

**ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ IOT-СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ
ДОРОГАХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Ташкентский государственный транспортный университет
Хожамуратов Исламбек Ниетбай угли,
магистрант кафедры «Электроснабжения»
Амиров Султон Файзуллаевич,
д.т.н., профессор, зав. кафедры «Электроснабжения»
Бадретдинов Тимур Наильевич,
доцент кафедры «Электроснабжения»

**ИНФОРМАЦИЯ О
СТАТЬЕ**

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

*Received: 23.06.2026
Revised: 24.06.2026
Accepted: 25.06.2026*

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА:**

высокоскоростное движение, контактная сеть, Интернет вещей (IoT), взаимодействие пантографа и контактной подвески, контактное усилие, предиктивная аналитика, цифровой двойник, граничные вычисления, 5G, мониторинг по состоянию.

АННОТАЦИЯ:

В статье выполнен аналитический обзор зарубежного опыта применения IoT-систем мониторинга контактной сети, ориентированных на условия высокоскоростного движения. Показана специфика динамического взаимодействия пантографа и контактной подвески при скоростях свыше 250–350 км/ч и вытекающие из неё повышенные требования к диагностике. Рассмотрены архитектура бортовых и стационарных сенсорных подсистем, контролируемые параметры, высокоскоростные каналы передачи данных (5G, граничные вычисления), методы предиктивной аналитики и цифровые двойники контактной сети. Проведён сравнительный анализ решений, применяемых на высокоскоростных магистралях Германии, Франции, Китая, Японии, Испании и Великобритании. Оценены перспективы адаптации зарубежного опыта к условиям развивающейся высокоскоростной инфраструктуры Узбекистана.

Введение. Высокоскоростное движение (ВСМ) стало одним из ключевых направлений развития мирового железнодорожного транспорта: суммарная протяжённость высокоскоростных линий превысила 60 тыс. км, а эксплуатационные скорости на ряде магистралей достигают 300–350 км/ч. Надёжность тягового

электроснабжения на таких линиях имеет критическое значение, поскольку именно качество токосъёма ограничивает предельно достижимую скорость и определяет безопасность движения. Контактная сеть при этом работает в наиболее напряжённом режиме: рост скорости резко усиливает динамическое взаимодействие в системе «пантограф - контактная подвеска», увеличивая амплитуды колебаний провода, интенсивность искрения и износ контактирующих элементов.

Традиционная планово-предупредительная система обслуживания, основанная на регламентных проверках через фиксированные интервалы и рейсах вагонно-лабораторий, плохо отвечает требованиям высокоскоростной эксплуатации. Дефекты, зарождающиеся в межинспекционный период, при высоких скоростях развиваются стремительно и способны за короткое время привести к отказу токосъёма с тяжёлыми последствиями. Это стимулировало ведущие железнодорожные администрации к внедрению систем мониторинга на базе технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT), обеспечивающих непрерывный контроль состояния контактной сети в режиме реального времени и переход к обслуживанию по фактическому состоянию (condition-based maintenance) и предиктивному обслуживанию (predictive maintenance).

Целью настоящей статьи является аналитический обзор зарубежного опыта применения IoT-систем мониторинга контактной сети именно в условиях высокоскоростного движения, выявление характерных технических решений и оценка возможности их адаптации к формирующейся высокоскоростной инфраструктуре Узбекистана.

Специфика контактной сети при высоких скоростях. Высокоскоростное движение предъявляет качественно иные требования к контактной сети, чем конвенциональные линии. С ростом скорости движущийся пантограф возбуждает в контактном проводе бегущие волны; когда скорость поезда приближается к скорости распространения механических волн в проводе, нарастают резонансные явления, амплитуда колебаний подвески резко увеличивается, а контактное усилие приобретает выраженный высокочастотный характер. Кратковременные отрывы пантографа от провода сопровождаются электрической дугой, вызывающей локальный нагрев и ускоренный износ контактного провода и контактных вставок. Стандартами (например, EN 50367) нормируются среднее значение и стандартное отклонение контактного усилия, выход за пределы которых указывает на ухудшение качества токосъёма.

Принципиальная сложность состоит в том, что контактное усилие - главный показатель качества взаимодействия - крайне трудно измерять напрямую в эксплуатации. Поэтому современные системы опираются на косвенные измеряемые величины (ускорение головки пантографа, его подъём, параметры дугообразования) с последующим восстановлением контактного усилия расчётными и интеллектуальными методами. Сужение допусков на геометрию подвески (с десятков

миллиметров на обычных линиях до единиц миллиметров на ВСМ) и необходимость регистрации быстропротекающих процессов с частотой в сотни и тысячи герц определяют повышенные требования к быстродействию датчиков, пропускной способности каналов связи и производительности вычислительных средств. Именно эти требования делают IoT-архитектуру естественной технологической основой мониторинга высокоскоростных линий.

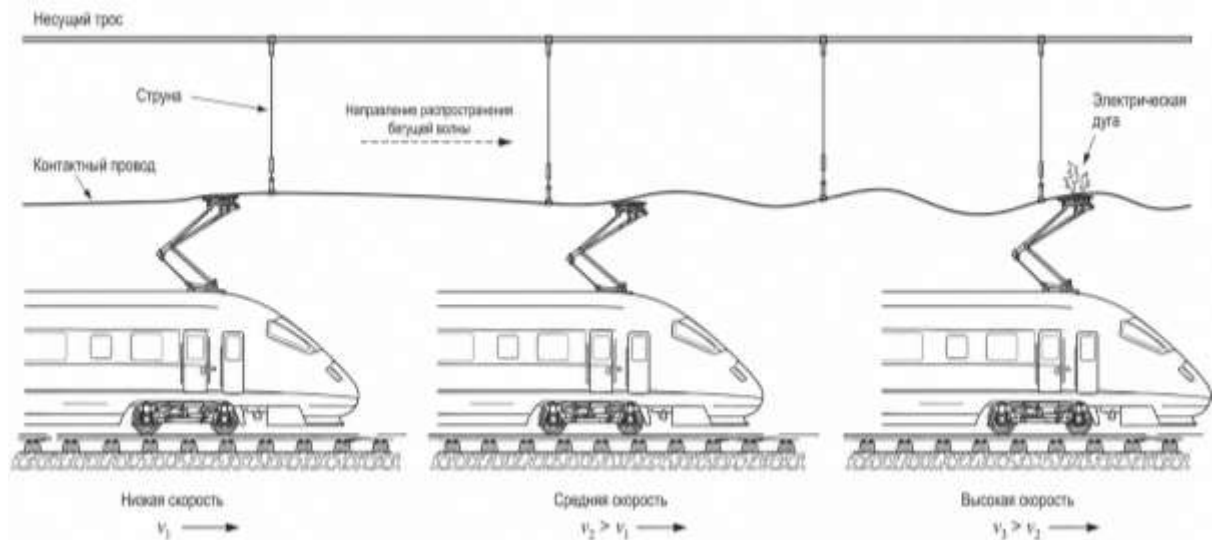


Рис. 1. Динамическое взаимодействие пантографа и контактной подвески при росте скорости движения

Архитектура IoT-систем и контролируемые параметры. Системы мониторинга контактной сети высокоскоростных линий строятся по многоуровневому принципу и сочетают две взаимодополняющие подсистемы - бортовую и стационарную. Бортовая подсистема размещается на эксплуатационных поездах и специализированных диагностических составах: измерительные пантографы оснащаются акселерометрами, тензометрическими и волоконно-оптическими датчиками на основе брэгговских решёток (FBG), а кузовные модули - лазерными профилометрами, лидарами и высокоскоростными камерами. Такой подход превращает каждый рейсовый поезд в передвижную диагностическую лабораторию, обеспечивая регулярный контроль всей линии без выделения отдельных «окон» в графике движения.

Волоконно-оптические FBG-датчики получили на ВСМ особое распространение: они невосприимчивы к сильным электромагнитным помехам зоны 25 кВ, обладают высокой чувствительностью и допускают квазираспределённое измерение деформаций и натяжения по множеству точек вдоль одного волокна. Стационарная подсистема включает датчики натяжения на компенсирующих устройствах, метеостанции, акселерометры и инклинометры на опорных конструкциях, ультрафиолетовые детекторы и камеры в зонах сопряжения анкерных участков и на воздушных стрелках - наиболее ответственных элементах подвески. Совокупно контролируются геометрические (высота, зигзаг, стрела провеса), механические (натяжение, контактное

усилие, вибрации, износ), электрические (ток, напряжение, характеристики дуги) и климатические параметры.

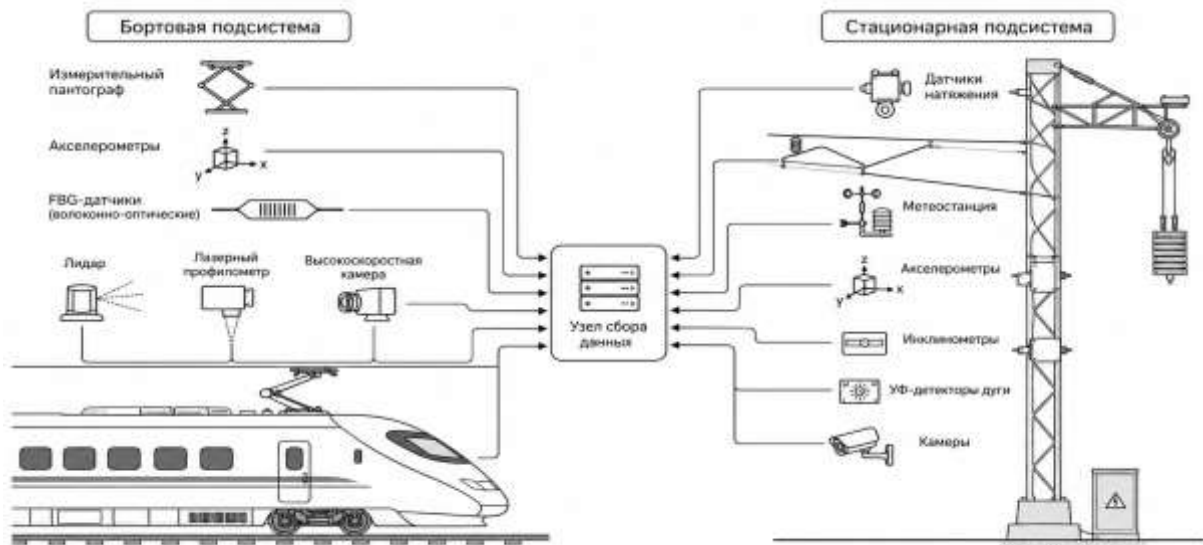


Рис. 2. Структура бортовой и стационарной подсистем IoT-мониторинга контактной сети ВСМ

Передача и обработка данных при высоких скоростях. Высокая скорость движения создаёт специфические проблемы для передачи диагностических данных. Поток данных от бортовых датчиков, регистрирующих процессы с частотой в тысячи герц, достигает значительных объёмов, а частая смена базовых станций при скоростях свыше 300 км/ч приводит к учащённым «хэндоверам» и кратковременным разрывам связи. Для стационарных малопотребляющих узлов применяются протоколы LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), обеспечивающие передачу на километры при минимальном энергопотреблении, тогда как бортовые системы требуют широкополосных сетей 4G/LTE и 5G с малой задержкой.

Ключевым решением становится технология граничных вычислений (edge computing): первичная обработка и обнаружение аномалий выполняются непосредственно на борту, что сокращает задержку между регистрацией события и реакцией до миллисекунд и снижает нагрузку на каналы связи. Сырые данные буферизуются в бортовом накопителе и догружаются в облачную платформу при устойчивом соединении (например, на станциях), а в центр передаются преимущественно агрегированные признаки и сигналы тревоги. Облачные платформы интегрируются с системами SCADA и ERP железнодорожных компаний, формируя единый контур управления техническим состоянием.

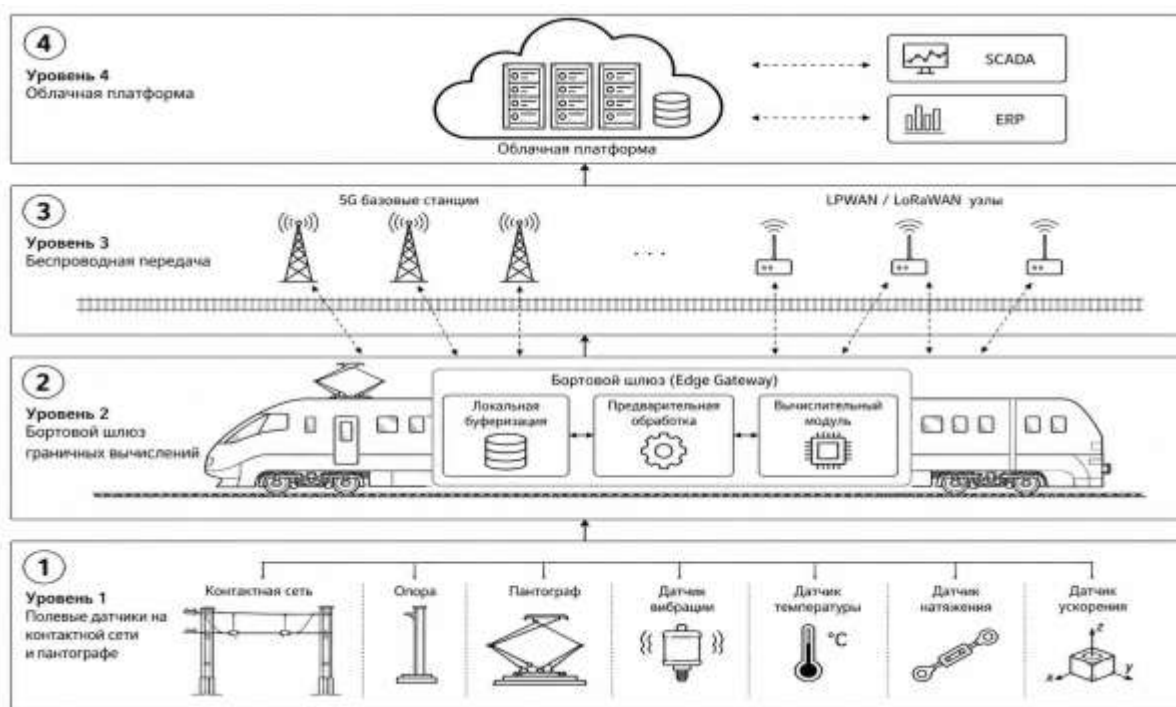


Рис. 3. Многоуровневая схема передачи данных: борт - граничные вычисления - 5G - облако

Предиктивная аналитика и цифровые двойники. Накопленные временные ряды служат основой для построения моделей деградации элементов контактной сети. Алгоритмы машинного обучения - регрессионные модели, случайные леса, градиентный бустинг, а также рекуррентные и сверточные нейронные сети (LSTM, GRU, CNN) - обучаются на исторических данных о параметрах, отказах и ремонтах и прогнозируют остаточный ресурс. Применительно к ВСМ особое значение имеют гибридные архитектуры (например, CNN-GRU), позволяющие восстанавливать контактное усилие по косвенным измерениям и выявлять зарождающиеся дефекты, когда параметр ещё в пределах допуска, но характер его изменения свидетельствует о деградации.

Технологии big data обеспечивают одновременный анализ данных от тысяч сенсоров, выявляя пространственно-временные закономерности по всей протяжённости магистрали. Высшей формой интеграции выступает цифровой двойник (digital twin) - непрерывно обновляемая 3D-модель контактной подвески, параметризованная актуальными данными о геометрии, механических и электрических характеристиках. Цифровой двойник позволяет моделировать качество токосъёма при различных скоростях и состояниях подвески без вмешательства в работу инфраструктуры и замыкает контур управления: датчики обновляют модель, модель пересчитывает прогнозы, результаты формируют планы обслуживания. По данным исследований, переход к предиктивному обслуживанию сокращает эксплуатационные расходы на 15–25 % и снижает число внеплановых отказов на 30–40 %.

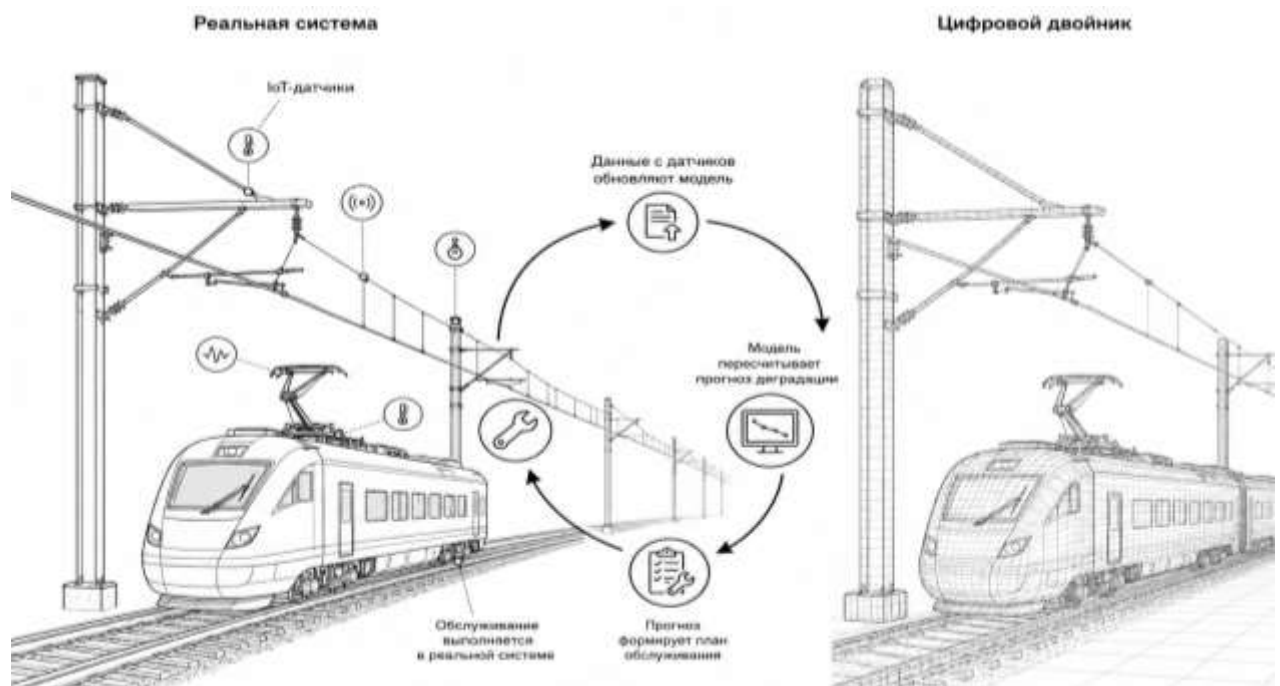


Рис. 4. Концепция цифрового двойника контактной сети ВСМ с IoT-интеграцией
Зарубежный опыт применения IoT-систем на высокоскоростных линиях.

Германия располагает одной из наиболее развитых систем цифровой диагностики высокоскоростной инфраструктуры. В рамках программы Digitale Schiene Deutschland компания Deutsche Bahn эксплуатирует на линиях ICE измерительные поезда с лидарными сканерами и лазерными профилометрами, регистрирующие параметры подвески при скоростях до 300 км/ч, а системы PantoInspect контролируют состояние пантографов методом стереоскопической съёмки. Франция (SNCF) развивает диагностику на базе оптоволоконных FBG-датчиков: сенсорные комплексы, устанавливаемые на пантографах эксплуатационных поездов TGV, измеряют параметры провода с погрешностью порядка 10–12 мм, обеспечивая сплошной контроль линии силами рейсовых составов.

Китай, обладающий крупнейшей в мире сетью ВСМ протяжённостью свыше 45 тыс. км, эксплуатирует диагностические поезда и поезда серий CRH/CR «Фусин» с комплексами датчиков, рассчитанными на скорости до 350 км/ч, а также тысячи стационарных камер; данные обрабатываются алгоритмами глубокого обучения для автоматической классификации дефектов подвески и посторонних предметов. Япония на линиях Синкансэн использует измерительный электропоезд East-i (JR East), а внедрение алгоритмов компьютерного зрения позволило существенно сократить объём ручных инспекций. Испания (Adif/Renfe) на сети AVE и Италия применяют бортовые системы контроля взаимодействия пантографа и контактной сети, в том числе оптические и видеоизмерительные комплексы. Великобритания (Network Rail) развивает программу дистанционного мониторинга (Remote Condition Monitoring) с

IoT-узлами на базе LoRaWAN и ансамблевыми алгоритмами машинного обучения для прогнозирования отказов.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ IoT-решений мониторинга контактной сети, применяемых на высокоскоростных линиях ряда стран.

Таблица 1

Сравнительный анализ зарубежных IoT-систем мониторинга контактной сети на линиях ВСМ

Страна / оператор	Макс. скорость	Технологии	Контролируемые параметры	Преимущества	Ограничения
Германия / DB (ICE)	до 300 км/ч	LiDAR, лазерные профилометры, PantoInspector, 5G, ML	Геометрия, износ, состояние пантографов	Высокая точность, прогноз износа	Сложность интеграции
Франция / SNCF (TGV)	до 320 км/ч	FBG-сенсоры на пантографовых эксплуатационных поездов	Натяжение, высота, зигзаг провода	Сплошной контроль рейсовыми составами	Стоимость оснащения парка
Китай / CR (CRH, «Фусин»)	до 350 км/ч	Камеры, deep learning (CNN), диагностика поезда	Геометрия, дуги, посторонние предметы	Масштаб сети, автоклассификация дефектов	Зависимость от госинвестиций
Япония / JR East (Синкансэн)	до 320 км/ч	Электропоезд East-i, AI-анализ изображений	Износ, геометрия, состояние элементов	Высокая точность, регулярность	Невысокая частота рейсов

Испания / Adif (AVE)	до 310 км/ч	Оптические и видеоизмерит. бортовые системы	Контактное усилие, геометрия, дуги	Контроль качества токосъёма	Фрагментарность данных
Великобритания / Network Rail	до 200 км/ч	IoT-узлы LoRaWAN, ансамблевые ML	Температура, вибрации, наклон опор	Интеграция с мониторингом пути	Ограниченный охват ВСМ

Влияние режима скорости на требования к мониторингу. Сопоставление зарубежных решений показывает устойчивую закономерность: чем выше проектная скорость линии, тем более жёсткие требования предъявляются к составу контролируемых параметров и быстрдействию системы. Для линий со скоростями до 200 км/ч достаточно периодического контроля геометрии и износа с частотой измерений в единицы герц. На магистралях со скоростями 300–350 км/ч в число критических параметров обязательно входят контактное усилие, характеристики дугообразования и волновая динамика подвески, а частота измерений возрастает до сотен и тысяч герц. Соответственно усиливается роль бортовых FBG-комплексов, граничных вычислений и широкополосной связи 5G, без которых непрерывный мониторинг при таких скоростях технически невозможен.

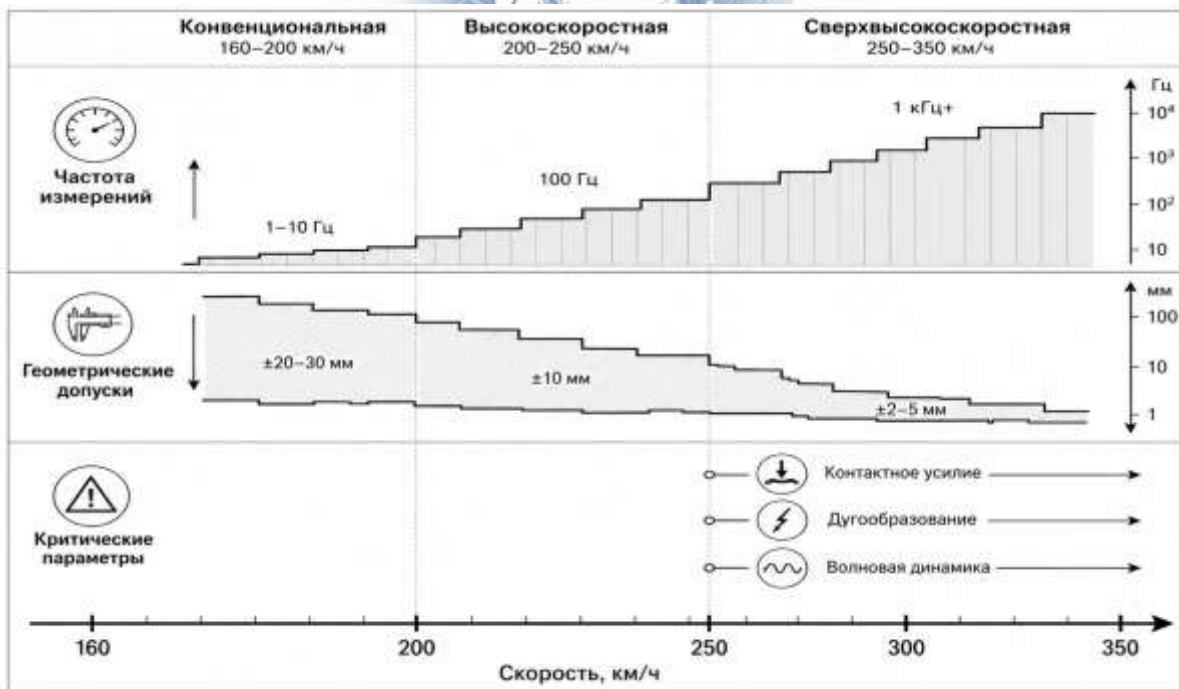


Рис. 5. Зависимость требований к IoT-мониторингу от проектной скорости линии

Возможности адаптации зарубежного опыта к условиям Узбекистана.

Железнодорожная отрасль Узбекистана последовательно развивает скоростное и высокоскоростное сообщение: электропоезда «Афросиаб» уже эксплуатируются на линии Ташкент - Самарканд - Бухара с маршрутными скоростями до 250 км/ч, реализуются проекты электрификации и модернизации направлений с перспективой повышения скоростей. Это создаёт благоприятные условия для внедрения IoT-мониторинга контактной сети. Наиболее перспективными для адаптации представляются: оснащение эксплуатационных скоростных поездов бортовыми сенсорными комплексами по опыту Франции; развёртывание стационарных IoT-узлов на наиболее ответственных участках (воздушные стрелки, сопряжения анкерных участков, искусственные сооружения) с использованием LPWAN-протоколов; поэтапное внедрение элементов предиктивной аналитики на базе накапливаемых данных.

Адаптация сопряжена с объективными ограничениями: необходимостью первоначальных инвестиций в оборудование и IT-инфраструктуру, потребностью в подготовке квалифицированных кадров и разработке нормативно-технической базы, учитывающей климатические особенности региона (высокие летние температуры, запылённость). Поэтапный подход - от пилотных проектов на отдельных скоростных участках к масштабированию на всю сеть - представляется наиболее рациональной стратегией, позволяющей минимизировать риски и накопить собственный опыт эксплуатации.

Заключение. Мировая практика убедительно подтверждает, что в условиях высокоскоростного движения IoT-системы мониторинга контактной сети становятся не вспомогательным, а необходимым инструментом обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации. Усложнение динамического взаимодействия пантографа и подвески при скоростях 300–350 км/ч предъявляет качественно более высокие требования к диагностике, которые удовлетворяются сочетанием бортовых FBG-комплексов, высокоскоростных камер и лидаров, граничных вычислений, широкополосной связи 5G, методов машинного обучения и цифровых двойников.

Ведущие железнодорожные администрации Германии, Франции, Китая и Японии демонстрируют переход от планово-предупредительного к предиктивному управлению техническим состоянием контактной сети высокоскоростных линий, что обеспечивает сокращение эксплуатационных расходов и снижение числа внеплановых отказов. Для Узбекистана, формирующего собственную высокоскоростную инфраструктуру, поэтапное внедрение апробированных зарубежных решений позволит повысить надёжность электроснабжения, обеспечить безопасность токосъёма при возрастающих скоростях и заложить технологическую основу для интеллектуального управления инфраструктурой.

Список использованной литературы:

1. Chen S., Froseth G. T., Derosa S., Lau A., Ronnquist A. Railway Catenary Condition Monitoring: A Systematic Mapping of Recent Research // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, No. 3. – P. 1023.
2. Song Y., Liu Z., Ronnquist A. et al. Contact wire irregularity stochastics and effect on high-speed railway pantograph-catenary interactions // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2020. – Vol. 69, No. 10. – P. 8196–8209.
3. Liu Z., Song Y., Han Y. et al. Advances of research on high-speed railway catenary // *Journal of Modern Transportation*. – 2022. – Vol. 26, No. 1. – P. 1–23.
4. Tan P., Chen G., Wu Z. et al. Research on a Markov Chain Based CSMA/CA Communication Mechanism of Wireless Sensor Network for High-Speed Railway Catenary // *IEEE Sensors Journal*. – 2024. – Vol. 24, No. 16. – P. 26659–26667.
5. Bruni S., Ambrosio J., Carnicero A. et al. The results of the pantograph-catenary interaction benchmark // *Vehicle System Dynamics*. – 2020. – Vol. 53, No. 3. – P. 412–435.
6. Zhang W., Zou D., Tan M. et al. Review of pantograph and catenary interaction // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – P. 325–351.
7. Pombo J., Ambrosio J. Recent developments in pantograph-catenary interaction modelling and monitoring // *Vehicle System Dynamics*. – 2023. – Vol. 61, No. 7. – P. 1754–1783.
8. Lupi C., Felli F., Ciro E. et al. Railway overhead contact wire monitoring system by means of FBG sensors // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2021. – Vol. 15, No. 57. – P. 246–258.
9. Wei X., Jiang S., Li Y. et al. Defect detection of pantograph slide based on deep learning and image processing technology // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2022. – Vol. 23, No. 2. – P. 1472–1484.
10. Teng G., Zhou C., Li C. et al. Edge computing-enabled real-time monitoring for railway catenary systems // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2024. – Vol. 11, No. 5. – P. 8934–8946.