

УДК 629.42-192(075)

Интеллектуализация технологий динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая

Цзеи Шэнь, А. Е. Цаплин

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

Для цитирования: Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Интеллектуализация технологий динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 133–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-133-148

Аннотация

Цель: выявить закономерности и основные направления интеллектуализации технологий динамического мониторинга подвижного состава Китая, определить место системы 5T в переходе от периодического статического контроля к непрерывной оценке технического состояния в процессе эксплуатации, а также установить роль TFDS в интеграции динамического мониторинга с технологиями машинного зрения и интеллектуального распознавания. **Методы:** выполнен аналитический обзор научно-технической литературы и нормативно-технических материалов, посвященных неразрушающему контролю, динамическому мониторингу и интеллектуальной диагностике железнодорожного подвижного состава. Источники систематизированы по объектам контроля, контролируемым параметрам, физическим принципам диагностики и уровню интеллектуализации обработки данных. На этой основе рассмотрены структура и функциональные особенности комплекса 5T, взаимосвязь его подсистем, а также особенности внедрения методов машинного зрения, многоканального слияния данных и интеллектуального распознавания, прежде всего в системах типа TFDS. **Результаты:** показано, что на железных дорогах Китая сформировалась многоуровневая система динамического мониторинга подвижного состава, ядром которой является комплекс 5T. Установлено, что развитие данных технологий характеризуется переходом от автономного контроля отдельных параметров и ручной интерпретации результатов к сетевой интеграции подсистем, многоканальному анализу информации и автоматизированному распознаванию аномалий. Выявлено, что наиболее выраженные признаки интеллектуализации наблюдаются в визуальных диагностических системах, прежде всего в TFDS, где обработка изображений становится основой обнаружения дефектов, оценки состояния узлов и снижения трудоемкости анализа эксплуатационных данных. Показана перспективность сопряжения TFDS с данными других подсистем 5T для повышения достоверности диагностики, снижения числа ложных срабатываний и перехода от выявления дефектов к прогнозированию рисков. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют уточнить место динамического мониторинга в общей системе контроля технического состояния подвижного состава и определить перспективные направления его интеграции с методами неразрушающего контроля механической части и машинного зрения. Работа может быть использована как теоретическая и обзорно-аналитическая основа для исследований в области эксплуатационной безопасности, диагностики технического состояния и интеллектуального технического обслуживания подвижного состава.

Ключевые слова: подвижной состав железных дорог, динамический мониторинг, система 5T, машинное зрение, интеллектуальная диагностика, неразрушающий контроль

Введение

Неразрушающий контроль (НК) является важной технической основой диагностики состояния подвижного состава железных дорог, поскольку обеспечивает выявление дефектов ответственных элементов, уточнение характера повреждений

и обоснование ремонтных решений. Вместе с тем традиционные методы НК в основном реализуются в условиях остановочного осмотра, деповского контроля и ремонтных операций, то есть преимущественно в статической среде. Поэтому, несмотря на высокую диагностическую ценность, неразрушающий контроль сам по себе не обеспечивает непрерывное получение информации о состоянии подвижного состава в процессе движения и своевременное выявление развития эксплуатационных аномалий [1, 2].

С развитием железных дорог Китая в условиях роста скоростей движения, осевых нагрузок и интенсивности эксплуатации возрастают требования к онлайн-контролю состояния подвижного состава, непрерывному мониторингу и раннему предупреждению отказов. В этих условиях статический контроль должен дополняться средствами динамического мониторинга. Наиболее системное развитие такой подход получил в Китае в рамках системы мониторинга эксплуатационной безопасности 5T, в базовую конфигурацию которой входят:

- 1) THDS — система интеллектуального контроля температуры букс;
- 2) TPDS — придорожная система динамического мониторинга ходовых качеств подвижного состава;
- 3) TADS — придорожная акустическая система диагностики неисправностей подшипников качения;
- 4) TFDS — система динамического визуального контроля неисправностей грузовых вагонов;
- 5) TCDS — система мониторинга безопасности эксплуатационного состояния пассажирских вагонов.

Нормативные и научно-технические источники рассматривают 5T не как набор разрозненных средств контроля, а как интегрированный контур сбора, передачи и анализа диагностической информации [3–5].

Среди подсистем 5T особое место занимает TFDS, поскольку именно она непосредственно связывает динамический мониторинг с технологиями машинного зрения. В отличие от традиционного визуального осмотра машинное зрение позволяет преобразовывать графическую информацию в формализованные признаки, пригодные для автоматизированного распознавания дефектов, накопления данных и централизованной интерпретации результатов. Современные исследования показывают, что развитие TFDS связано с системным использованием массивов изображений, созданием специализированных платформ обработки данных и внедрением интеллектуальных алгоритмов распознавания, что делает данную подсистему наиболее показательным направлением интеграции динамического мониторинга с методами искусственного интеллекта [6, 7].

В настоящей статье система 5T рассматривается не только как совокупность технических средств контроля, но и как этап эволюции диагностики подвижного состава железных дорог — от статического контроля к динамическому, от

изолированных подсистем к интегрированной архитектуре, от регистрации отдельных отклонений к интеллектуальной интерпретации данных. Такой подход позволяет рассматривать TFDS не изолированно, а в более широком контексте взаимодействия динамического мониторинга, неразрушающего контроля и машинного зрения. В связи с этим целью настоящей статьи является систематизация структуры и направлений интеллектуализации технологий динамического мониторинга железнодорожного подвижного состава Китая с акцентом на систему 5T, роль TFDS и перспективы сопряжения динамического мониторинга с методами неразрушающего контроля и машинного зрения [8].

Роль неразрушающего контроля в диагностике подвижного состава железных дорог

Неразрушающий контроль является одной из базовых технических основ диагностики подвижного состава железных дорог. Его значение определяется возможностью выявления дефектов ответственных деталей и узлов без нарушения их работоспособности, что особенно важно для элементов, непосредственно влияющих на безопасность движения. При эксплуатации железнодорожного транспорта методы неразрушающего контроля применяются прежде всего к осям и колесным центрам колесных пар, деталям автосцепного устройства, рамам тележек, сварным соединениям и ряду элементов буксовых узлов. Наибольшее распространение получили ультразвуковой, магнитопорошковый, вихретоковый и визуально-измерительный методы контроля [9].

С функциональной точки зрения неразрушающий контроль наиболее эффективен в тех случаях, когда требуется детальная оценка состояния конкретного элемента. Его сильные стороны заключаются в высокой степени локализации повреждения, возможности выявления поверхностных, приповерхностных и в ряде случаев внутренних дефектов, а также в использовании результатов контроля как основы для технического решения о допуске детали к эксплуатации, ремонту или выбраковке. Именно поэтому НК сохраняет ключевое значение в деповской и ремонтной практике. Вместе с тем результаты НК используются не только для отбраковки, но и для анализа надежности элементов подвижного состава, что расширяет его роль в системе технической диагностики [10, 11].

В то же время возможности неразрушающего контроля в задачах непрерывного наблюдения за состоянием подвижного состава в процессе движения ограничены. Даже при наличии безразборных технологий НК в большинстве случаев остается связанным с регламентированными осмотрами, ремонтным циклом и стационарными условиями проведения контроля. Следовательно, НК является незаменимым средством детальной дефектоскопии на уровне отдельной детали или узла, но сам по себе не обеспечивает непрерывного получения диагностической информации о поведении объекта в реальных эксплуатационных режимах.

Именно это обстоятельство и обуславливает необходимость дополнения НК технологиями динамического мониторинга, ориентированными на контроль состояния подвижного состава в движении [12].

Динамический мониторинг как функциональное дополнение неразрушающего контроля

В отличие от классического неразрушающего контроля динамический мониторинг ориентирован не на локальное подтверждение дефекта в стационарных условиях, а на получение диагностической информации непосредственно в процессе движения поезда. В методическом отношении он использует сигналы различной физической природы: тепловые, силовые, виброакустические, оптические и бортовые. Однако его сущность определяется не столько набором измеряемых параметров, сколько выполняемыми диагностическими функциями. К их числу относятся раннее выявление аномалий, непрерывный эксплуатационный скрининг и формирование оснований для последующего адресного углубленного контроля. Именно в этом смысле динамический мониторинг становится важным элементом перехода от планово-предупредительной системы обслуживания к системе обслуживания по фактическому состоянию [13, 14].

Диагностическая значимость динамического мониторинга обусловлена тем, что многие эксплуатационные дефекты проявляются прежде всего в условиях движения через сопутствующие эффекты взаимодействия подвижного состава и пути. К ним относятся ударные воздействия в контакте «колесо — рельс», изменение вибрационной и акустической картины, локальный перегрев узлов, а также визуально фиксируемые отклонения состояния элементов. Поэтому ряд неисправностей может быть своевременно выявлен не только по геометрическим признакам после остановки поезда, но и по их динамическим проявлениям в реальном эксплуатационном режиме. Этим объясняется развитие стационарных путевых комплексов, автоматически передающих результаты контроля в систему технического обслуживания и ремонта [15–17].

В такой логике на железных дорогах Китая был сформирован комплекс мониторинга эксплуатационной безопасности 5T. Его базовые подсистемы — THDS, TPDS, TADS, TFDS и TCDS — объединяют различные каналы восприятия состояния подвижного состава и образуют интегрированный контур динамического контроля, передачи данных и централизованного анализа диагностической информации. Нормативное развитие 5T показывает, что динамический мониторинг уже рассматривается не как совокупность локальных измерительных средств, а как системная платформа непрерывного наблюдения, раннего предупреждения и информационной поддержки эксплуатационных решений [3, 5].

Следовательно, динамический мониторинг не заменяет неразрушающий контроль, а выполняет по отношению к нему иную диагностическую функцию.

Если НК ориентирован на подтверждение дефекта, его локализацию и детальную оценку состояния конкретной детали, то динамический мониторинг служит инструментом первичного отбора, эксплуатационного скрининга и приоритизации объектов для последующего адресного НК. Именно такая функциональная связка «динамический мониторинг → углубленный контроль» создает основу для перехода к интеллектуальным системам поддержки решений, в которых результаты контроля на ходу поезда используются для целенаправленного назначения дополнительных диагностических процедур.

Система 5T как основа динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая

Формирование системы 5T на железных дорогах Китая отражает переход от локальных и разрозненных средств контроля к интегрированной системе динамического мониторинга эксплуатационного состояния подвижного состава. В базовую конфигурацию 5T входят THDS, TPDS, TADS, TFDS и TCDS, объединенные в единый контур сбора, передачи и анализа диагностической информации. В этом смысле 5T следует рассматривать не как простую совокупность отдельных технических средств, а как многоуровневую архитектуру контроля, обеспечивающую непрерывное наблюдение за состоянием подвижного состава в процессе эксплуатации [3, 18]. Структурная схема системы приведена на рис. 1, а сопоставление функций ее подсистем — в таблице.



Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга безопасности эксплуатации подвижного состава 5T

ТАБЛИЦА. Сравнение подсистем 5Т

Подсистема	Объект контроля	Физический признак	Тип данных	Диагностическая задача	Уровень интеллектуализации
THDS	Буксовые узлы, колеса	Тепловой	Температурные сигналы	Выявление перегрева букс и колес	Базовый
TPDS	Система «экипаж — путь», колесные пары	Динамический	Параметры колесно-рельсового взаимодействия	Оценка ходовых качеств и выявление динамических отклонений	Средний
TADS	Подшипники качения	Акустический	Акустические сигналы	Раннее выявление дефектов подшипников	Средний
TFDS	Узлы и детали грузовых вагонов	Визуальный	Изображения	Выявление неисправностей и распознавание дефектов	Высокий
TCDS	Пассажирский подвижной состав	Комплексный бортовой	Бортовая телеметрия	Непрерывный контроль эксплуатационной безопасности	Средний

Подсистемы 5Т различаются по объектам контроля и используемым физическим признакам. THDS реализует тепловой контроль буксовых узлов, TPDS предназначена для регистрации параметров динамического взаимодействия системы «экипаж — путь», TADS ориентирована на акустическую диагностику неисправностей подшипников качения, TFDS обеспечивает визуальный контроль технического состояния грузовых вагонов, а TCDS выполняет функции мониторинга безопасности пассажирского подвижного состава. Благодаря такой структуре система 5Т формирует многоканальную диагностическую среду, в которой тепловые, динамические, акустические, визуальные и бортовые данные не дублируют друг друга, а описывают состояние подвижного состава с разных сторон [18].

Именно различие физической природы, структуры и степени формализуемости этих данных обуславливает неравномерность интеллектуализации отдельных подсистем 5Т. Анализ литературы показывает, что для THDS, TADS и TCDS в первую очередь подтверждены функции мониторинга, сигнализации и централизованной передачи диагностической информации [18], тогда как TPDS в большей степени развивается в направлении анализа эксплуатационных массивов данных, выявления закономерностей отказов и поддержки принятия решений. Наиболее высокая готовность к внедрению методов машинного зрения и глубокого обучения характерна для визуальных подсистем, поскольку изображения естественным

образом допускают построение стандартизованных датасетов, разметку объектов и обучение моделей распознавания. В этом отношении TFDS занимает особое место внутри 5Т.

Ценность 5Т состоит не только в параллельном наблюдении за разными признаками состояния, но и в возможности их взаимной верификации. Повышение достоверности тревожных сообщений достигается за счет совместного использования данных нескольких подсистем и технической истории объекта [18]. Следовательно, системная организация 5Т создает предпосылки не просто для накопления информации, а для перехода к комплексной интерпретации сигналов, корреляции тревожных признаков и снижению доли ложных срабатываний. Именно эта особенность делает 5Т не только эксплуатационной, но и методологической основой дальнейшего применения алгоритмов искусственного интеллекта [19].

Наиболее показательное направление такого перехода демонстрирует TFDS. Развитие данной подсистемы связано уже не только с получением изображений движущегося вагона, но и с построением стандартизованных массивов данных, созданием специализированных платформ обработки изображений и внедрением интеллектуальных схем распознавания [20]. Поэтому TFDS выступает не просто одной из подсистем 5Т, а ключевым звеном, через которое динамический мониторинг соединяется с машинным зрением и последующими AI-решениями. Такой опыт непосредственно подводит к дальнейшему рассмотрению TFDS как визуально-диагностической подсистемы с наибольшим потенциалом интеллектуального развития и соответствует общей тенденции перехода от периодического контроля к диагностике состояния подвижного состава при его эксплуатации.

TFDS как визуально-диагностическая подсистема динамического мониторинга

Среди подсистем 5Т особое место занимает TFDS, поскольку именно она реализует визуальный канал динамического мониторинга грузовых вагонов. TFDS использует придорожные высокоскоростные средства получения изображений для регистрации нижней части и боковых поверхностей вагона в процессе движения и является важной составной частью системы контроля эксплуатационной безопасности. В отличие от THDS, TPDS и TADS, основанных соответственно на тепловых, динамических и акустических признаках, TFDS работает с оптической информацией и тем самым непосредственно связывает динамический мониторинг с задачами машинного зрения [21].

Такое положение делает TFDS наиболее естественной точкой интеграции динамического мониторинга с методами машинного зрения. В технической литературе России системы технического зрения рассматривались как средство диагностики узлов механической части подвижного состава и регистрации железнодорожных составов, а в современных обзорах по computer vision for railways

подчеркивается, что именно придорожные камеры, автоматизированный анализ изображений и дистанционная визуальная инспекция становятся одним из ключевых направлений развития диагностики железных дорог [22–24]. Вместе с тем для TFDS характерны и специфические ограничения: качество изображений зависит от освещенности, загрязнения оптики, ракурса съемки, вибрационного воздействия и неоднородности фона, поэтому визуальный канал следует рассматривать не как универсальную замену другим средствам мониторинга, а как наиболее развитое их дополнение.

Практическая значимость TFDS определяется масштабом ее применения. По данным последних исследований, система уже развернута более чем на 540 пунктах сети железных дорог Китая, а среднесуточный объем контроля достигает около 950 тыс. грузовых вагонов [21]. При таком объеме ручной просмотр изображений становится не только трудоемким, но и уязвимым к утомлению оператора и неравномерности качества оценки. Именно поэтому развитие TFDS следует связывать не просто с накоплением изображений, а с формированием централизованной визуально-данной инфраструктуры, пригодной для стандартизированной обработки и последующего интеллектуального анализа.

Ключевым условием перехода TFDS к машинному зрению стало построение стандартизированной базы визуальных данных. В исследовании по созданию TFDS-датасета показано, что исходные массивы изображений характеризуются неоднородностью форматов, существенным разбросом качества, дисбалансом классов неисправностей и недостатками разметки. Для устранения этих ограничений предложена последовательность «доступ к данным — очистка — классификация — балансировка — разметка — разделение на выборки». В процедуре классификации и арбитража были задействованы 36 профессиональных динамических осмотрщиков, использованы исторические данные за 10 лет эксплуатации, а итоговая номенклатура охватила 367 типов неисправностей категорий А, В и С. Сформированный набор данных включил 18 350 размеченных изображений и создал основу для перехода от визуального наблюдения к обучаемым алгоритмам распознавания [20].

Алгоритмические исследования подтверждают принципиальную совместимость TFDS с методами машинного зрения. В одной из работ предложена схема распознавания, включающая предварительное улучшение изображений, бинаризацию методом Оцу, многомасштабное извлечение признаков и SE-модуль; авторы сообщают о среднем показателе обнаружения 96,7% [8]. Вместе с тем такие результаты следует трактовать осторожно: метрики отдельных моделей зависят от структуры выборки, протокола валидации, качества разметки и условий съемки, поэтому их не следует отождествлять с универсальной эксплуатационной эффективностью всей системы TFDS. На рис. 2 представлена укрупненная схема процесса интеллектуального распознавания неисправностей в системе TFDS,

включающая оценку качества изображений, выделение узлов и деталей, распознавание неисправностей, анализ особых аномалий и комплексную интерпретацию результатов на уровне вагона.



Рис. 2. Схема процесса интеллектуального распознавания неисправностей в системе TFDS

Таким образом, TFDS следует рассматривать как наиболее развитый, но не исчерпывающий пример интеллектуализации динамического мониторинга в системе 5Т. Ее особое значение определяется тем, что визуальные данные одновременно пригодны и для машинной обработки, и для экспертной проверки результатов, что делает TFDS естественной основой для модели «AI + экспертная верификация». В этом качестве TFDS выступает связующим звеном между системой 5Т, технологиями машинного зрения и последующим этапом внедрения более сложных AI-схем, включая архитектуры типа «центр обучения — периферийный вывод» [8, 20].

Интеграция системы 5Т с технологиями искусственного интеллекта

Интеграция системы 5Т с технологиями искусственного интеллекта отражает переход от регистрации отдельных тревожных признаков к их совместному анализу в едином диагностическом контуре. Нормативное развитие 5Т закрепляет ее как сетевую архитектуру мониторинга, объединяющую тепловой, динамический, акустический, визуальный и бортовой каналы контроля, тогда как в исходных работах по 5Т повышение достоверности тревожных сообщений связывается с использованием данных нескольких подсистем и технической истории объекта [5, 18].

В методическом отношении развитие AI-компонента в системе 5T может быть представлено как последовательность уровней: сигнализация, автоматическое выявление аномалий, классификация дефектов, сопоставление данных различных подсистем и предиктивная диагностика. При этом отдельные подсистемы находятся на разных стадиях такого перехода. Для THDS, TADS и TCDS в литературе прежде всего подтверждены функции мониторинга и оповещения, тогда как TPDS уже развивается в направлении анализа больших массивов эксплуатационных данных, оценки технического состояния вагонов и выявления закономерностей отказов [19]. Визуальные подсистемы в целом обладают более высокой пригодностью к использованию методов машинного зрения, поскольку их данные легче стандартизируются, размечаются и используются для обучения моделей [8, 25].

На уровне всей системы 5T наиболее перспективным представляется объединение разнородных диагностических признаков в единой логике принятия решений. Так, THDS может фиксировать тепловую аномалию буксового узла, TADS — уточнять вероятность повреждения по акустическим признакам, TPDS — отражать изменение динамического поведения экипажа, TFDS — давать визуальное подтверждение внешних признаков, а TCDS и иные бортовые данные — добавлять эксплуатационный контекст. В этом случае задача искусственного интеллекта состоит не только в распознавании отдельных дефектов, но и в ранжировании тревожных сообщений, снижении числа ложных срабатываний и формировании оснований для последующего адресного контроля и ремонта [5, 13, 18, 25].

Наиболее проработанная инженерная модель такого подхода пока представлена в TFDS. В решении на базе больших моделей реализована распределенная схема «центр обучения — периферийный вывод», дополненная экспертными правилами и режимом «AI-контроль + ручная верификация». Тем самым TFDS демонстрирует не просто применение отдельного алгоритма, а практическую организационную модель внедрения искусственного интеллекта в систему динамического мониторинга, ориентированную на повышение скорости обработки данных и устойчивости диагностических решений [8].

Таким образом, текущее состояние интеграции 5T и искусственного интеллекта наиболее корректно описывается моделью «автоматизированное выявление — экспертная верификация — последующее решение по контролю и ремонту». Дальнейшее развитие данной архитектуры должно быть связано с унификацией данных различных подсистем 5T, построением механизмов взаимной верификации тревожных сообщений и переходом к предиктивной оценке риска в рамках состояния-ориентированного обслуживания [19].

Заключение

Проведенный анализ показывает, что развитие диагностики железнодорожного подвижного состава в Китае связано с переходом от преимущественно

статических форм контроля к многоуровневому динамическому мониторингу в эксплуатационных условиях. При этом неразрушающий контроль сохраняет базовое значение как средство подтверждения, локализации и уточнения дефектов на уровне отдельных деталей и узлов, тогда как динамический мониторинг обеспечивает раннее выявление аномалий и непрерывный эксплуатационный скрининг в процессе движения. Следовательно, эти два направления следует рассматривать не как конкурирующие, а как взаимодополняющие компоненты единой системы диагностики.

В данной логике система 5Т выступает не просто совокупностью отдельных подсистем, а технологическим каркасом интеграции теплового, динамического, акустического, визуального и бортового каналов наблюдения. Среди подсистем 5Т наиболее показательной в отношении интеллектуализации является TFDS, поскольку именно визуальные данные оказались наиболее подготовленными к стандартизации, накоплению и алгоритмической обработке. Тем самым TFDS выступает связующим звеном между динамическим мониторингом, машинным зрением и прикладным использованием технологий искусственного интеллекта.

В более широком плане интеллектуализацию 5Т следует связывать не с автономным внедрением отдельных AI-моделей в изолированные подсистемы, а с формированием многоуровневой системы поддержки решений на основе совместного использования данных различных контуров 5Т и результатов неразрушающего контроля. В исследовательском и практическом отношении наиболее перспективными направлениями представляются унификация данных подсистем 5Т, разработка методов межсистемной верификации тревожных сообщений, применение интеллектуальных средств поддержки персонала и переход к предиктивной оценке риска в рамках обслуживания по фактическому состоянию.

Список источников

1. A Review on Condition Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock / P. Kundu [et al.] // Proceedings of the PHM Society European Conference. 2018. Vol. 13. Pp. 1–15.
2. Kostrzewski M., Mel'nik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review // Sensors. 2021. Vol. 21 (14). P. 4710.
3. Китайская железнодорожная корпорация. Правила технического обслуживания и ремонта оборудования системы мониторинга безопасности эксплуатации подвижного состава (5Т) = 车辆运行安全监控系统设备检修维护管理规则: TG/CL 210–2015. Пекин, 2015. [На кит. яз.]
4. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5t) System / Jiang Hui [et al.] // Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2009. No. 1. Pp. 1–6.
5. Государственное железнодорожное управление КНР. Государственное железнодорожное управление КНР опубликовало два отраслевых стандарта, включая «Нормы проектирования

системы мониторинга безопасности эксплуатации железнодорожных вагонов». 04.01.2022. URL: <https://www.nra.gov.cn/> (дата обращения: 20.01.2026).

6. A Survey of the Application of Machine Vision in Rail Transit System Inspection / Wei Xiukun [et al.] // *Control and Decision*. 2021. Vol. 36, no. 2. Pp. 257–282.

7. TFDS Truck Fault Image Application System / Wang Deming [et al.] // *Railway Computer Application*, 2024. Vol. 33 (9). Pp. 59–67.

8. Mu Xin. Intelligent Recognition of TFDS Faults Based on Large Model Technology // *Railway Computer Application*. 2025. Vol. 34 (11). Pp. 8–14.

9. Пудовиков С. А. Безразборная технология ультразвукового контроля осей колесных пар при ремонте подвижного состава // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2005. № 1. С. 108–113.

10. Коростелева Е. Ю., Толмачев И. И. Применение магнитопорошкового и вихретокового методов контроля для деталей и узлов локомотивов и моторвагонного подвижного состава // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2008. Т. 312, № 2S. С. 264–267.

11. Ахмеджанов Р. А., Макарович В. В., Родченко Л. А. О совершенствовании ультразвукового контроля оси колесной пары вагона // *Известия Транссиба*. 2014. № 2 (18). С. 7–18.

12. Воробьев А. А., Карпов В. А. Анализ надежности подвижного состава по результатам неразрушающего контроля // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2015. Т. 3, № 1 (80). С. 65–70.

13. Марюхненко В. С., Пультяков А. В. Особенности контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда // *Автоматика на транспорте*. 2016. Т. 2, № 2. С. 272–287.

14. Давыдов Ю. А., Пляскин А. К., Кушнирук А. С. Контроль фактического технического состояния локомотивов на основе диагностики // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 3 (59). С. 38–47.

15. Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда / Ю. П. Бороненко [и др.] // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2020. Т. 17, № 3. С. 324–344.

16. Мониторинг технического состояния грузовых вагонов на ходу поезда / В. В. Попов [и др.] // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2021. № 1–2 (92–93). С. 52–56.

17. Баранов Л. А., Бурченков В. В. Технология мониторинга подвижного состава на основе дистанционного акустического зондирования // *Автоматика на транспорте*. 2022. Т. 8, № 1. С. 90–100.

18. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5T) System / Jiang Hui [et al.] // *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2009. No S1. Pp. 1–6.

19. Design of the TPDS Big Data Analysis System / Shi Xiaolei [et al.] // *Railway Locomotive & Car*. 2022. Vol. 42, no. 1. Pp. 95–98.

20. Construction Techniques for an Intelligent Recognition Dataset of Railway Freight Car Fault Images / Qi Miaomiao [et al.] // China Railway, 2025.

21. Цаплин А. Е. Диагностика узлов механической части подвижного состава с применением комплекса машинного зрения // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 2. С. 41–49.

22. Казанский Н. Л., Попов С. Б. Распределенная система технического зрения регистрации железнодорожных составов // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, №3. С. 419–428.

23. A Review of Computer Vision for Railways / B. Olivier [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025.

24. Machine Vision-Based Method for TFDS Freight Car Fault Image Recognition / Sun Yinong [et al.]. 2025.

25. A Review of Machine Vision Applications in State Detection of Rail Transit Systems / Wei Xiukun [et al.] // Control and Decision. 2021. Vol. 36 (2). Pp. 257–282.

Дата поступления: 20.04.2026

Решение о публикации: 26.04.2026

Контактная информация:

ШЭНЬ Цзеи — аспирант; 787612109@qq.com

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — кандидат техн. наук, доцент; tsaplin.alexey@mail.ru

Intellectualization of Dynamic Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock in China

Jieyi Shen, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Shen Jieyi, Tsaplin A. E. Intellectualization of Dynamic Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock in China // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 133–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-133-148 (In Russian)

Abstract

Objective: to identify the patterns and main directions in the intellectualization of dynamic monitoring technologies for railway rolling stock in China; to determine the role of the 5T system in the transition from periodic static inspection to continuous condition assessment during operation; and to establish the role of TFDS in integrating dynamic monitoring with machine vision and intelligent recognition technologies.

Methods: an analytical review was carried out of scientific, technical, and regulatory sources devoted to non-destructive testing, dynamic monitoring, and intelligent diagnostics of railway rolling stock. The sources were systematized according to inspection objects, monitored parameters, physical diagnostic principles, and the level of intelligence in data processing. On this basis, the structure and functional features of the 5T system, the

interrelations among its subsystems, and the specific features of implementing machine vision, multi-source data fusion, and intelligent recognition methods, primarily in TFDS-type systems, were examined. **Results:** it is shown that a multi-level dynamic monitoring system for rolling stock has been established on China's railways, with the 5T system serving as its core. It was found that the development of these technologies is characterized by a transition from autonomous monitoring of individual parameters and manual interpretation of results to network-based integration of subsystems, multichannel information analysis, and automated anomaly recognition. It was also revealed that the most pronounced features of intellectualization are observed in visual diagnostic systems, primarily in TFDS, where image processing has become the basis for defect detection, condition assessment of components, and reduction of the labor intensity of operational data analysis. The potential of integrating TFDS with data from other 5T subsystems to improve diagnostic reliability, reduce false alarms, and move from defect detection to risk prediction is also demonstrated. **Practical significance:** the results obtained make it possible to clarify the role of dynamic monitoring within the overall system of technical condition assessment of railway rolling stock and to identify promising directions for its integration with non-destructive testing methods for mechanical components and machine vision technologies. The study may be used as a theoretical and review-analytical basis for further research in the fields of operational safety, technical condition diagnostics, and intelligent maintenance of rolling stock.

Keywords: railway rolling stock, dynamic monitoring, 5T system, machine vision, intelligent diagnostics, non-destructive testing

References

1. Kundu P., et al. A Review on Condition Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock, *Proceedings of the PHM Society European Conference*, 2018, vol. 13, pp. 1–15.
2. Kostrzewski M., Melnik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review, *Sensors*, 2021, vol. 21 (14), p. 4710.
3. China Railway Corporation. Rules for Inspection, Maintenance and Management of Equipment for the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring System (5T), 车辆运行安全监控系统设备检修维护管理规则: TG/CL 210–2015. Beijing, 2015. (In Chinese).
4. Jiang Hui, et al. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5t) System, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, no. S1, pp. 1–6.
5. Gosudarstvennoe zheleznodorozhnoe upravlenie KNR. Gosudarstvennoe zheleznodorozhnoe upravlenie KNR opublikovalo dva otraslevykh standarta, vklyuchaya "Normy proektirovaniya sistemy monitoringa bezopasnosti ekspluatatsii zheleznodorozhnykh vagonov" [National Railway Administration. The National Railway Administration Issued Two Industry Standards, Including the Design Specification for the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring System], January 04, 2022. URL: <https://www.nra.gov.cn/> (accessed: January 20, 2026).
6. Xiukun Wei, et al. A Survey of the Application of Machine Vision in Rail Transit System Inspection, *Control and Decision*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 257–282.
7. Wang Deming, et al. TFDS Truck Fault Image Application System, *Railway Computer Application*, 2024, vol. 33 (9), pp. 59–67.
8. Mu Xin. Intelligent Recognition of TFDS Faults Based on Large Model Technology, *Railway Computer Application*, 2025, vol. 34 (11), pp. 8–14.
9. Pudovikov S.A. Bezrabortnaya tekhnologiya ul'trazvukovogo kontrolya osei kolesnykh par pri remonte podvizhnogo sostava [Non-Disassembled Technology of Ultrasonic Control of Wheelset

Axles During Rolling Stock Repairs], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2005, no. 1, pp. 108–113. (In Russian)

10. Korosteleva E. Yu., Tolmachev I. I. Primenenie magnitoporoshkovogo i vikhretokovogo metodov kontrolya dlya detalei i uzlov lokomotivov i motorvagonnogo podvizhnogo sostava [Application of Magnetic Powder and Eddy Current Control Methods for Parts and Assemblies of Locomotives and Motor-Car Rolling Stock], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering]*, 2008, vol. 312, no. 2S, pp. 264–267. (In Russian)

11. Akhmedzhanov R. A., Makarochkin V. V., Rodchenko L. A. O sovershenstvovanii ul'trazvukovogo kontrolya osi kolesnoi pary vagona [On Improving the Ultrasonic Control of the Axle of a Wagon Wheelset], *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2014, no. 2 (18), pp. 7–18. (In Russian)

12. Vorobev A. A., Karpov V. A. Analiz nadezhnosti podvizhnogo sostava po rezul'tatam nerazrushayushchego kontrolya [Analysis of Rolling Stock Reliability Based on the Results of Non-Destructive Testing], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik of Saratov State Technical University]*, 2015, vol. 3, no. 1 (80), pp. 65–70. (In Russian)

13. Maryukhnenko V. S., Pulyakov A. V. Osobennosti kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava na khodu poezda [Features of Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock on the Train], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 272–287. (In Russian)

14. Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Kontrol' fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov na osnove diagnostiki [Monitoring of the Actual Technical Condition of Locomotives Based on Diagnostics], *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2018, no. 3 (59), pp. 38–47. (In Russian)

15. Boronenko Yu. P., et al. Analiz metodov izmerenii silovogo vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' i sistem tekhnicheskogo kontrolya koles pri dvizhenii poezda [Analysis of Methods for Measuring the Force Effect of Rolling Stock on the Track and Systems of Technical Control of Wheels During Train Movement], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 324–344. (In Russian)

16. Popov V. V., et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov na khodu poezda [Monitoring of the Technical Condition of Freight Cars on the Train] // *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, and Economics]*, 2021, no. 1–2 (92–93), pp. 52–56. (In Russian)

17. Baranov L. A., Burchenkov V. V. Tekhnologiya monitoringa podvizhnogo sostava na osnove distantsionnogo akusticheskogo zondirovaniya [Rolling Stock Monitoring Technology Based on Remote Acoustic Sensing], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 90–100. (In Russian)

18. Jiang Hui, et al. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5T) System, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, no. S1, pp. 1–6.

19. Shi Xiaolei, et al. Design of the TPDS Big Data Analysis System, *Railway Locomotive & Car*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 95–98.
20. Qi Miaomiao, et al. Construction Techniques for an Intelligent Recognition Dataset of Railway Freight Car Fault Images, *China Railway*, 2025.
21. Tsaplin A. E. Diagnostika uzlov mekhanicheskoi chasti podvizhnogo sostava s primeneniem kompleksa mashinnogo zreniya [Diagnostics of Components of the Mechanical Part of Rolling Stock Using a Machine Vision System], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2011, no. 2, pp. 41–49. (In Russian)
22. Kazanskij N. L., Popov S. B. Raspredeleonnaya sistema tekhnicheskogo zreniya registratsii zheleznodorozhnykh sostavov [Distributed Vision System for Registration of Railway Trains], *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 419–428. (In Russian)
23. Olivier B., et al. A Review of Computer Vision for Railways, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025.
24. Sun Yinong, et al. Machine Vision-Based Method for TFDS Freight Car Fault Image Recognition, 2025.
25. Wei Xiukun, et al. A Review of Machine Vision Applications in State Detection of Rail Transit Systems, *Control and Decision*, 2021, vol. 36 (2), pp. 257–282.

Received: April 20, 2026

Accepted: April 26, 2026

Author's information:

Jieyi SHEN — Postgraduate Student; 787612109@qq.com

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