



ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИОТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Ташкенский государственный транспортный
университет

Амиров Султон Файзуллаевич д.т.н., профессор, зав.
кафедры «Электроснабжения»

Бадретдинов Тимур Наильевич доцент кафедры
«Электроснабжения»

Хожамуратов Исламбек Ниетбай угли магистрант
кафедры «Электроснабжения»

***Аннотация:** В статье представлен обзор современных цифровых методов мониторинга и диагностики контактной сети железных дорог, включающих развёртывание IoT сенсоров на опорах и подвижном составе, применение предиктивной аналитики на базе больших данных и искусственного интеллекта для раннего выявления дефектов, а также создание цифровых двойников контактной линии для моделирования её состояния в реальном времени. Рассмотрены примеры успешного внедрения таких технологий на зарубежных железных дорогах, их экономические преимущества — от сокращения объёма ручных проверок и затрат на ремонт до повышения надёжности и безопасности движения, а также перспективы и ключевые аспекты адаптации этих решений для электрифицированной сети Узбекистана. Сделан вывод о том, что переход к мониторингу по состоянию позволит оптимизировать ресурс контактных проводов, минимизировать аварийные простои и повысить эффективность эксплуатации инфраструктуры при разумных инвестициях в технологии и подготовку кадров*

***Ключевые слова:** Интернет вещей (IoT), предиктивная аналитика, цифровой двойник, диагностика железнодорожной инфраструктуры, техническое обслуживание по состоянию.*

Annotation: *The article provides an overview of modern digital methods for monitoring and diagnosing railway catenary systems, including the deployment of IoT sensors on masts and rolling stock, the use of predictive analytics based on big data and artificial intelligence for early defect detection, and the creation of digital twins of the catenary line to simulate its real-time condition. Examples of successful implementation of these technologies on foreign railways are examined, along with their economic benefits — from reducing manual inspections and repair costs to improving reliability and operational safety. The article also discusses the prospects and key aspects of adapting these solutions for the electrified railway network of Uzbekistan. It concludes that transitioning to condition-based monitoring can optimize the lifespan of contact wires, minimize emergency downtime, and enhance infrastructure efficiency through reasonable investment in technology and personnel training.*

Keywords: *Internet of Things (IoT), predictive analytics, digital twin, railway infrastructure diagnostics, condition-based maintenance.*

Введение. Контактная сеть железной дороги – это система проводов и оборудования, обеспечивающая подачу электроэнергии к поездам через токоприёмники (пантографы). Надёжность контактной сети напрямую влияет на бесперебойность движения поездов и безопасность пассажиров. Традиционно состояние контактных проводов проверяется вручную на плановых обходах и с помощью специальных диагностических вагонов. Однако такой регламентный подход (время или пробег ориентированное обслуживание) имеет недостатки: возможны неожиданные обрывы проводов между проверками, а сами проверки редки, дороги и требуют остановки движения. Для Узбекистана внедрение современных цифровых методов мониторинга контактной сети является во многом новшеством, способным повысить эффективность обслуживания растущей электрифицированной сети. В последние годы цифровые технологии и Интернет вещей (IoT)

предоставляют новые инструменты для непрерывного контроля состояния контактной сети, раннего обнаружения дефектов и перехода к обслуживанию по состоянию (предиктивному ремонту). Ниже рассмотрены современные технологии (сенсоры IoT, системы предиктивной аналитики, цифровые двойники) для мониторинга контактных линий, их экономические преимущества, а также примеры успешного применения по опыту зарубежных железных дорог.

Современные технологии мониторинга и диагностики контактной сети IoT-сенсоры и системы сбора данных. Интернет вещей (IoT) позволяет оснащать элементы инфраструктуры датчиками, которые непрерывно собирают информацию о параметрах контактной сети. Датчики могут устанавливаться как стационарно на опорах и элементах контактной сети, так и на подвижном составе (например, на пантографах обычных пассажирских поездов или диагностических вагонов). Такие устройства измеряют ключевые показатели: высоту и износ контактного провода, его отклонение (зигзаг) от оси пути, силу прижатия пантографа, ток и напряжение, температуру проводов, вибрации и т.д. Например, в рамках европейского проекта H2020 был разработан мониторинговый комплекс на базе датчиков, устанавливаемых на пантографе; он измеряет параметры контактного провода (высоту и смещение) во время движения и с погрешностью около 12 мм определяет отклонения, позволяющие выявлять износ и дефекты на ранней стадии. Подобные системы превращают обычный электропоезд в передвижную лабораторию, регулярно собирающую данные о состоянии линии при каждодневной эксплуатации.

Один лишь сбор данных малоценен без их грамотного анализа. Современные системы диагностики контактной сети включают модули предиктивной аналитики – алгоритмы обработки больших данных (Big Data) и искусственный интеллект (AI), которые обрабатывают поток измерений и

выявляют тренды деградации. Анализ изменения высоты провода, колебаний контактного усилия, температуры и других факторов позволяет прогнозировать момент, когда параметр выйдет за допустимые пределы, и заблаговременно спланировать ремонт. Например, на железных дорогах Японии (JR East) внедрена AI-система обработки данных с измерительного поезда East-i для контроля контактной сети. В обычном режиме этот диагностический электропоезд четыре раза в год проходит по сети и с помощью датчиков измеряет износ, высоту и отклонение проводов, а также делает фотосъёмку проводов с последующей автоматической расшифровкой изображений. Внедрение такой системы позволило на ~10% сократить объём ручных работ и ночных инспекций контактной сети за счёт автоматизации анализа данных. Ранее инспекторы проверяли контактную сеть вручную ежегодно ночью, а теперь большая часть проверки выполняется алгоритмами, что повышает регулярность и качество мониторинга. Предиктивные модели могут с высокой точностью определить скорость износа каждого участка провода и подсказать оптимальные сроки ремонта для каждого места, избегая как преждевременной замены, так и опасных задержек.



*Рис. 1. Преобразование обслуживания контактных сетей с помощью
аналитики данных*

Одним из наиболее прогрессивных и перспективных направлений в управлении железнодорожной инфраструктурой является создание цифровых двойников контактной сети. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального объекта, сформированную на основе данных, получаемых от сенсоров (в том числе IoT), а также инженерных расчётов и физических моделей. Такая система позволяет отображать текущее состояние элементов контактной сети — опор, проводов, подвески — в режиме реального времени и обновляется автоматически по мере поступления новых данных.

Цифровой двойник подвергается тем же типам воздействий, что и реальный объект: механическим нагрузкам, колебаниям температуры, износу. Благодаря этому можно моделировать процессы развития дефектов, предсказывать поведение системы при различных эксплуатационных условиях и заранее выявлять потенциальные угрозы.

Примером служит разработка исследователей из Лулео университета (Швеция), которые предложили использовать лазерное сканирование (LiDAR) с подвижного состава для создания облака точек, на основе которого формируется высокоточная 3D-модель контактной сети. При объединении этой модели с архивными данными о предыдущих неисправностях становится возможным проводить прогнозный анализ: выявлять слабые места, определять наиболее уязвимые участки проводов или подвески, которые с высокой вероятностью выйдут из строя в ближайшем будущем при текущих нагрузках.

Кроме того, цифровой двойник позволяет безопасно тестировать различные стратегии технического обслуживания: например, изменение уровня натяжения провода, замену конкретных узлов и элементов, — и анализировать, как это повлияет на срок службы всей системы. Все это

возможно без вмешательства в реальную инфраструктуру и без риска возникновения аварий.

Сегодня технологии цифровых двойников начинают активно внедряться на железных дорогах в разных странах мира для оптимизации процессов технического обслуживания, повышения надёжности и подготовки персонала. В Узбекистане это направление пока находится на начальной стадии, однако оно обладает большим потенциалом и может стать ключевым элементом модернизации и цифровой трансформации национальной железнодорожной сети.

Для наглядности в таблице 1 приведены основные цифровые технологии мониторинга контактной сети и примеры их применения:

таблица 1

Технология	Описание и роль	Пример внедрения
IoT-сенсоры	Датчики, устанавливаемые на проводах, опорах или пантографах; измеряют параметры контактной сети (высоту и износ провода, силу тока, натяжение, вибрации и пр.) в реальном времени.	Сенсоры на пантографе измеряют высоту и зигзаг контактного провода во время движения поезда, передавая данные в центр.
Предиктивная аналитика (AI)	Системы обработки данных и машинного обучения, которые анализируют поступающие от датчиков данные, выявляют отклонения и предсказывают неисправности до их возникновения.	AI-модуль JR East обрабатывает данные о проводе, автоматизируя диагностику и сокращая объём ручных проверок на 10%.

Цифровой двойник	Виртуальная модель контактной сети, обновляемая данными с датчиков; позволяет моделировать износ и различные ситуации для оптимизации обслуживания.	3D-модель контактной сети, созданная по данным LiDAR, используется для прогнозирования износа проводов и планирования ремонтов.
---------------------	--	---

Краткий научный обзор внедрения IoT-технологий в диагностику контактной сети железных дорог в Море. Внедрение технологий Интернета вещей (IoT) в систему мониторинга и диагностики контактной сети железных дорог представляет собой важное направление цифровизации инфраструктуры железнодорожного транспорта. Несмотря на необходимость значительных первоначальных инвестиций, включающих установку датчиков, развитие IT-инфраструктуры и обучение персонала, мировой опыт демонстрирует высокую эффективность подобных решений как с точки зрения повышения надёжности эксплуатации, так и в плане экономической целесообразности. Использование IoT позволяет осуществлять переход от регламентного технического обслуживания к стратегии ремонта по фактическому состоянию, что, в свою очередь, снижает избыточные трудозатраты, уменьшает потребление материалов и позволяет оптимизировать логистику запасных частей. Одним из показательных примеров является опыт компании JR East в Японии, где автоматизация анализа данных с контактной сети позволила сократить объём ручных ночных проверок на 10 %, а выявление дефектов осуществляется на ранней стадии. Подобные подходы существенно снижают вероятность отказов оборудования, способных привести к дорогостоящим простоям и ущербу подвижному составу. IoT-системы позволяют фиксировать такие отклонения, как износ

контактного провода, снижение натяжения или деформации подвески, с последующей автоматической передачей информации в диспетчерские центры, обеспечивая своевременное вмешательство до наступления критических событий. Это особенно актуально на участках с высокой интенсивностью движения, где простои имеют значительное влияние на экономику перевозок. Помимо повышения надёжности и предсказуемости эксплуатации, технологии непрерывного мониторинга позволяют более рационально использовать ресурс контактных проводов и другого оборудования, продлевая межремонтные интервалы без ущерба для безопасности движения. В европейских странах в рамках проектов Horizon 2020 и SIA были разработаны мобильные системы измерения геометрии контактной сети, устанавливаемые на пассажирские электропоезда, а также стационарные комплексы контроля пантографа и провода, такие как PantoInspect. Испытания этих систем подтвердили их высокую точность и пригодность для диагностики без снятия напряжения с контактной сети. В России на сети ОАО "РЖД" также реализуются аппаратно-программные комплексы для автоматизированного контроля состояния контактной сети в реальном времени, включая системы на базе электропоездов и стационарные датчики, интегрированные в инфраструктуру. Это позволило увеличить интервалы между заменами проводов и снизить зависимость от субъективного фактора при оценке их состояния. На международном уровне ведётся работа по унификации подходов к предиктивному обслуживанию, в частности в рамках проекта PREDICT-MAINTENANCE, инициированного Международным союзом железных дорог (UIC), где обобщается опыт различных стран в области применения IoT для контроля контактных сетей и тяговых подстанций. Для Узбекистана, где ведётся активное строительство новых электрифицированных и высокоскоростных железнодорожных линий, применение IoT-технологий открывает значительные возможности по

обеспечению надёжности функционирования инфраструктуры и снижению эксплуатационных расходов. Проведение пилотных проектов с установкой датчиков и созданием цифровых двойников может стать важным шагом на пути к внедрению принципов интеллектуального управления техническим состоянием контактной сети на национальном уровне.

Заключение. Цифровые технологии мониторинга и диагностики контактной сети – это ключ к повышению эффективности и безопасности железнодорожной инфраструктуры в XXI веке. Опыт передовых железных дорог показывает, что сочетание IoT-сенсоров, предиктивной аналитики и цифровых моделей позволяет перейти от реагирования на неисправности к их предотвращению. Для железных дорог Узбекистана, активно развивающих свою материальную базу, внедрение таких технологий открывает возможности снизить затраты на обслуживание, избежать крупных аварий и обеспечить надёжное электроснабжение поездов даже при увеличении скоростей и интенсивности движения. Конечно, реализация подобных проектов требует инвестиций и подготовки кадров, но отдача выражается не только в экономии средств, но и в росте надёжности перевозок и репутации перевозчика. В перспективе несколько лет пилотные решения на основе IoT и цифровых двойников могут быть масштабированы на всю сеть Узбекских железных дорог. Новизна этих технологий для региона сочетается с уже подтверждённой эффективностью за рубежом, что снижает риски их внедрения. Таким образом, переход к цифровому мониторингу контактных линий – это стратегический шаг, позволяющий железным дорогам Узбекистана выйти на новый уровень эксплуатационной готовности и безопасности инфраструктуры в эпоху цифровой трансформации транспорта.

Как показывают исследования, мониторинг ключевых характеристик контактной сети (например, высоты и положения контактного провода) с помощью датчиков на пантографах позволяет оптимизировать

техобслуживание и снизить совокупные затраты жизненного цикла (LCC) инфраструктуры за счёт перехода к профилактическому обслуживанию по состоянию. Одновременно ведутся разработки по прогнозированию рисков отказов на основе собираемых данных. Внедрение предиктивного подхода к обслуживанию контактной сети даёт ряд преимуществ: предупреждение серьёзных отказов до их возникновения, сокращение времени и стоимости ремонтных работ, планирование ремонтов в периоды минимальной нагрузки движения. Также ожидается экономия за счёт предотвращения лавинообразного роста расходов при авариях, оптимизация запасов компонентов, продление срока службы стареющих элементов и повышение готовности системы.

Список использованной литературы:

hen S., Frøseth G. T., Derosa S., Lau A., & Rönquist A. (2024). Railway C

achiesche K., & Reiterer A. (2024). Optical Measurement System for Monitoring Railway Infrastructure—A Review. *Applied Sciences*, 14(19), 8801.

Артикульный номер 8801 [MDPI](#)

ang H., Kong L., Fang Z., Zhang Z., Zhou J., Chen H., Sun J., & Zou X. (2024). Sustainable and smart rail transit based on advanced self-powered sensing technology. *iScience*, 27(12), 111306. Артикульный номер 111306 [PubMed](#)

upi C., Felli F., Ciro E., Paris C., & Vendittozzi C. (2021). Railway overhead c

Ch P., Chen G., Wu Z., Liu J., & Ma J. (2024). Research on a Markov Chain Based CSMA/CA Communication Mechanism of Wireless Sensor Network for High- b

errecher A., Ricolfe-Viala C., Tur M., Gregori S., Salvador-Muñoz M., Fuenmayor-Fernández F. J., Gil J., & Pedrosa A. M. (2023). Hardware-in-the e

d

Loop Test Bench for Simulation of Catenary–Pantograph Interaction (CPI) with

typułkowski K., Golda P., Tomaszewska J., & Lewczuk K. (2021). Monitoring system for railway infrastructure elements based on thermal imaging analysis.