагрева подшипниковых узлов букс, тяговых редукторов, тяговых двигателей, муфт ЗК. Узлы с повышенной температурой контролируются пирометром. Обращается внимание на отсутствие следов повышенного нагрева подшипников (обгорание смазки, краски), перегрева поверхности катания колес (обгорание краски обода, цвета побежалости). Оборудование, доступное для осмотра сбоку и снизу, осматривается дважды (то есть сбоку и снизу). Визуальному контролю на отсутствие наружных механических повреждений, внешних дефектов, отсутствие трещин на металле и сварных швах и прочих дефектов подлежат следующие детали и узлы:

- подвесное оборудование на раме кузова вагона;
- колесные пары;
- редукторы;
- зубчатая муфта;
- тормозные блоки тележек;
- токоприемники и срывной клапан;
- рамы тележек и тяги связи кузова с тележкой;
- буксовое и центральное подвешивание;
- гасители колебаний;
- токоотводы;
- асинхронный тяговый привод (АТП);
- автосцепки и их составные части и детали;
- кузов и установленное на нем оборудование (только сбоку, сверху не представляется возможным).

Активно обсуждаются пути решения проблемы увеличения количества ежедневных осмотров, планового и внепланового обслуживания подвижного состава. Первый путь — пересмотр нормативно-технической документации, которая на сегодняшний день не отражает реальную картину потребностей эксплуатации и обслуживания подвижного состава, и, как следствие, сокращение количества ежедневных осмотров или даже отказ от них. Однако такой подход может привести к снижению возможности выявления предотказных состояний, возможности своевременно анализировать и устранять неисправности подвижного состава.

Наиболее эффективным в данном случае представляется путь автоматизации технических средств контроля [7] с применением современных перспективных технологий диагностирования подвижного состава метрополитена с целью перехода от планово-предупредительного ремонта к предиктивному (прогнозирующему) техническому обслуживанию.

Использование тепловизионных и электронных средств контроля предлагается реализовать в комплексе для диагностирования подвижного состава электродепо «Невское». Структурная схема диагностического комплекса (ДК) представлена на рис. 2.

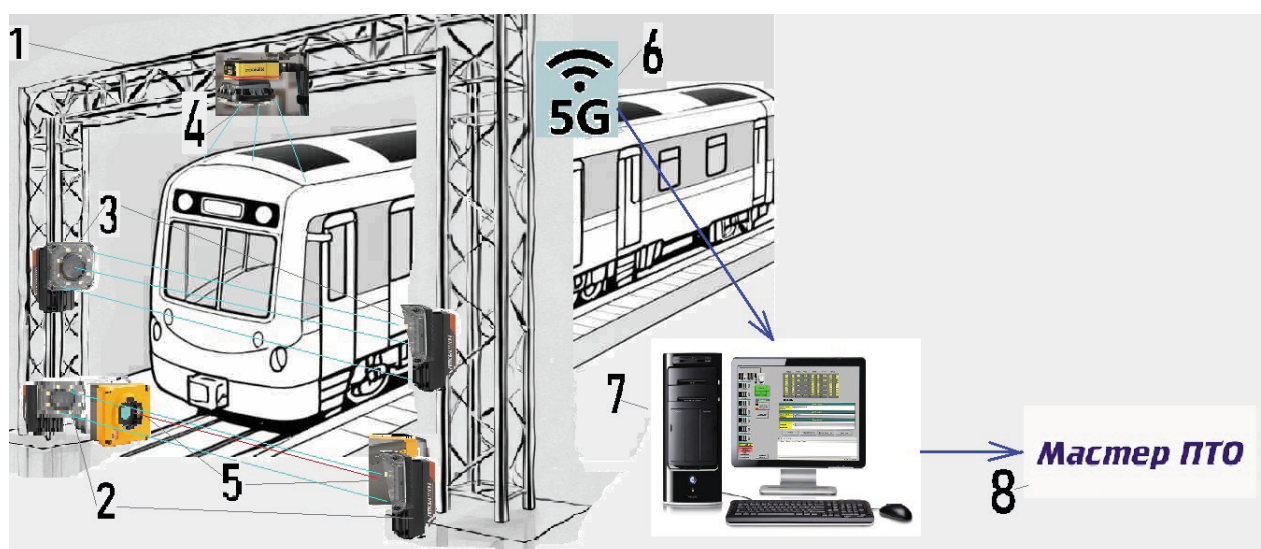


Рис. 2. Диагностический комплекс электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств:

- 1 — металлическая рампа; 2, 3, 4 — высокоскоростные камеры машинного зрения; 5 — стационарные тепловизоры; 6 — сеть 5G; 7 — ПЭВМ оператора; 8 — участок внепланового обслуживания и ремонта депо

Диагностический комплекс представляет собой П-образную металлическую рампу 1 по очертанию габарита вагона, установленную за въездными воротами со стороны депо, с размещенными на ней двумя высокоскоростными камерами 2 для сбора изображений нижней части электропоезда (ходовая часть и подвагонное оборудование), двумя аналогичными умными камерами 3 на высоте 2 м

для сбора изображений элементов кузова сбоку (двери, окна, автосцепки, межвагонные предохранительные устройства), одной высокоскоростной камерой 4 для сбора изображений кузова сверху и оборудования, установленного на крыше вагона (система вентиляции, антенны и пр.), а также тепловизоров 5 для получения термограммы механической части электроподвижного состава.

Во время захода состава с линии в депо блок модуля изображения камер и тепловизоры диагностического комплекса активируются, полученные данные отправляются в облако через сеть 5G 6, обрабатываются с помощью машинного зрения. Автоматически выявленные дефекты передаются на ПЭВМ оператора 7, который к окончанию захода и постановке состава на деповской путь уже имеет точный «диагноз» неисправностей деталей и узлов подвижного состава. Данная информация передается мастеру участка внепланового обслуживания и ремонта 8 для принятия решения по организации дальнейшего ремонта и эксплуатации вагона (состава).

Использование технологии передачи данных в 5G выбрано в данном случае за более скоростную обработку и передачу данных, что позволит эффективно использовать сеть для поставленных задач. 5G — это стандарт мобильной связи, который обеспечивает более высокую скорость передачи данных, минимальные задержки и возможность одновременного подключения большего числа устройств по сравнению с предыдущими поколениями. Как новый стандарт связи начиная с 2019 года 5G активно развивается в мегаполисах по всему миру. В России полноценные сети 5G начнут разворачивать в крупных городах в 2026 году, а в остальных населенных пунктах — в начале 2030-х. Основное покрытие на сегодняшний день обеспечивает оператор МТС, и оно доступно в отдельных районах Москвы и Санкт-Петербурга.

Внедрение ДК с применением перспективных технологий диагностирования позволит с высокой точностью обнаруживать трещины, износ и другие повреждения, которые трудно выявить визуально при помощи традиционных методов неразрушающего контроля [8].

Благодаря своевременному выявлению неисправностей уменьшится количество простоев подвижного состава, снизятся затраты на ремонт за счет своевременной замены деталей до их критического износа. Автоматизация процесса решит проблему ежедневного осмотра составов перед выдачей на линию, устранит человеческие ошибки в проведении контроля (фактор утомляемости, ночная работа, ограниченность возможностей глаза при осмотре быстро перемещающихся или удаленных объектов в условиях недостаточной освещенности), снизит использование бумажной документации. Использование машинного зрения позволит проводить полноценный контроль подвижного состава (снизу, сбоку, сверху) без ограничений по доступности к местам диагностирования [9].

Интеграция искусственного интеллекта в процесс анализа эксплуатационных данных в конечном итоге повысит безопасность движения за счет снижения риска внезапных отказов оборудования.

Переход от планово-предупредительного ремонта к предиктивному (прогнозирующему) техническому обслуживанию — перспективная задача применения искусственного интеллекта. В отличие от традиционного планово-предупредительного ремонта, ИИ-алгоритмы позволяют определять необходимость ремонта не по графику, а на основе реальных данных о состоянии оборудования [10].

Заключение

Современные методы неразрушающего контроля, такие как тепловизионный контроль и электронные технологии с использованием искусственного интеллекта, открывают новые возможности для повышения эффективности и безопасности диагностики подвижного состава метрополитена. Внедрение этих перспективных технологий позволяет преодолеть ограничения традиционных методов, обеспечивая более точное, оперативное и надежное выявление дефектов на ранних стадиях их развития.

Тепловизионный контроль, основанный на анализе инфракрасного излучения, предоставляет возможность дистанционно оценивать тепловое состояние оборудования механической части подвижного состава, выявлять дефекты и предотвращать потенциальные отказы.

Электронные технологии с искусственным интеллектом, такие как машинное зрение, позволяют автоматизировать процессы контроля, минимизировать человеческий фактор и перейти к предиктивному обслуживанию. Это не только снижает затраты на ремонт и простои, но и значительно повышает безопасность движения за счет прогнозирования и предотвращения критических неисправностей.

Реализация диагностического комплекса в электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств станет важным шагом в модернизации системы технического обслуживания Петербургского метрополитена. Интеграция этих технологий позволит перейти от традиционного планово-предупредительного обслуживания и ремонта к современным подходам, что в конечном итоге обеспечит более надежную и безопасную эксплуатацию подвижного состава.

Таким образом, сочетание тепловизионного контроля и искусственного интеллекта представляет собой перспективное направление развития диагностики, способное решить актуальные проблемы транспортной отрасли и повысить качество обслуживания пассажиров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. / Ж. Госсорг. — М.: Мир, 1988. — 416 с.
2. Cyberpedia: информационный ресурс. — URL: <https://cyberpedia.su/2x3375.html> (дата обращения: 01.05.2025).
3. РОССТИП: портал. — URL: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyuayet-tekhnicheskoe-obsluzhivanie-zhd-transporta> (дата обращение: 09.05.2025).
4. Цаплин А. Е. Диагностика узлов механической части подвижного состава с применением комплекса машинного зрения / А. Е. Цаплин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2011. — № 2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-uzlov-mehanicheckoy-chasti-podvizhnogo-sostava-s-primeneniem-kompleksa-mashinnogo-zreniya> (дата обращения: 10.05.2025).
5. Шэнь Ц. Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития / Ц. Шэнь, А. Е. Цаплин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 31–44. — DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-31-44.
6. Перечень работ по подготовке состава к работе на линии, состоящего из вагонов моделей 81-722, 81-723, 81-724 и их модификаций (через каждые 20 ± 4 часа), утв. заместителем начальника метрополитена — начальником Службы подвижного состава Управления метрополитена, 2019. — 11 с.
7. Алексеев А. А. Идентификация и диагностика систем: учебник для студентов высших учебных заведений / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопапов. — М.: Академия, 2009. — 351 с.
8. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 2005. — 656 с.
9. Цаплин А. Е. Совершенствование методов контроля деталей механической части электроподвижного состава применением оптико-электронных средств: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / А. Е. Цаплин; Петербургский государственный университет путей сообщения — СПб., 2011. — 18 с.
10. Зеленченко А. П. Диагностические комплексы электрического подвижного состава: учебное пособие / А. П. Зеленченко, Д. В. Федоров. — М.: ФГБОУ «Учебно-методических центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014 — 112 с.

Дата поступления: 21.04.2025

Решение о публикации: 03.06.2025

Контактная информация:

ВАСИЛЬЕВСКАЯ Мария Сергеевна — магистрант; vas5maria@yandex.ru

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — канд. техн. наук, доц.; tsaplin.alexey@mail.ru

The Development of a Diagnostics Complex for the Metro Electric Rolling Stock Using Thermal Imaging and Electronic Devices

M. S. Vasil'evskaya, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vasil'evskaya M. S., Tsaplin A. E. The Development of a Diagnostics Complex for the Metro Electric Rolling Stock Using Thermal Imaging and Electronic Devices. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 133–144. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-133-144

Summary

Purpose: To develop a concept for a diagnostics complex for the electric rolling stock in the Metro system using thermal imaging and electronic means. To investigate the implementation of modern non-destructive testing methods, including thermal imaging and artificial intelligence (AI) technologies for the diagnostics of the Metro electric rolling stock. To demonstrate the advantages of the aforementioned methods in comparison with traditional approaches. To justify their application for improving the rolling stock operation safety and efficiency. **Methods:** Analysis of the contemporary methodologies employed in the field of non-destructive testing, such as magnetic powder, ultrasonic, eddy current, and capillary testing, and their limitations. The investigation of modern technologies, including thermal imaging and machine vision systems with artificial intelligence. **Results:** The limitations of conventional non-destructive testing methodologies have been elucidated, encompassing their restricted applicability to non-magnetic materials, the necessity for contact zones, and the susceptibility to interference. The merits of thermal imaging and AI technologies have been demonstrated, including remote accessibility, enhanced precision, the capacity for early defect detection, and the automation of processes. A comprehensive approach to the rolling stock diagnostics has been proposed, combining thermal imaging and electronic devices. A block diagram of a diagnostics complex for Nevskoe electric train depot using thermal imaging and electronic devices has been developed. **Practical significance:** The implementation of contemporary control methodologies has the potential to transform the paradigm of maintenance practices, transitioning from scheduled preventive measures to a predictive maintenance model. This transition is expected to engender a range of benefits, including reduced expenditure on repairs, minimized downtime, and enhanced traffic safety. The proposed diagnostic system has the capacity to be adapted to other depots and transport systems.

Keywords: Non-destructive testing, thermal imaging, artificial intelligence, machine vision, rolling stock diagnostics, traffic safety, predictive maintenance.

References

1. Gossorg Zh. *Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primenenie: Per. s frants.* [Infrared thermography. Fundamentals, technique, application: Trans. from French]. Moscow: Mir Publ., 1988, 416 p. (In Russian)
2. *Cyberpedia: informatsionnyy resurs* [Cyberpedia: information resource]. Available at: <https://cyberpedia.su/2x3375.html> (accessed: May 1, 2025). (In Russian)
3. ROSSTIP: portal. Available at: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyaet-tekhnicheskoe-obslyuzhivanie-zhd-transporta> (accessed: May 1, 2025).
4. Tsaplin A. E. Diagnostika uzlov mekhanicheskoy chasti podvizhnogo sostava s primeneniem kompleksa mashinnogo zreniya [Diagnostics of units of the mechanical part of the rolling stock using a machine vision complex]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings

of Petersburg Transport University]. 2011, Iss. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-uzlov-mehchanicheskoy-chasti-podvizhnogo-sostava-s-primeneniem-kompleksa-mashinnogo-zreniya> (accessed: May 10, 2025). (In Russian)

5. Shen' Ts., Tsaplin A. E. *Primenenie tekhnologii nerazrushayushchego kontrolya na podvizhnom sostave i perspektivy ee razvitiya* [Application of non-destructive testing technology on rolling stock and prospects for its development]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results]. 2025, Iss. 1, pp. 31–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-31-44. (In Russian)

6. *Perechen' rabot po podgotovke sostava k rabote na linii, sostoyashchego iz vagonov modeley 81-722, 81-723, 81-724 i ikh modifikatsiy (cherez kazhdye 20±4 chasa), utv. zamestitelem nachal'nika metropolitena — nachal'nikom Sluzhby podvizhnogo sostava Upravleniya metropolitena, 2019* [List of works on preparing a train for operation on the line, consisting of cars of models 81-722, 81-723, 81-724 and their modifications (every 20±4 hours), approved. by the Deputy Head of the Metro - Head of the Rolling Stock Service of the Metro Administration, 2019]. 11 p. (In Russian)

7. Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu. *Identifikatsiya i diagnostika sistem: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Identification and diagnostics of systems: a textbook for students of higher educational institutions]. Moscow: Akademiya Publ., 2009, 351 p. (In Russian)

8. Klyuev V. V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik, 3-e izd.* [Non-destructive testing and diagnostics: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005, 656 p. (In Russian)

9. Tsaplin A. E. *Sovershenstvovanie metodov kontrolya detaley mekhanicheskoy chasti elektropodvizhnogo sostava primeneniem optiko-elektronnykh sredstv: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07* [Improving the methods of testing the mechanical parts of electric rolling stock using optical-electronic means: author's abstract. diss. ... candidate of technical sciences: 05.22.07]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2011, 18 p. (In Russian)

10. Zelenchenko A. P., Fedorov D. V. *Diagnosticheskie komplekсы elektricheskogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Diagnostic complexes of electric rolling stock: a tutorial]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskikh tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2014, 112 p. (In Russian)

Received: April 21, 2025

Accepted: June 03, 2025

Author's information:

Maria S. VASIL'EVSKAYA — Master's Degree Student; vas5maria@yandex.ru

Alexey E. TSAPLIN — PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru