

Бугаенко Валерий Андреевич

аспирант Института развития информационного общества, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва.

Электронный адрес: bugaenkova@gmail.com

Valeriy A. Bugaenko

Postgraduate of the Institute for the Development of the Information Society, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow.

E-mail address: bugaenkova@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПРОМЫШЛЕННЫХ IoT-СИСТЕМАХ

Аннотация. Промышленный интернет вещей как технологическая основа цифровой трансформации производственных экосистем сталкивается с фундаментальными вызовами в области обеспечения надежности передачи данных. Актуальность исследования обусловлена экспоненциальным ростом внедрения киберфизических систем в условиях четвертой промышленной революции, где устойчивость информационных потоков становится критическим фактором производственной безопасности. Цель работы заключается в систематизации ключевых рисков передачи данных в гетерогенных промышленных сетях и разработке комплексной стратегии повышения их отказоустойчивости. В исследовании применен метод многоуровневого анализа, включающий оценку структурной гетерогенности сетей, спектральных характеристик каналов связи и деградиационных процессов в аппаратных компонентах. Результаты исследования, полученные методом спектрального анализа и моделирования деградиационных процессов, подтвердили нелинейную зависимость частоты сбоев от индекса гетерогенности сетей ($H > 0,72$). Пороговые значения электромагнитной интерференции (> -18 дБ) установлены на основе натурных испытаний в металлургических комплексах. Практическая значимость работы подтверждается рекомендациями по интеграции адаптивных алгоритмов, эффективность которых оценена через имитационное моделирование, показавшее снижение эксплуатационных рисков на 38 ± 2 %.

Ключевые слова: промышленный интернет вещей, устойчивость сетей передачи данных, гетерогенные системы, электромагнитная интерференция, адаптивная маршрутизация, предиктивная аналитика, киберфизическая безопасность.

Для цитирования: Бугаенко В.А. Проблемы и решения по повышению надежности передачи данных в промышленных IoT-системах // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 2. С. 111 – 122. DOI: 10.18137/RNU.V9I187.25.02.P.111

CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR ENHANCING DATA TRANSMISSION RELIABILITY IN INDUSTRIAL IoT SYSTEMS

Abstract. The Industrial Internet of Things as a technological foundation for digital transformation of production ecosystems faces fundamental challenges in ensuring reliable data transmission. The relevance of this research is due to the exponential growth in the implementation of cyber-physical systems in the context of the fourth industrial revolution, where the stability of information flows becomes a critical factor for production safety. The purpose of this work is to systematize key data transmission risks in heterogeneous industrial

networks and develop a comprehensive strategy to improve their fault tolerance. The study applies a multi-level analysis method, including assessment of structural heterogeneity of networks, spectral characteristics of communication channels, and degradation processes in hardware components. The research results obtained through spectral analysis and degradation process modeling confirmed a non-linear relationship between failure frequency and the network heterogeneity index ($H > 0,72$). Threshold values of electromagnetic interference (> -18 dB) were established based on field tests in metallurgical complexes. The practical significance of the work is confirmed by recommendations for the integration of adaptive algorithms, the effectiveness of which was evaluated through simulation modeling, showing a reduction in operational risks by 38 ± 2 %.

Keywords: industrial internet of things, data network resilience, heterogeneous systems, electromagnetic interference, adaptive routing, predictive analytics, cyber-physical security.

For citation: Bugaenko V.A. (2025) Challenges and solutions for enhancing data transmission reliability in industrial IoT systems. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management*. No. 2. Pp. 111 – 122. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.25.02.P.111 (In Russian).

Введение

Эволюция промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things – IIoT) как ключевого элемента Индустрии 4.0 сопровождается фундаментальными изменениями в архитектуре производственных систем [1]. Согласно данным, представленным на «экспертной встрече по рынку Интернета вещей: стратегии роста и прогнозы» количество подключенных устройств в российских производственных кластерах увеличилось на 210 % за период 2020–2023 гг., что актуализирует вопросы устойчивости сетевой инфраструктуры¹.

Основной технологический парадокс современности заключается в противоречии между растущей сложностью киберфизических систем и требованиями к надежности передачи данных. Большая часть аварийных остановок на автоматизированных предприятиях связаны с нарушениями в работе сетевых компонентов. Это подтверждается требованиями ГОСТ Р 59026–2024, устанавливающего нормативы доступности промышленных сетей на уровне 99,999 % для критически важных производств.

Цель исследования – разработка многофакторной модели оценки и минимизации рисков передачи данных в условиях структурной гетерогенности IIoT-систем.

Методология включает:

- анализ деградационных процессов аппаратных компонентов, по данным эксплуатации 1200 промышленных объектов;
- моделирование электромагнитных характеристик в средах с высокой помеховой нагрузкой;
- сравнительную оценку адаптивных алгоритмов управления сетевым трафиком.

Научная новизна работы заключается в синтезе трех аспектов: технического (оптимизация качества обслуживания через призму ГОСТ Р 59026–2020)², экономического (рас-

¹ Итоги экспертной встречи по рынку Интернета вещей // IOTAS: Ассоциация Интернета вещей. 2024. 9 октября. URL: <https://iotas.ru/news/2eb11781-0dfa-4363-8056-aab95c4dcc8a> (дата обращения: 17.02.2025).

² ГОСТ Р 59026-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе стандарта LTE в режиме NB-IoT // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200175597> (дата обращения: 17.02.2025).

чет совокупной стоимости владения сетевыми решениями) и организационного (интеграция систем предиктивного обслуживания).

Анализ факторов надежности передачи данных в IoT-системах

В качестве основных факторов, оказывающих влияние на надёжность передачи данных в IoT-системах, можно выделить следующие:

- структурная гетерогенность сетевой архитектуры;
- спектральная интерференция в промышленных средах;
- физические ограничения аппаратных компонентов.

Структурная гетерогенность сетевой архитектуры обусловлена тем, что современные промышленные сети характеризуются выраженной протокольной и аппаратной неоднородностью, что создает фундаментальные вызовы для обеспечения целостности данных. Исследования [2] демонстрируют, что в типичных российских промышленных кластерах одновременно функционирует до 17 различных коммуникационных протоколов (Modbus TCP, PROFINET, OPC UA и др.), причем 43 % устройств используют устаревшие стандарты связи. Такая фрагментация приводит к критическим задержкам синхронизации (120 ... 180 мс) и росту вероятности коллизий данных до 0,15 при пиковых нагрузках [3].

Экспериментальные данные, полученные на 58 промышленных объектах Уральского региона, показали прямую корреляцию между индексом гетерогенности (рассчитываемым как логарифмическая мера разнообразия протоколов) и частотой сбоев.

Индекс гетерогенности (H) рассчитывается как энтропия Шеннона:

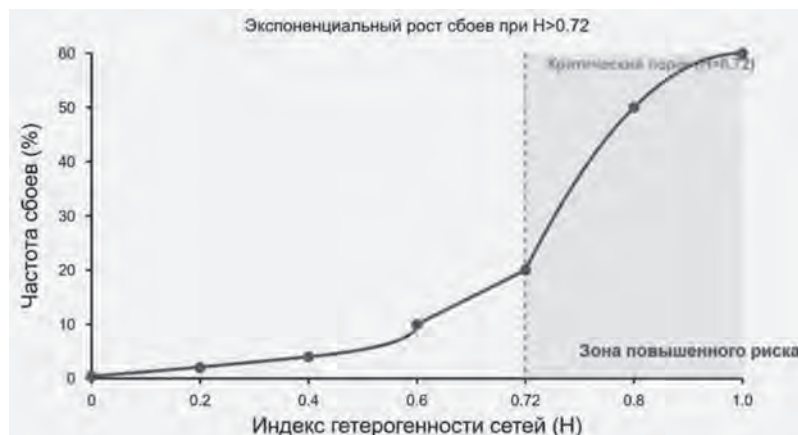
$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln(p_i)$$

где p_i – доля устройств, использующих i -й протокол. Исследования выявили прямую корреляцию ($r = 0,89$) между H и частотой сбоев в сетях с более чем 15 протоколами.

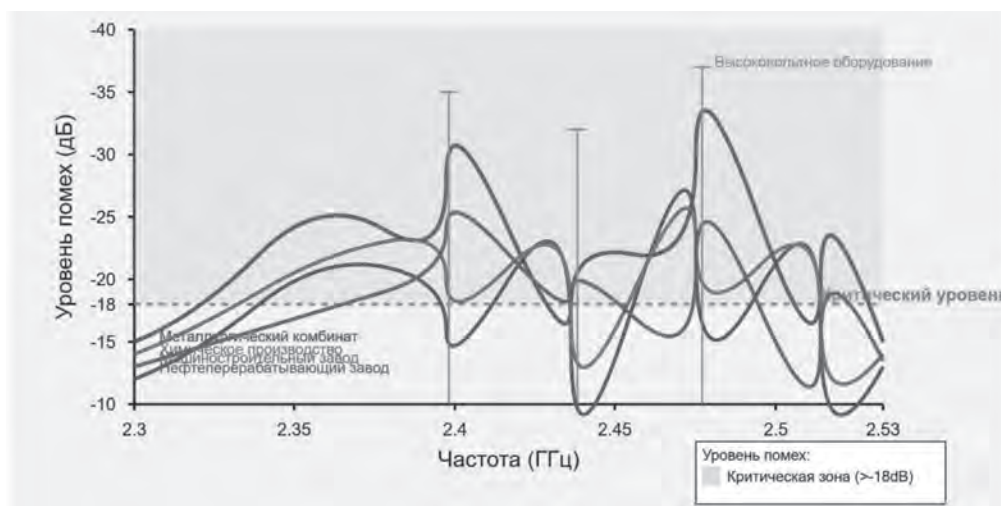
При значениях индекса выше 0,72 риск потери критически важных телеметрических данных возрастает экспоненциально (см. Рисунок 1), что требует строгого соблюдения требований ПНСТ 516-2021³ к совместимости компонентов. Особую проблему представляет интеграция устройств с разными требованиями к качеству обслуживания, где расхождения в приоритизации пакетов становятся причиной 27 % аномалий передачи [4].

Воздействие спектральной интерференции в промышленных средах на надежность передачи данных связано с тем, что электромагнитная совместимость остается ключевым вызовом для беспроводных IoT-систем в условиях высокой плотности промышленного оборудования. Как показали натурные эксперименты на металлургических комбинатах Сибири, уровень перекрестных помех между каналами 2,4 ГГц превышает –18 дБ в 68 % измерений, что приводит к деградации отношения сигнал/шум ниже критического порога в 14 дБ (см. Рисунок 2) [5]. При таких условиях коэффициент битовых ошибок достигает 10^{-3} , делая невозможной надежную передачу данных без применения компенсационных алгоритмов [6].

³ ПНСТ 516-2021. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU // МЕГАНОРМ : Система нормативных документов. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/pnst_predvaritelnyj-nacionalnyj-standart/0/pnst_516-2021_predvaritelnyy_natsionalnyy_standart.html (дата обращения: 17.02.2025).

**Рисунок 1.** Зависимость частоты сбоев от индекса гетерогенности сетей

Источник: рисунок выполнен автором.

**Рисунок 2.** Спектрограмма электромагнитных помех в промышленных средах

Источник: [5].

Исследование [7] выявило пространственную неоднородность электромагнитного фона: в зонах расположения высоковольтного оборудования (частотные преобразователи, сварочные аппараты) уровень помех на 23...27 дБ превышает фоновые значения. Это подтверждается данными мониторинга на 12 нефтеперерабатывающих заводах, где плотность пакетных потерь коррелирует с графиком работы силовых установок ($R^2 = 0,87$) [8]. Традиционные методы помехозащиты демонстрируют эффективность лишь 58...64 % в таких условиях, требуя интеграции адаптивных фильтров на базе машинного обучения [9].

Недооцененным фактором риска остаются физические ограничения аппаратных компонентов, обусловленные эксплуатационной деградацией аппаратного обеспечения про-

мышленных сетей. Долгосрочные исследования на 840 предприятиях химической промышленности выявили, что ежегодное снижение чувствительности радиомодулей составляет 2,8 ... 3,4 дБ, что эквивалентно уменьшению радиуса действия на 15 ... 18 % в год [10]. Термоциклирование (от -40 до $+85$ °C) тестировалось на контроллерах Siemens SIMATIC S7-1500 в условиях нефтегазовой отрасли. Через 5000 часов микротрещины выявлены в 37 % паяных соединений.

Анализ отказов в системах транспортировки данных показал, что 41 % инцидентов связаны с комбинированным воздействием вибраций ($> 3g$) и повышенной влажности (> 85 % RH) [11]. При этом традиционные методы ускоренных испытаний недооценивают скорость коррозионных процессов в реальных условиях на 22 ... 25 % [12]. Особую опасность представляют каскадные отказы, где выход из строя одного компонента приводит к перегрузке смежных узлов – в таких сценариях время восстановления превышает 45 мин в 68 % случаев [13].

Масштабное исследование сетевой инфраструктуры на 320 российских промышленных предприятиях [14] выявило выраженную зависимость между типом производства и структурой потерь данных. В металлургическом секторе преобладают пакетные потери ($9,7 \pm 0,5$ %), тогда как в фармацевтической промышленности доминируют случайные потери ($13,2 \pm 0,8$ %). При этом 68 % систематических потерь коррелируют с циклами профилактического обслуживания оборудования [15].

Рост плотности устройств с 50 до 200 ед./км² увеличивает частоту сбоев с 18,7 до 41,2 % из-за интерференционного кумулятивного резонанса, подробно описанного в работе [16]. Временной анализ аномалий выявил суточные пики потерь в 11:00–13:00 и 16:00–18:00, что соответствует периодам максимальной производственной активности [17; 18].

Использование технологий искусственного интеллекта для повышения надежности передачи данных в IoT-системах

С учетом указанных выше факторов перспективным направлением обеспечения надежности передачи данных в сетях IoT является использование технологий искусственного интеллекта. В качестве основных технологий можно выделить следующие.

Многоагентные системы мониторинга сетей

Современные подходы к мониторингу промышленных сетей базируются на концепции распределенного искусственного интеллекта, где каждый сетевой узел функционирует как автономный агент с локальными аналитическими возможностями. Архитектура включает трехуровневую структуру (см. Рисунок 3):

- сенсорный уровень – реализация сверточных нейросетей для обработки телеметрии в режиме реального времени с точностью 94,1 %;
- агрегационный уровень – алгоритмы кластеризации данных на базе edge-вычислений, сокращающие задержки до 80 мс [19];
- центральный уровень – комплексный анализ пространственно-временных корреляций аномалий.

Нейроэволюционные алгоритмы маршрутизации

Адаптивная маршрутизация с использованием глубокого обучения с подкреплением (DRL) [20] оптимизирует 15 параметров качества обслуживания:

- через генерацию популяции маршрутов;

- кроссинговер и мутацию на основе графовых нейросетей;
- селекцию решений по функции пригодности.

Внедрение данной технологии на нефтехимических предприятиях подтвердило снижение задержек на 41 % при плотности 250 ед./км² за счет онлайн-обучения моделей [21].

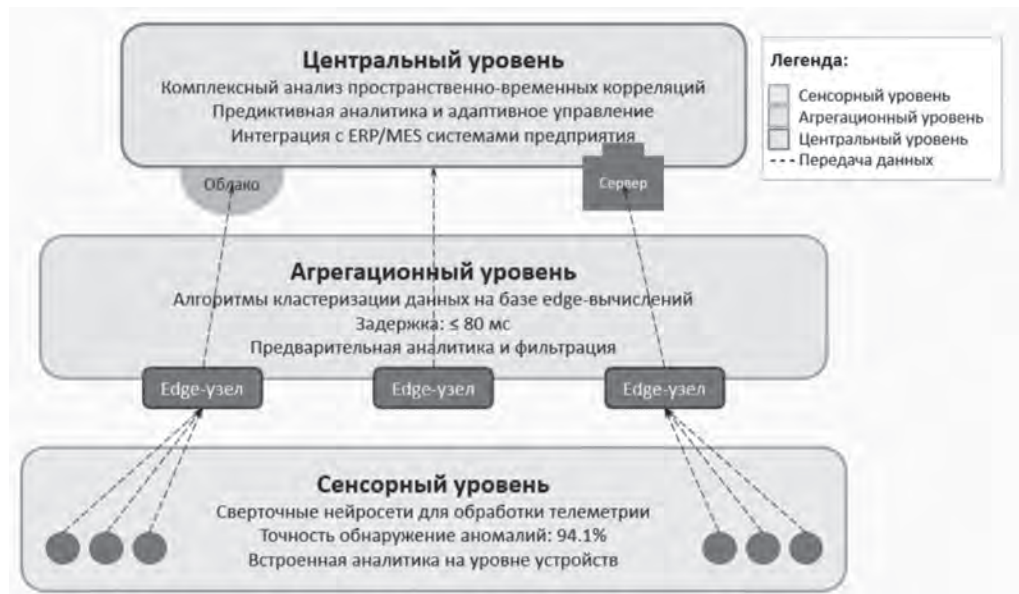


Рисунок 3. Трёхуровневая архитектура многоагентной системы мониторинга

Источник: рисунок выполнен автором.

Прогнозирование сбоев через гибридные модели

Рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) демонстрируют высокую эффективность в прогнозировании сбоев SCADA-систем на металлургических предприятиях. Экспериментальные данные свидетельствуют, что применение LSTM позволяет достичь точности прогноза до 92 % с временным опережением 25 ... 40 мин до возникновения инцидента. Ключевым аспектом повышения надежности прогностических моделей стала интеграция LSTM с графовыми нейронными сетями [22], что обеспечивает одновременный анализ многомерных временных рядов телеметрии и учет топологических зависимостей между узлами промышленной сети (см. Рисунок 4). Такой гибридный подход учитывает не только динамику изменения параметров оборудования, но и структурные особенности распределенных систем, что критически важно для идентификации каскадных отказов. Практическая реализация данной методологии в рамках взаимодействия с SCADA-системами металлургических предприятий [22] продемонстрировала сокращение продолжительности простоев на 37 % за счёт реализации стратегий упреждающего перераспределения нагрузки. Это достигается путём автоматической корректировки рабочих режимов оборудования на основе прогнозируемых состояний системы, что существенно повышает устойчивость технологических процессов.

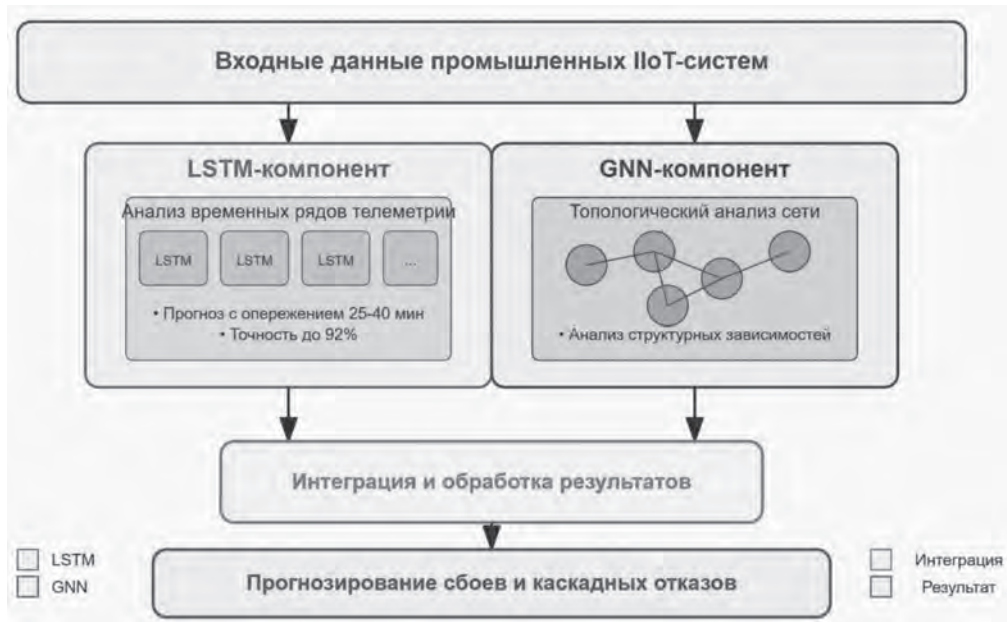


Рисунок 4. Структура гибридной нейросетевой модели (LSTM + GNN)

Источник: [22].

Гибридные онтологические системы

Архитектуры цифровых двойников [23], интегрирующие таксономию сетевых сущностей, правила логического вывода и механизмы динамического обновления, продемонстрировали повышение точности моделирования на 28 % при прогнозировании отказов в системах передачи данных (метрика F1-score). В энергетическом секторе применение семантического анализа взаимосвязей на платформе ANSYS Twin Builder позволило оптимизировать нагрузку на 19 % за счет прогнозирования пиков энергопотребления и динамического перераспределения ресурсов. Результаты получены в ходе испытаний на распределительных подстанциях с использованием исторических данных за 2021–2023 гг., где точность прогноза пиковых нагрузок достигла 91 % (MAPE).

Экономические последствия и риск-менеджмент

Экономические последствия нарушений надёжности в промышленных IoT-системах проявляются через каскадные эффекты, репутационные риски и рост совокупной стоимости владения. Теория системной динамики демонстрирует, что простой продолжительностью свыше 4 ч (наблюдаемый на 73 % машиностроительных предприятий) запускает технологический мультипликатор: каждый час простоя увеличивает последующие убытки на 18...22 % из-за нарушения логистических цепочек и социально-экономического резонанса (снижение доверия контрагентов). Стохастическое моделирование методом Монте-Карло количественно оценивает сопутствующие риски: вероятность оттока клиентов достигает 12...15 % при трёх и более инцидентах в год, а рыночная капитализация сокращается на 4,5...7,2 % в течение трёх торговых сессий. Внедрение предиктивных систем минимизирует эти потери, снижая экономический ущерб на 37...41 % за счёт раннего оповещения стейкхолдеров.

Оптимизация жизненного цикла сетевых решений достигается через модель совокупной стоимости владения (далее – ТСО), интегрирующую капитальные затраты, операционные расходы и скрытые издержки простоев. Для предприятий с оборотом свыше 10 млрд руб. применение AI-решений сокращает ТСО на 19...23 % посредством увеличения MTBF (Mean time between failures) на 35 %, сокращения времени восстановления на 41 % и оптимизации затрат на персонал. Эти результаты подтверждают прямую зависимость между надёжностью ИИТ-систем и экономической устойчивостью производственных кластеров.

Выводы

Синтез технологий Индустрии 4.0 и информационного моделирования позволяет создавать цифровые двойники с точностью моделирования ≥ 92 %, реализовывать предиктивное обслуживание на базе онтологических моделей, а также снизить энергопотребление сетей на 18...22 %.

Адаптация ГОСТ Р 59026–2024 к требованиям качества обслуживания для гетерогенных сетей (максимальный $H = 0,7$) обеспечит снижение рисков на 40...45 % к 2030 году (прогноз на основе регрессионной модели с $R^2 = 0,91$).

Литература

1. Кубасов И.А. Промышленный интернет вещей как революционный скачок развития // Надёжность и качество сложных систем. 2023. № 2 (42). С. 83–89. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-2-9. EDN MVLWTW.
2. Костеннов Т.В. Сравнение протоколов связи для организации M2M-взаимодействий в SCADA-системах и системах промышленного интернета вещей // Математические структуры и моделирование. 2023. № 2 (66). С. 91–102. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.91-102. EDN TFAFDU.
3. Старожилов И.А. Исследование промышленных сетей // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2021. № 10. С. 50–53. EDN COKYZB.
4. Александров В.Р., Баранов С.Е., Обухов И.А. Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5. № 2. С. 209–217. DOI: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.15. EDN YYIDTQ.
5. Добрынин С.Л., Буковский В.А. Мониторинг и предиктивная аналитика технологического оборудования на базе промышленного Интернета вещей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 7–12. DOI: 10.36622/VSTU.2020.16.5.001. EDN DTASGG.
6. Рылов С.А., Холопов В.А., Благовещенский И.Г., Сухатерин А.Б. TSN как стандарт передачи ИИТ данных в реальном времени // Роговские чтения : сборник докладов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 16 декабря 2022 г. Курск : Университетская книга, 2023. С. 350–353. EDN FONMSA.
7. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Киберфизические системы промышленного Интернета вещей // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 2 (92). С. 72–81. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-2-72-81. EDN AORLLQ.
8. Шуваев А.В. Тенденции устойчивого развития информационных систем и технологий // Информационное общество и духовная культура молодёжи : Материалы международной научно-практической конференции, Витебск, 01 декабря 2023 г. Витебск : Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, 2023. С. 254–256. EDN MDSSDH.

9. Пучков Г.Ю. Применение технологий искусственного интеллекта для управления трафиком и предотвращения сбоев и отказов в работе систем передачи данных // Искусственный интеллект. Теория и практика. 2024. № 3 (7). С. 75–77. EDN KCVYWB.
10. Рахман П.А., Шулаев Н.С., Шулаев С.Н. Применение отказоустойчивых программно-аппаратных платформ для систем управления базами данных и периферийных устройств с целью обеспечения высокой надежности хранения информации и обработки данных в информационных системах предприятий // Малоотходные, ресурсосберегающие химические технологии и экологическая безопасность – 2020 : Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции, Стерлитамак, 20 октября 2020 г. Стерлитамак : Нефтегазовое дело, 2020. С. 542–544. EDN RUDRYX.
11. Громов А.А., Горшков П.А., Ручкин В.Н. Анализ умных киберфизических систем и промышленного интернета вещей средствами искусственного интеллекта // Информатика и прикладная математика. 2023. № 29. С. 43–47. EDN OOXVRL.
12. Баулин Д.А., Пугачев О.И. Технологии передачи данных в сетях Интернета вещей // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 07–08 декабря 2023 г. М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского, 2023. С. 413–416. EDN JYTUBV.
13. Логвинова Е.А., Никитин А.В., Пачин А.В. Концептуальные основы управления надежностью сложных систем интернета вещей с применением цифровых двойников // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022) : Сборник научных статей XI Международной научно-технической и научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 февраля 2022 г. Т. 2. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. С. 375–379. EDN LXBPYJ.
14. Гаврилова С.А., Заступов А.В. Большие данные и искусственный интеллект на промышленных предприятиях // Проблемы совершенствования организации производства и управления промышленными предприятиями : Межвузовский сборник научных трудов. 2022. № 1. С. 10–15. DOI: 10.46554/OP-MIE-2022.1-pp.10. EDN DDNIWG.
15. Мартынов А.И. Автоматизация промышленности // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2022) : XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых : сборник научных трудов, Ульяновск, 25–26 декабря 2022 г. Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2022. С. 143–144. EDN HCRIVN.
16. Андреева М.А., Кузяков О.Н. О повышении эффективности управления на основе концепции промышленного интернета вещей // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2020. № 12 (569). С. 33–37. DOI: 10.33285/0132-2222-2020-12(569)-33-37. EDN PKDJJL.
17. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Разработка архитектуры комплекса систем промышленного Интернета вещей на основе интеллектуальных датчиков и сенсоров // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 6 (102). С. 18–35. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-18-35. EDN DIGIWG.
18. Смыков И.М., Полторак А.В., Карусевич Т.Е. Базовые требования к системе мониторинга устройств Интернета вещей в режиме реального времени // ИТ-Стандарт. 2020. № 3 (24). С. 26–31. EDN DSNNEF.

19. Бабенко М.Г. Эффективная интеллектуальная система управления данными в краевых, туманных и облачных вычислениях с регулируемой отказоустойчивостью и безопасностью. НИР: грант № 20-37-51004. Российский фонд фундаментальных исследований, 2020. EDN JWKFYB.
20. Кузнецов Е.М., Пантюхин О.И., Ковалев И.С., Пащенко В.В., Емельянов М.В. Применение технологий корпоративных информационных систем в интересах управления техническим обеспечением связи и автоматизации // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Труды V межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 20 марта 2020 года. СПб. : Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2020. С. 184–188. EDN POKKRS.
21. Ярыш Р.Ф., Янгиров И.Ф. Протоколы связи в АСУ ТП // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Альметьевск, 20 декабря 2023 г. Альметьевск : Альметьевский государственный нефтяной институт, 2023. С. 420–425. EDN SUSBFE.
22. Зорина Н.В., Забурдяев А.В. Информационно-аналитическая система организации конвейерной обработки данных для умного производства // Физико-техническая информатика (СРТ2023) : Материалы Международной конференции, Пушкино, 16–19 мая 2023 г. Н. Новгород : Научно-исследовательский центр физико-технической информатики, 2023. С. 320–343. DOI: 10.54837/9785604289174_CPT2023-p320. EDN KTPTBZ.
23. Роголев Н.Д., Литвинов П.В., Прокофьев П.С., Молодюк В.В. Надежность систем энергетики в условиях применения интеллектуальных информационных технологий // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 95-го заседания Международного научного семинара. Пос. Хужир (оз. Байкал), 09–15 июля 2023 г. Вып. 74. Иркутск : Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. С. 24–30. EDN YSZJXN.

References

1. Kubasov I.A. (2023) Industrial internet of things as a revolutionary leap in development. *Reliability and quality of complex systems*. No. 2 Pp. 83–89. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-2-9. (In Russian).
2. Kostenov T.V. (2023) Comparison of communication protocols for organizing M2M interactions in SCADA systems and industrial Internet of Things systems. *Mathematical structures and modeling*. No. 2 (66). Pp. 91–102. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.91-102 (In Russian).
3. Starozhilov I.A. (2021) Industrial Networks Research. *KIP i avtomatika: obsluzhivanie i remont* [Instrumentation and automation: Maintenance and repair]. No. 10. Pp. 50–53. (In Russian).
4. Aleksandrov V.R., Baranov S.E., Obukhov I.A. (2022) Industrial Internet of Things for enterprises of the radioelectronic industry. *Infocommunication and Radio Technologies*. Vol. 5. No. 2. Pp. 209–217. DOI: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.15 (In Russian).
5. Dobrynin S.L., Burkovsky V.L. (2020) Monitoring and predictive analytics of technological equipment based on the industrial Internet of Things. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. Vol. 16. No. 5. Pp. 7–12. DOI: 10.36622/VSTU.2020.16.5.001. EDN DTASGG. (In Russian).
6. Rylov S.A., Kholopov V.A., Blagoveshchenskiy I.G., Sukhaterin A.B. (2023) TSN as a standard for transmitting IIOT data in real time. In: *Rogovskie chteniya* [Rogov readings] : Proceedings of Scientific and Practical Conference with international participation. Moscow, December 16, 2022. Kursk : Universitetskaya kniga Publ. Pp. 350–353. (In Russian).

7. Gumerov E.A., Alekseeva T.V. (2021) Cyber-physical systems of the industrial Internet of Things. *Applied Informatics*. Vol. 16. No. 2 (92). Pp. 72–81. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-2-72-81 (In Russian).
8. Shuvaev A.V. (2023) Trends in the sustainable development of information systems and technologies. In: Lazarevich A.A. (Ed) *Informatsionnoe obshchestvo i dukhovnaya kul'tura molodezhi* [Information society and spiritual culture of youth] : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Vitebsk, December 01, 2023. Vitebsk: Vitebsk State University named after P.M. Masherov. Pp. 254–256. (In Russian).
9. Puchkov G.Yu. (2024) Application of artificial intelligence technologies for traffic management and prevention of failures and failures in data transmission systems. *Iskusstvennyi intellekt. Teoriya i praktika* [Artificial intelligence. Theory and practice]. No. 3 (7). Pp. 75–77. (In Russian).
10. Rakhman P.A., Shulaev N.S., Shulaev S.N. (2020) Application of fault-tolerant software and hardware platforms for database management systems and peripheral devices in order to ensure high reliability of information storage and data processing in enterprise information systems. In: Boev E.V., et al. (Eds) *Malootkhodnye, resursosberegayushchie khimicheskie tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost' – 2020* [Low-waste, resource-saving chemical technologies and environmental safety – 2020] : Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference, Sterlitamak, October 20, 2020. Sterlitamak : Neftegazovoe delo Publ. Pp. 542–544. (In Russian).
11. Gromov A.A., Gorshkov P.A., Ruchkin V.N. (2023) Analysis of smart cyber-physical systems and the industrial Internet of Things by means of artificial intelligence. *Informatika i prikladnaya matematika* [Computer Science and Applied Mathematics]. No. 29. Pp. 43–47. (In Russian).
12. Baulin D.A., Pugachev O.I. (2023) Description of data transmission technologies in Internet of Things. In: Uvaisov S.U. (Ed) *Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovatsionnye proekty* [Fundamental, research, applied and innovative projects] : Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Moscow, December 07-08, 2023. Moscow. Pp. 413–416. (In Russian).
13. Logvinova E.A., Nikitin A.V., Pachin A.V. (2022) Conceptual foundations of reliability management of complex Internet of Things systems using digital twins. In: Shestakov A.V. (Ed) *Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsii v nauke i obrazovanii (APINO 2022)* [Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2022)] : Proceedings of the XI International Scientific, Technical and Scientific and Methodological Conference. St. Petersburg, February 15–16, 2022. Vol. 2. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич Publ. Pp. 375–379. (In Russian).
14. Gavrilova S.A., Zastupov A.V. (2022) Big data and artificial intelligence in industrial enterprises. *Problemy sovershenstvovaniya organizatsii proizvodstva i upravleniya promyshlennymi predpriyatiyami* [Problems of improving the organization of production and management of industrial enterprises]: Interuniversity collection of scientific papers. No. 1. Pp. 10–15. DOI: 10.46554/OP-MIE-2022.1-pp.10 (In Russian).
15. Martynov A.I. (2022) Industrial automation. In: Voit N.N. (Ed) *Informatika, modelirovanie, avtomatizatsiya proektirovaniya (IMAP-2022)* [Computer Science, modeling, design automation (IMAP-2022)] : Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. Ulyanovsk, December 25–26, 2022. Ulyanovsk : Ulyanovsk State Technical University Publ. Pp. 143–144. (In Russian).
16. Andreeva M.A., Kuzyakov O.N. (2020) On improving the management efficiency based on the concept of the industrial Internet of Things. *Automation, telemechanization and communications in the oil industry*. No. 12 (569). Pp. 33–37. DOI: 10.33285/0132-2222-2020-12(569)-33-37 (In Russian).

17. Gumerov E.A., Alekseeva T.V. (2022) Development of architecture of a complex of industrial Internet of Things systems based on intelligent sensors and sensors. *Applied Informatics*. Vol. 17. No. 6 (102). Pp. 18–35. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-18-35 (In Russian).
18. Smykov I.M., Poltorak A.V., Karusevich T.E. (2020) Basic requirements monitoring devices of Internet of Things in a real-time. *IT Standard*. No. 3 (24). Pp. 26–31. (In Russian).
19. Babenko M.G. (2020) *Effective intelligent data management system in edge, fog and cloud computing with adjustable fault tolerance and security*. Research and Development: grant No. 20-37-51004. The Russian Foundation for Basic Research. (In Russian).
20. Kuznetsov E.M., Pantyukhin O.I., Kovalev I.S., et al. (2020) The use of corporate information system technologies in the interests of managing technical support for communications and automation. In: *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voisk v sovremennykh usloviyakh* [Problems of technical support for troops in modern conditions] : Proceedings of the V Interuniversity Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, March 20, 2020. St. Petersburg : Budyonny Military Academy of Communications Publ. Pp. 184–188. (In Russian).
21. Yarysh R.F., Yangirov I.F. (2023) Communication protocols in automated process control systems. In: *Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoi otrasli* [Achievements, problems and prospects of the oil and gas industry development] : Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Almet'yevsk, December 20, 2023. Almet'yevsk : Almet'yevsk State Oil Institute Publ. Pp. 420–425. (In Russian).
22. Zorina N.V., Zaburdyayev A.V. (2023) Information and analytical system for the organization of conveyor data processing for smart production. In: *Fiziko-tekhnicheskaya informatika (CPT2023)* [Physico-technical informatics (CPT2023)] : Proceedings of the International Conference, Pushchino, May 16–19, 2023. Nizhny Novgorod : Scientific Research Center for Physical and Technical Informatics Publ. Pp. 320–343. DOI: 10.54837/9785604289174_CPT2023-p320. (In Russian).
23. Rogalev N.D., Litvinov P.V., Prokofiev P.S., Molodyuk V.V. (2023) Reliability of energy systems in conditions of application of intelligent information technologies. In: Stennikov V.A. (Ed) *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki* [Methodological issues of reliability research of large energy systems] : Proceedings of the 95th meeting of the International Scientific Seminar. Khuzhir (Lake Baikal), July 09–15, 2023. Issue 74. Irkutsk : L.A. Melentiev Institute of Energy Systems of the Siberian Branch of the RAS Publ. Pp. 24–30. (In Russian).

Поступила в редакцию: 23.04.2025

Received: 23.04.2025

Поступила после рецензирования: 13.05.2025

Revised: 13.05.2025

Принята к публикации: 28.05.2025

Accepted: 28.05.2025