

УДК 621.311.6:004.942+005.521
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-66-71

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.М. Фукс, А.Н. Козлов

Аннотация. Выполнен обзор методов сбора и анализа данных, характеризующих режимы работы основного оборудования электроэнергетических систем. Использование этой информации для моделирования виртуальных реплик энергетического оборудования (цифровых двойников) обеспечивает комплексную оценку состояния электрических машин и аппаратов в режиме реального времени. Такой подход позволит в перспективе перейти к предиктивному обслуживанию, снижая вероятность отказов и усиливая надёжность работы энергокомплексов. Приведены примеры использования многофункциональных сенсорных систем для контроля состояния турбогенераторов, трансформаторов и высоковольтного оборудования. Показано, что оптимизация ремонтов трансформаторов и генераторов за счет перехода к предиктивному обслуживанию дает сокращение операционных расходов на 20–25 %. Оговорены ограничения и перспективы интеграции цифровых технологий в энергетический сектор для обеспечения устойчивого энергопотребления, минимизации аварий и цифровизации в реалиях российского энергетического комплекса.

Ключевые слова: цифровые системы; датчики непрерывного контроля; высоковольтное оборудование; предиктивная аналитика.

ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ЖАБДУУЛАРДЫ ДИАГНОСТИКАЛООНУН ЖАНА МОНИТОРИНГИНИН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫК СИСТЕМАЛАРЫ

А.М. Фукс, А.Н. Козлов

Аннотация. Макалада электр энергетикалык системалардын негизги жабдууларынын иштөө режимдерин мүнөздөөчү маалыматтарды чогултуу жана талдоо методдорунан сереп салынды. Энергетикалык жабдуулардын виртуалдык көчүрмөлөрүн (санариптик эгиздерди) моделдөө үчүн бул маалыматтарды колдонуу электрдик машиналардын жана аппараттардын абалына реалдуу убакыт режиминде комплекстүү баа берүүнү камсыздайт. Мындай мамиле келечекте предиктивдүү (болжолдуу) тейлөөгө өтүүгө мүмкүндүк берип, бузулуулардын ыктымалдуулугун төмөндөтөт жана энергокомплексстердин ишинин ишенимдүүлүгүн жогорулатат. Турбогенераторлордун, трансформаторлордун жана жогорку чыңалуудагы жабдуулардын абалын көзөмөлдөө үчүн көп функциялуу сенсордук системаларды колдонуунун мисалдары келтирилген. Предиктивдүү тейлөөгө өтүүнүн эсебинен трансформаторлорду жана генераторлорду оңдоону оптималдаштыруу операциялык чыгымдарды 20–25 %га кыскарта тургандыгы көрсөтүлдү. Энергетика секторуна санариптик технологияларды интеграциялоонун чектөөлөрү жана келечеги туруктуу энергия керектөөнү камсыздоо, аварияларды минималдаштыруу жана Россиянын энергетикалык комплексинин реалдуулугунда санариптештирүү үчүн каралды.

Түйүндүү сөздөр: санариптик системалар; үзгүлтүксүз көзөмөлдөө датчиктери; жогорку чыңалуудагы жабдуулар; предиктивдүү аналитика.

INTELLIGENT SYSTEMS FOR DIAGNOSTICS AND MONITORING OF POWER EQUIPMENT

A.M. Fuks, A.N. Kozlov

Abstract. This article provides a review of methods for collecting and analyzing data characterizing the operating modes of key equipment in electric power systems. Using this information to model virtual replicas of power equipment (digital

twins) provides a comprehensive assessment of the condition of electrical machines and devices in real time. This approach will ultimately enable a transition to predictive maintenance, reducing the likelihood of failures and increasing the reliability of power complexes. Examples of using multifunctional sensor systems to monitor the condition of turbogenerators, transformers, and high-voltage equipment are provided. It is shown that optimizing transformer and generator repairs through the transition to predictive maintenance reduces operating costs by 20–25 %. The limitations and prospects for integrating digital technologies into the energy sector are discussed to ensure sustainable energy consumption, minimize accidents, and digitalize the Russian energy sector.

Keywords: digital systems; continuous monitoring sensors; high-voltage equipment; predictive analytics.

Введение. Современная энергетическая инфраструктура отличается высокой технической сложностью и интеграцией процессов. Надежность работы оборудования, включая генераторы, трансформаторы и распределительные сети, определяет стабильность всей электроэнергетической системы [1]. В этих условиях необходимы интеллектуальные системы для непрерывного мониторинга, диагностики отклонений и прогнозирования аварий, что минимизирует риски и потери.

Развитие сенсорных технологий, сети датчиков с возможностью обмена информацией (IoT) и программ обработки больших массивов данных позволяет анализировать результаты и предлагать рекомендации в реальном времени. Интеграция машинного обучения и предиктивной аналитики повышает точность выявления дефектов. Для анализа этих подходов в статье использованы методы систематизации источников, описанные ниже.

Методы исследования. Используются материалы нескольких источников, включая обзорные статьи из журналов, кейсы внедрения от Siemens [2], GE Vernova [3] и EDF Energy [4, 5], а также официальные доклады Минэнерго РФ и программы «Цифровая экономика» [6–11]. Отбор проводился по критериям актуальности и наличия эмпирических данных, что обеспечило комплексное решение задач, упомянутых во введении. Применён сравнительный метод для оценки традиционных и интеллектуальных систем по характеристикам (сбор данных, диагностика, прогнозирование). Качественный анализ включал синтез данных из кейсов для выявления трендов (например, снижение простоев). Для экономической оценки использованы ключевые показатели (KPI): среднее время наработку на отказ (MTBF), время восстановления (MTTR), операционные расходы (OPEX) [2]. Это позволило обосновать эффективность технологий, которые детально рассмотрены ниже.

Теоретические основы интеллектуальных систем. Цифровые системы мониторинга и диагностики энергетического оборудования обеспечивают переход к предиктивным моделям эксплуатации, минимизируя простои высоковольтной аппаратуры. Они интегрируют сенсорные сети с алгоритмами машинного обучения, такими как сверточные нейронные сети (CNN) для вибрационного анализа и рекуррентные сети (LSTM) для обработки временных рядов данных о температуре и нагрузках турбогенераторов [4]. Это повышает эффективность диагностики, оптимизируя показатели MTBF и снижая OPEX до 40 % за счёт раннего выявления аномальных состояний [2].

Цифровые двойники формируют виртуальные реплики энергетического оборудования, моделируя его состояние через цифровую репликацию и интеграцию данных с датчиков. Например, для силовых трансформаторов применяется термографическая диагностика для выявления перегрева обмоток, тогда как гидрогенераторы и турбогенераторы анализируются через вибрационный мониторинг, учитывающий нагрузки от кавитации и дисбаланса роторов. Такой подход охватывает широкий спектр оборудования, включая распределительные сети, обеспечивая комплексную оценку состояния с использованием различных датчиков для оптимизации надежности и предотвращения аварийных (реактивных) отказов. Интеграция IoT с устройствами распределенных вычислений (edge-вычислениями) обеспечивает локальную обработку данных по протоколу MQTT (легковесный протокол передачи сообщений, оптимизированный для IoT), снижая задержки и повышая точность прогнозирования. Однако теоретические ограничения включают зависимость от качества датчиков и сложность адаптации устаревших систем, что требует вложения значительных ресурсов.

Эти принципы подчёркивают эволюцию от реактивного к предиктивному обслуживанию, значительно усиливая надёжность работы энергокомплексов. Далее рассмотрены практические методы мониторинга, основанные на этих концепциях.

Методы и технологии мониторинга. Мониторинг энергетического оборудования включает использование многофункциональных сенсорных систем. Для силовых трансформаторов применяются термопары и инфракрасные датчики для термографической диагностики перегрева элементов конструкции, тогда как гидрогенераторы и турбогенераторы оснащаются акселерометрами и пьезоэлектрическими датчиками для вибрационного анализа, выявляющего влияние кавитации и наличие дисбаланса роторов. Технологии передачи и обработки данных опираются на архитектуру IoT с интеграцией edge-вычислений. Архитектура такой системы мониторинга приведена на рисунке 1.

Согласно рисунку 1, данные с датчиков о состоянии оборудования (например, шум, вибрация, параметры оборудования и т. д.) собираются и передаются через протокол MQTT. На уровне edge осуществляется фильтрация шумов и предварительная обработка с использованием алгоритмов кластеризации и временного анализа, что снижает нагрузку на облако и повышает эффективность мониторинга состояния оборудования. Обработанная информация поступает в интерфейс пользователя, где отображается в виде диаграмм, графиков и рекомендаций по режимам работы оборудования [10].

Примеры внедрения. На практике методы и технологии мониторинга реализуются ведущими энергетическими компаниями. Siemens Gamesa внедрила предиктивное обслуживание для ветровых турбин, используя IoT-датчики вибрации и машинное обучение для анализа данных в реальном времени. Система позволяет сократить простои до 30–40 % за счёт раннего выявления дисбаланса роторов, что соответствует общим отраслевым оценкам [2].

GE Vernova разработала платформу SmartSignal для тепловых электростанций, интегрирующую термографические датчики и алгоритмы прогнозирования отказов на основе AI/ML и цифровых двойников. Проект показал сбережение более \$1,6 млрд за счёт предиктивной аналитики, включая нулевое количество непредвиденных отказов в кейсе, согласно данным компании [3].

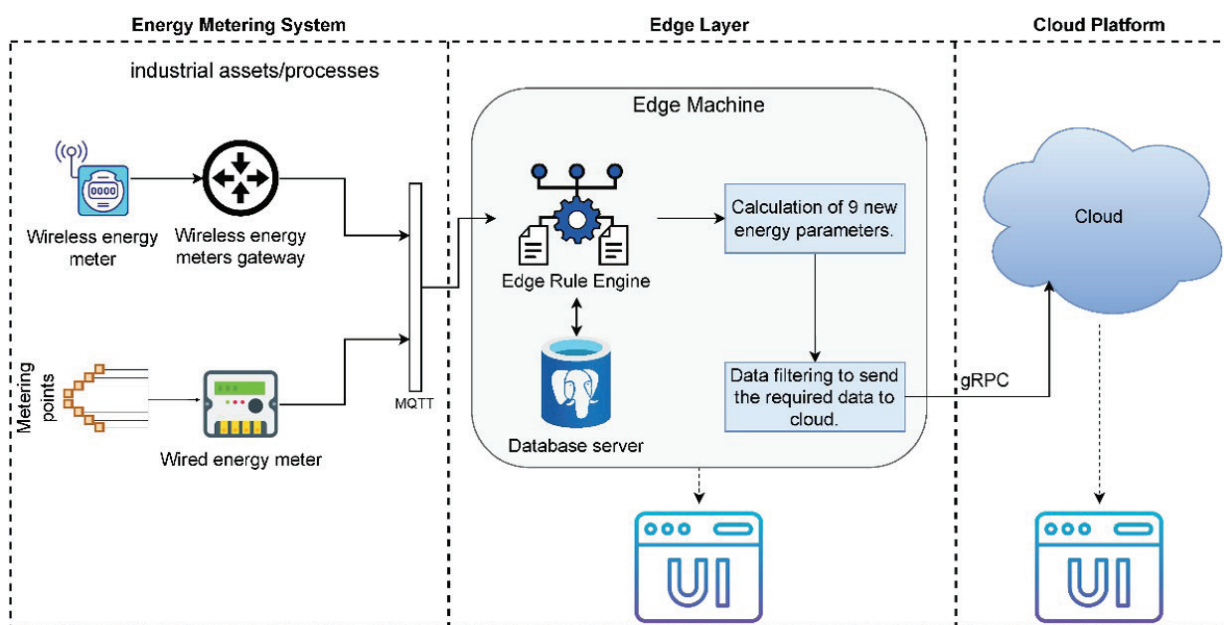


Рисунок 1 – Архитектура IoT-системы мониторинга [10]

EDF Energy применила IoT-решения для мониторинга гидрогенераторов, где акселерометры используются для выявления кавитации, что позволяет снизить износ оборудования на 20–30 % в пилотных проектах, согласно отраслевым оценкам [4, 5].

Эти примеры демонстрируют адаптацию интеллектуальных систем к различным типам оборудования, обеспечивая повышение надёжности и снижение эксплуатационных рисков. Количественные эффекты кейсов будут оценены в следующем разделе с акцентом на экономическую эффективность.

Экономическая эффективность. Эффективность интеллектуальных систем мониторинга подтверждается экономическими показателями из рассмотренных кейсов. Внедрение в Siemens Gamesa снизило простой ветровых турбин на 30 % за счёт предиктивной диагностики, что повысило MTBF на 25 % [2]. Аналогично, GE Vernova и EDF достигли сокращения OPEX на 20–25 % через оптимизацию ремонтов трансформаторов и генераторов [3, 5]. Эти эффекты возникают от перехода к предиктивному обслуживанию, минимизирующему внеплановые затраты.

Для количественной оценки экономического эффекта используем простой расчет окупаемости инвестиций на основе данных [3]: экономия от системы SmartSignal превышает 1,6 млрд долларов (за счет предотвращения затрат, подтверждено примерами Total EP с нулевыми непредвиденными отказами). По оценкам [2], вложения в подобные системы окупаются за 3 месяца для крупных компаний в энергетической отрасли, что указывает на высокую отдачу (ROI до 220 % в рассмотренных сценариях предиктивного обслуживания) – таблица 1.

Таблица 1 – Эффект внедрения интеллектуального мониторинга по ключевым показателям

Аспект	Традиционные способы мониторинга	Интеллектуальные системы (IoT + ML, предиктивные)
Снижение реактивных простоев	Базовый (ограниченный эффект за счёт регламентных осмотров и плановой диагностики; высокая зависимость от человеческого фактора)	До 50 % (прогноз отказов на ранней стадии, данные обрабатываются в режиме реального времени/предиктивно) [2, 5]
Снижение затрат OPEX	Базовый (ремонты производятся согласно графикам проведения ремонтов, независимо от фактического состояния оборудования)	20–40 % (ремонты производятся по мере необходимости, а не по графикам проведения ремонтов) [2]
Увеличение срока службы оборудования	Базовый (без прогнозов деградации)	20–40 % (оптимизация Режимов через цифровые двойники) [5]

В российской практике цифровая трансформация электросетевого и генераторного хозяйства включает проекты по внедрению систем дистанционного мониторинга, цифровых двойников и предиктивной аналитики, направленные именно на достижение перечисленных эффектов. Эти инициативы документируются в технологических реестрах и программах цифровой трансформации крупных профильных организаций, что подтверждает системный характер перехода к предиктивному обслуживанию в отрасли.

Эффективность внедрения интеллектуальных систем в России пока во многом представлена не единичными публичными «кейсами» с точными цифрами выигрыша, а сводными программными целями и результатами пилотных проектов, отражёнными в годовых и программных отчётах крупных генерирующих и сетевых компаний. Руководящие организации и операторы электросетей фиксируют в документах снижение эксплуатационных рисков и улучшение качества диагностики за счёт интеграции данных с вибро- и температурных датчиков, измерений частичных разрядов и анализаторов изоляции, что позволяет переводить ряд мероприятий в плановый режим и сокращать долю аварийных

ремонт. Наряду с этим отмечается разработка цифровых двойников турбогенераторов и трансформаторов, применяемых для моделирования деградации и оптимизации сроков плановых ремонтов. Такие практики декларируются в программах инновационного развития и отчётности компаний и профессиональных ассоциаций.

С экономической точки зрения основные источники экономии при внедрении интеллектуальных систем формируются за счёт уменьшения неконтролируемых простоев, сокращения объёмов незапланированных ремонтов и более эффективного использования остаточного ресурса оборудования. Оценка экономической отдачи должна базироваться на сравнении жизненных циклов «до/после» внедрения: к показателям капитальных и операционных затрат добавляются величины избегаемого отказа, экономия на запасных частях и логистике, а также косвенные потери, связанные с недопоставкой мощности или штрафами за качество поставляемой электроэнергии. В российских программах цифровизации подчёркивается, что переход к предиктивному обслуживанию рассматривается как инструмент снижения общих потерь и повышения эффективности загрузки активов, что в сумме влияет на сокращение как OPEX, так и удельных потерь в сети [6, 9].

Ограничения и перспективы. Несмотря на экономические преимущества, внедрение интеллектуальных систем сопряжено с ограничениями. Высокие начальные затраты на сенсоры и ПО и сложность интеграции с устаревшей инфраструктурой ограничивают масштабирование [9]. Кибербезопасность остаётся риском, так как IoT-системы подвержены атакам, что может привести к утечкам данных. В России эти ограничения усугубляются зависимостью от импортных технологий, требуя государственной поддержки для импортозамещения.

В среднесрочной перспективе (3–5 лет) ожидается расширение IoT и машинного обучения для пилотных проектов в Россетях, с прогнозом значительного снижения аварий [11]. Машинное обучение позволит выявлять скрытые закономерности, прогнозировать отказы и формировать рекомендации по оптимизации режимов, снижая влияние человеческого фактора и сокращая внеплановые простои. Экономическая оценка показывает значительный рост ROI за счёт масштаба, как в стратегии Минэнерго до 2030 года [9]. В долгосрочной перспективе (5–10 лет) автономные AI-системы интегрируют smart grid, обеспечивая саморегулирование и снижение OPEX на 30–40 % [2, 13]. Внедрение технологий блокчейн обеспечит прозрачность данных об энергопотоках, фиксируя объёмы передачи энергии и минимизируя ошибки в цифровизации. Развитие smart grid создаст возможности для управления нагрузкой, интеграции ВИЭ и оптимизации потребления, повышая устойчивость системы [12, 13]. Эти перспективы требуют преодоления ограничений через стандартизацию и инвестиции. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на кибербезопасности и импортозамещении для полной реализации потенциала.

Заключение. Реализация интеллектуальных систем мониторинга обеспечивает повышение надёжности работы энергетического оборудования. Внедрение IoT, машинного обучения и цифровых двойников сокращает простои на 25–50 % и OPEX на 20–40 %, как показали кейсы Siemens и GE Vernova, EDF [2–5]. Среднее время наработки на отказ (MTBF) увеличивается на 25 % [2].

Для внедрения этих систем в России необходимы стандартизация технологий через разработку единого национального стандарта и государственная поддержка пилотных проектов, таких как цифровая трансформация в ПАО «Россети» [6]. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на кибербезопасности IoT-систем и развитии импортозамещения, учитывая текущие вызовы [6, 8, 9, 11].

Поступила: 11.02.2026; рецензирована: 26.02.2026; принята: 02.03.2026.

Литература

1. Пчелин В.Ю. Современные подходы и модели управления электроэнергетическими системами региона: сравнительный анализ и ключевые недостатки / В.Ю. Пчелин // Экономика, предпринимательство и право. 2024. № 6. С. 2985–2996.

2. Siemens. The True Cost of Downtime 2024. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1b43afb5-2d07-47f7-9eb7-893fe7d0bc59/TCOD-2024_original.pdf (дата обращения: 12.10.2025).
3. GE Vernova. Digital Twin Technology and SmartSignal Predictive Analytics. 2025. URL: <https://www.governova.com/software/innovation/digital-twin-technology> (дата обращения: 13.10.2025).
4. Wang G., Xie J., Wang S. Application of Artificial Intelligence in Power System Monitoring and Fault Diagnosis // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 14. URL: <https://doi.org/10.3390/en16145477> (дата обращения: 13.10.2025).
5. PCH Engineering. Cost-effective hydro turbine vibration condition monitoring. 2024. URL: <https://www.pch-engineering.dk/486/vibration-monitoring-for-hydro-power-plants> (дата обращения: 12.10.2025).
6. Паспорт программы инновационного развития ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» на период 2024–2029 гг. с перспективой до 2035 года // ПАО «Россети». 2024. URL: <https://rosseti.ru/upload/iblock/86d/u1cuyk1vmabpo4yq23p1wb9cnlzfz7v5/%.pdf> (дата обращения: 05.10.2025).
7. Программа конференции A1 / Российский национальный комитет CIGRE // Российский национальный комитет CIGRE. 2019. URL: https://www.cigre.ru/activity/conference/a1/Программа_.pdf?utm_source (дата обращения: 05.10.2025).
8. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации за 2023 год / Министерство экономического развития Российской Федерации. 2025. 7 мая. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/cf41490cdfb6bfbcd81eb74f7c8e1fed/gosudarstvennyu_doklad_o_sostoyanii_energoberezeniya_v_rf_za_2023_god.pdf (дата обращения: 05.10.2025).
9. Паспорт программы инновационного развития ПАО «Интер РАО» на период 2020–2024 гг. с перспективой до 2029 года // Министерство энергетики Российской Федерации. 2020. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/306/oze8omi7k8nr8i8os2ye9v10n3stgrk_g/Prilozhenie_4_Pasport_PIR_2020_2024_v_Minenergo.pdf?utm_source (дата обращения: 05.10.2025).
10. Mirani A.A., Awasthi A., O'Mahony N., Walsh J. Industrial IoT-Based Energy Monitoring System: Using Data Processing at Edge // *IoT*. 2024. URL: <https://www.mdpi.com/2624-831X/5/4/27> (дата обращения: 12.10.2025).
11. Минэнерго РФ. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040. 2024. URL: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2024.pdf> (дата обращения: 12.10.2025).
12. Alladi T. et al. Blockchain in smart grids: A review on different use cases // *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 22 URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/22/4862> (дата обращения: 12.10.2025).
13. Bayindir R. et al. Smart grid technologies and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 66. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304191> (дата обращения: 12.10.2025).