

**АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ИОТ-СИСТЕМ
МОНИТОРИНГА КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ЗАДАННЫХ РЕЖИМАХ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ**

Амиров Султон Файзуллаевич

*Ташкентский государственный транспортный университет
д.т.н., профессор, зав. кафедры «Электроснабжения»*

Бадретдинов Тимур Наильевич

доцент кафедры «Электроснабжения»

Хожамуратов Исламбек Ниетбай угли

магистрант кафедры «Электроснабжения»

Annotation: *The article presents an analytical review of international experience in the application of IoT systems for monitoring the overhead contact network of electrified railways. It examines the architecture of sensor networks, the types of monitored parameters, data transmission and processing technologies, predictive analytics methods, and the concept of digital twins of the contact network. Special attention is given to the relationship between train operating speed regimes and the requirements for monitoring systems. A comparative analysis is conducted of solutions implemented in Germany, France, the United Kingdom, China, Japan, and Russia. The prospects for adapting foreign experience to the conditions of Uzbekistan's railway infrastructure are also assessed.*

Аннотация: *В статье представлен аналитический обзор зарубежного опыта применения ИОТ-систем для мониторинга контактной сети электрифицированных железных дорог. Рассмотрены архитектура сенсорных сетей, типы контролируемых параметров, технологии передачи и обработки данных, методы предиктивной аналитики и концепция цифровых двойников контактной сети. Особое внимание уделено взаимосвязи между режимами скорости движения поездов и требованиями к системам мониторинга. Проведён сравнительный анализ решений, применяемых в Германии, Франции, Великобритании, Китае, Японии и России. Оценены перспективы адаптации зарубежного опыта к условиям железнодорожной инфраструктуры Узбекистана.*

Keywords: *Internet of Things (IoT), overhead contact network, electrified railways, monitoring, predictive analytics, digital twin, condition-based maintenance, train operating speed regimes, sensor systems, railway infrastructure.*

Ключевые слова: *Интернет вещей (IoT), контактная сеть, электрифицированные железные дороги, мониторинг, предиктивная аналитика, цифровой двойник, техническое обслуживание по состоянию, режимы скорости движения, сенсорные системы, железнодорожная инфраструктура.*

Введение. Контактная сеть является ключевым элементом системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог, обеспечивающим непрерывную передачу электрической энергии к электроподвижному составу через токоприёмники. Надёжность функционирования контактной сети непосредственно определяет безопасность движения поездов, стабильность графика и экономическую эффективность перевозочного процесса. Любой отказ элементов контактной сети - обрыв контактного провода, нарушение геометрии подвески, деформация опорных конструкций - способен привести к длительным перерывам движения и материальным потерям.

Традиционное техническое обслуживание контактной сети строится на основе планово-предупредительной системы, предусматривающей регламентные проверки через фиксированные интервалы времени. Такой подход обладает существенными недостатками: плановые проверки не обнаруживают дефекты, возникающие в межинспекционный период; ручные обходы и рейсы вагонов-лабораторий требуют значительных трудозатрат; регламентное обслуживание зачастую приводит к необоснованной замене элементов, ещё не исчерпавших ресурс. Эти ограничения особенно ощутимы при росте скоростей движения, когда динамическое взаимодействие пантографа с контактным проводом существенно усложняется.

Осознание данной проблематики стимулировало внедрение IoT-систем (Internet of Things) в практику мониторинга контактной сети ведущих железнодорожных администраций мира. IoT-системы обеспечивают непрерывный контроль параметров в режиме реального времени, создавая основу для перехода к обслуживанию по состоянию (condition-based maintenance) и предиктивному обслуживанию (predictive maintenance). Целью настоящей статьи является аналитический обзор зарубежного опыта применения таких систем с акцентом на их роль в обеспечении эффективной эксплуатации при различных режимах скорости движения.

Значение IoT-систем для мониторинга контактной сети. IoT-технологии обеспечивают переход от дискретного контроля к непрерывному мониторингу в режиме реального времени. Стационарные и мобильные датчики формируют пространственно-распределённую сенсорную сеть, охватывающую элементы контактной подвески, опорные конструкции и токосъёмные аппараты подвижного состава. Данные автоматически поступают в центры обработки информации для выявления отклонений от нормативных значений.

IoT-системы обеспечивают корреляционный анализ данных от различных датчиков, позволяя выявлять скрытые взаимосвязи между параметрами. Например, одновременный анализ температуры, натяжения провода, его износа и контактного усилия пантографа позволяет прогнозировать момент достижения предельного состояния и оптимизировать сроки ремонта. Автоматизированный сбор данных исключает субъективность визуальных оценок и создаёт объективную базу для принятия решений по обслуживанию.



Рис. 1. Многоуровневая архитектура IoT-системы мониторинга контактной сети

Контролируемые параметры и виды датчиков.

Современные IoT-системы контролируют широкий спектр параметров контактной сети. К геометрическим параметрам относятся высота контактного провода, зигзаг, стрела провеса несущего троса и положение элементов подвески. Контроль осуществляется лазерными дальномерами, оптическими и лидарными сканерами с точностью до нескольких миллиметров.

Механические параметры включают натяжение контактного провода, контактное усилие пантографа, вибрации элементов подвески и износ провода. Для измерения натяжения применяются тензометрические датчики и волоконно-оптические сенсоры на основе решёток Брэгга (FBG), обладающие высокой чувствительностью и устойчивостью к электромагнитным помехам. Износ провода контролируется ультразвуковыми толщиномерами и оптическими профилометрами.

Электрические параметры охватывают ток нагрузки, напряжение, характеристики дугообразования и токи утечки в изоляции. Для регистрации дуг используются ультрафиолетовые детекторы и высокоскоростные камеры. Климатические параметры - температура, ветер, влажность, обледенение - контролируются метеостанциями, интегрированными в IoT-инфраструктуру. Состояние опорных конструкций контролируется акселерометрами, инклинометрами и датчиками деформации.



Рис. 2. Классификация параметров, контролируемых IoT-системой мониторинга контактной сети

Архитектура передачи, обработки и хранения данных. Передача данных от сенсорных узлов осуществляется по беспроводным каналам. Для стационарных датчиков применяются протоколы LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), обеспечивающие передачу на расстояния до нескольких километров при минимальном энергопотреблении. Для мобильных систем используются сети 4G/LTE и 5G, обеспечивающие необходимую пропускную способность.

IoT-шлюзы обеспечивают агрегацию, фильтрацию и ретрансляцию данных. Технология граничных вычислений (edge computing) позволяет выполнять первичный анализ непосредственно на месте получения данных, что критически важно для высокоскоростных линий, где задержка между обнаружением аномалии и реакцией должна составлять миллисекунды. Централизованная обработка осуществляется на облачных платформах, интегрированных с системами SCADA и ERP железнодорожных компаний.

Предиктивная аналитика и интеллектуальное обслуживание. Предиктивная аналитика основана на построении моделей деградации элементов из накопленных временных рядов. Алгоритмы машинного обучения - регрессионный анализ, случайные леса, градиентный бустинг, нейронные сети - обучаются на исторических данных, включающих записи параметров, журналы отказов и протоколы ремонтов. Обученные модели прогнозируют остаточный ресурс элементов и формируют рекомендации по объёму ремонтного вмешательства.

Алгоритмы обнаружения аномалий (anomaly detection) выявляют нехарактерные отклонения параметров, учитывая динамику, корреляции и сезонные закономерности. Это позволяет обнаруживать зарождающиеся дефекты, когда значение параметра ещё в пределах допуска, но характер изменения свидетельствует о деградации. Технологии big data обеспечивают одновременный анализ данных от тысяч сенсоров, выявляя пространственно-временные закономерности. По данным исследований, переход к предиктивному обслуживанию сокращает эксплуатационные расходы на 15-25 % и уменьшает число внеплановых отказов на 30-40 %.

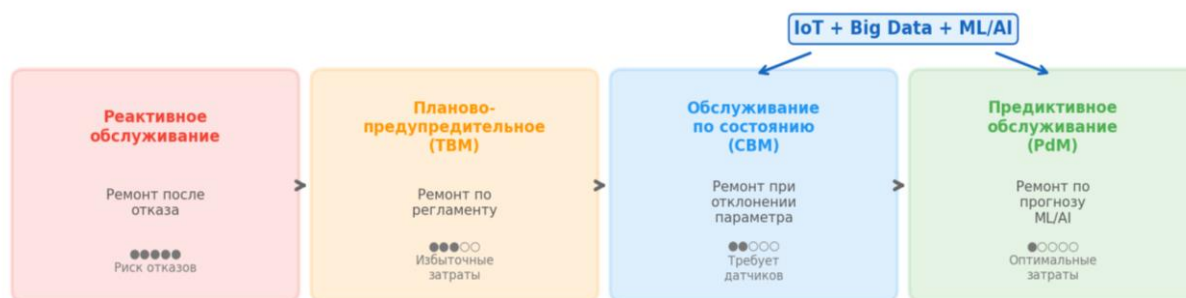


Рис. 3. Эволюция стратегий технического обслуживания контактной сети

Цифровые двойники контактной сети. Цифровой двойник (digital twin) - виртуальная модель физического объекта, непрерывно обновляемая данными от IoT-датчиков. Применительно к контактной сети это пространственная 3D-модель подвески, параметризованная актуальными данными о геометрии, механических и электрических характеристиках каждого элемента. Геометрическая модель формируется на основе лидарного сканирования (LiDAR), текущие параметры поступают от IoT-датчиков в реальном времени.

Ключевое преимущество цифрового двойника - возможность моделирования различных сценариев эксплуатации без вмешательства в работу реальной инфраструктуры. Интеграция с IoT-системой создаёт замкнутый контур управления: датчики обновляют модель, модель пересчитывает прогнозы деградации, результаты формируют планы обслуживания. Такой подход применяется компаниями Deutsche Bahn (Германия) и исследовательскими группами Технического университета Лулео (Швеция).

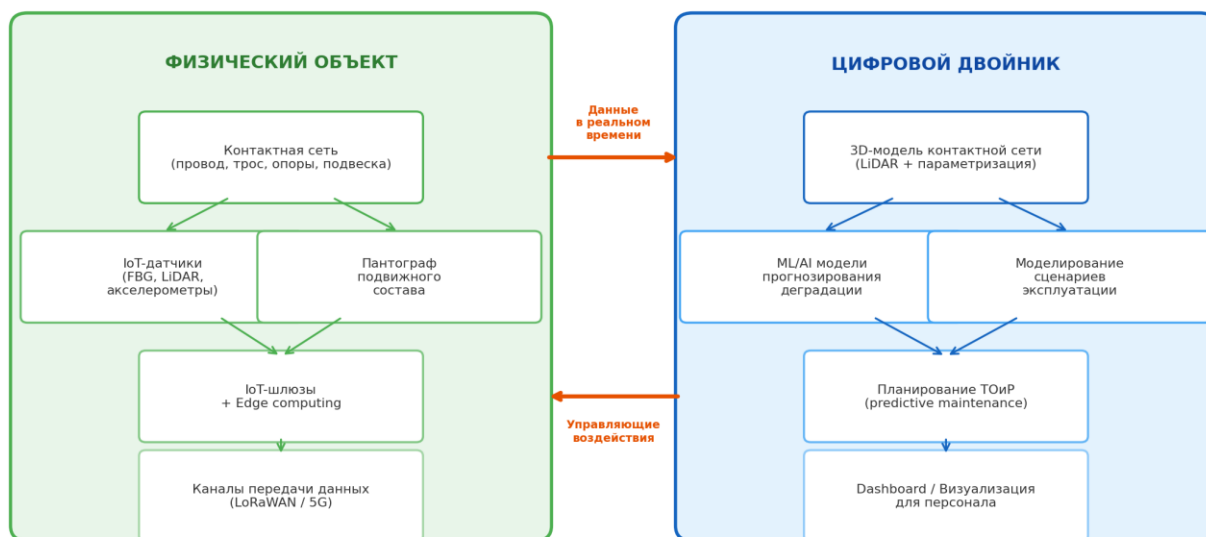


Рис. 4. Концепция цифрового двойника контактной сети с IoT-интеграцией

Зарубежный опыт применения IoT-систем мониторинга контактной сети.

Германия занимает лидирующие позиции в цифровизации железнодорожной инфраструктуры. Deutsche Bahn реализует программу Digitale Schiene Deutschland, в рамках которой на линиях ICE эксплуатируются измерительные поезда с лидарными сканерами и лазерными профилометрами, регистрирующие параметры подвески при скоростях до 300 км/ч. Системы PantoInspect контролируют состояние пантографов методом стереоскопической съёмки.

Франция (SNCF Réseau) внедряет системы на базе оптоволоконных FBG-датчиков. В рамках проекта Horizon 2020 разработаны сенсорные комплексы на пантографах эксплуатационных поездов TGV, измеряющие параметры провода с погрешностью 10-12 мм, превращая каждый поезд в передвижную диагностическую лабораторию. Великобритания (Network Rail) реализует программу Remote Condition Monitoring с IoT-узлами на базе LoRaWAN и алгоритмами ансамблевого машинного обучения для прогнозирования отказов.

Китай (China Railway), располагающий крупнейшей в мире сетью ВСМ свыше 45 000 км, эксплуатирует диагностические поезда серии CRH с комплексами датчиков для скоростей до 350 км/ч, а также тысячи стационарных камер. Данные обрабатываются алгоритмами глубокого обучения (deep learning) для автоматической классификации дефектов. Япония (JR East) использует измерительный электропоезд East-i на линиях Синкансэн, а AI-алгоритмы обработки изображений сократили объём ручных инспекций на 10 %.

Россия (ОАО «РЖД») внедряет аппаратно-программные комплексы контроля контактной сети. Вагоны-лаборатории и стационарные системы интегрированы в автоматизированную систему управления хозяйством электроснабжения (АСУЭ), обеспечивающую формирование заявок на ремонт. Опыт свидетельствует о

возможности увеличения межремонтных интервалов, однако масштаб сети и телекоммуникационные ограничения создают дополнительные вызовы.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ IoT-решений мониторинга контактной сети.

Таблица 1

Страна / система	Технологии	Параметры	Назначение	Преимущества	Ограничения
Германия / DB	LiDAR, PantoInspect, 5G, ML	Геометрия, износ, пантографы	Предиктивное обслуживание	Высокая точность, прогноз износа	Сложность интеграции
Франция / SNCF	FBG-датчики, сенсоры на пантографах	Натяжение, высота, зигзаг	Мониторинг эксплуат. поездами	Высокая частота инспекций	Стоимость оснащения
Великобритания / Network Rail	IoT-узлы, LoRaWAN, ML	Температура, вибрации, наклон опор	Дистанционный контроль	Интеграция с мониторингом пути	Ограниченный охват
Китай / CR	Камеры, deep learning, CNN	Геометрия, дуги, целостность опор	Комплексный мониторинг ВСМ	Масштаб, автоклассификация	Зависимость от госинвестиций
Япония / JR East	East-i, AI-анализ изображений	Износ, геометрия, фото элементов	Автоматизация инспекций	Точность, предиктивные модели	Низкая частота рейсов
Россия / РЖД	Вагоны-лаборатории, АСУЭ	Высота, зигзаг, износ, токи	Автоматизир. контроль и планирование	Увеличение межремонт. интервалов	Масштаб сети, связь

Влияние режимов скорости движения на требования к IoT-мониторингу. Режим скорости движения является определяющим фактором требований к системе мониторинга. При увеличении скорости возрастают динамические нагрузки на систему «пантограф - контактная подвеска»: амплитуда колебаний провода увеличивается, контактное усилие приобретает высокочастотный характер, повышается вероятность дугообразования. При скоростях свыше 300 км/ч возможны резонансные явления, создающие критические условия для токосъёма.

Для конвенциональных участков (до 160 км/ч) допустимые отклонения высоты провода составляют десятки миллиметров, а частота измерений - единицы герц. Для высокоскоростных линий допуски сужаются до единиц миллиметров, а частота измерений должна составлять сотни и тысячи герц. Это предъявляет повышенные требования к быстродействию датчиков, пропускной способности каналов связи и производительности систем обработки.

Критические параметры при высоких скоростях включают контактное усилие, характеристики дугообразования, волновую динамику подвески и интенсивность износа провода. Устойчивость передачи данных также становится проблемой: частая смена базовых станций при скорости свыше 300 км/ч приводит к прерываниям связи,

что решается применением 5G, граничных вычислений и буферизации данных на борту подвижного состава.

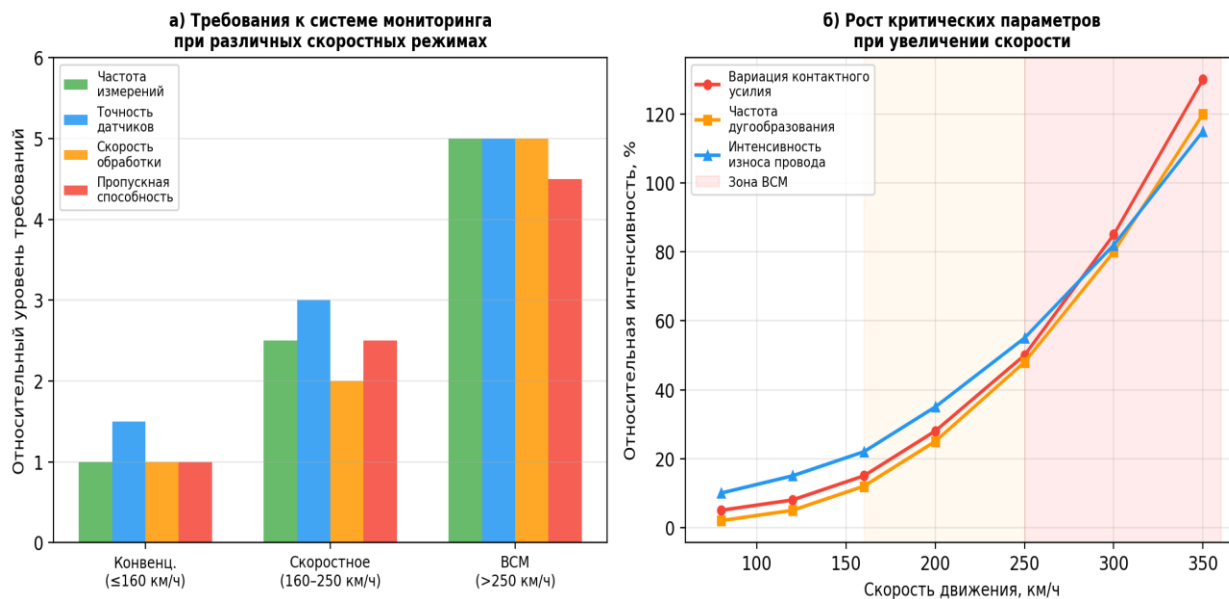


Рис. 5. Влияние режима скорости движения на требования к IoT-мониторингу контактной сети

Возможности адаптации зарубежного опыта к условиям Узбекистана. Железнодорожная отрасль Узбекистана переживает период модернизации: строительство новых электрифицированных участков, закупка современного подвижного состава, повышение скоростей движения. Наиболее перспективны для адаптации: оснащение эксплуатационных поездов сенсорными комплексами (по опыту Франции); развёртывание стационарных IoT-узлов на критических участках с использованием LPWAN-протоколов; внедрение элементов предиктивной аналитики.

Адаптация сопряжена с объективными ограничениями: необходимость первоначальных инвестиций в оборудование и IT-инфраструктуру, потребность в подготовке квалифицированных кадров, разработка нормативно-технической базы. Поэтапный подход - от пилотных проектов на отдельных участках к масштабированию на всю сеть - представляется наиболее рациональной стратегией.

Заключение. Мировая практика подтверждает высокую эффективность IoT-систем как инструмента повышения надёжности и экономичности эксплуатации контактной сети. Ведущие железнодорожные администрации последовательно внедряют сенсорные сети, платформы big data, алгоритмы машинного обучения и цифровые двойники, обеспечивая переход к предиктивному управлению техническим состоянием инфраструктуры.

Особую значимость IoT-системы приобретают при росте скоростей движения, когда динамическое взаимодействие пантографа с подвеской предъявляет качественно более высокие требования к диагностике. Для железных дорог Узбекистана, находящихся на этапе модернизации, поэтапное внедрение зарубежных решений позволит повысить

надёжность электроснабжения, обеспечить безопасность при возрастающих скоростях и заложить 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. Zschiesche K., Reiterer A. Optical Measurement System for Monitoring Railway Infrastructure - A Review // *Applied Sciences*. - 2024. - Vol. 14, No. 19. - P. 8801.
3. Tang H., Kong L., Fang Z. et al. Sustainable and smart rail transit based on advanced self-powered sensing technology // *iScience*. - 2024. - Vol. 27, No. 12. - P. 111306.
4. Lupi C., Felli F., Ciro E. et al. Railway overhead contact wire monitoring system by means of FBG sensors // *Frattura ed Integrita Strutturale*. - 2021. - Vol. 15, No. 57. - P. 246-258.
5. 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.
6. Correcher A., Ricolfe-Viala C., Tur M. et al. Hardware-in-the-Loop Test Bench for Simulation of Catenary-Pantograph Interaction with Linear Camera Measurement // *Sensors*. - 2023. - Vol. 23, No. 4. - P. 1773.
7. Stypulkowski K., Golda P., Tomaszewska J. et al. Monitoring system for railway infrastructure elements based on thermal imaging analysis // *Sensors*. - 2021. - Vol. 21, No. 11. - P. 3819.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Mariscotti A. Measuring the power quality of catenary lines for DC railway systems // *Sensors*. - 2021. - Vol. 21, No. 21. - P. 7218.
13. Hayashiya H., Watanabe Y., Fukasawa Y. et al. IoT-based condition monitoring system for railway electrical equipment // *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. - 2022. - Vol. 17, No. 3. - P. 432-440.

14. Wang H., Liu Z., Song Y. et al. Digital twin technology for railway catenary maintenance: A comprehensive review // *Railway Engineering Science*. - 2023. - Vol. 31, No. 2. - P. 148-167.
15. 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.
16. 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.
17. Pombo J., Ambrosio J. Recent developments in pantograph-catenary interaction modelling and monitoring // *Vehicle System Dynamics*. - 2023. - Vol. 61, No. 7. - P. 1754-1783.
18. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. et al. *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance*. - 3rd ed. - Publicis MCD Verlag / Wiley-VCH, 2018. - 994 p.