

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.750

УДК: 004.6:66-7

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОАКТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
НА ПРЕДПРИЯТИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА

А.Р. Денисов, А.Е. Никулин

Денисов Артем Руфимович* (ORCID 0000-0002-3359-4103), Никулин Анатолий Евгеньевич (ORCID 0009-0008-2352-5869)

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5 литера Ф, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: iptema@yandex.ru*, nikulin.a.e@bk.ru

Статья посвящена разработке комплексной модели проактивного технического обслуживания для предприятий топливно-энергетического комплекса. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения бесперебойной работы критически важного оборудования, минимизации простоев и оптимизации затрат на обслуживание в условиях цифровой трансформации промышленности. Анализируются ограничения традиционных систем управления предприятием (ERP, MES, SCADA), выявляя ключевую проблему – разрозненность данных и отсутствие единой методологии для прогнозирования отказов. В качестве решения предлагается модульная архитектура, интегрирующая данные из различных источников с применением методов машинного обучения и предиктивной аналитики. Архитектура дополнена двумя специализированными модулями: управления надежностью и ТОиР. Первый модуль обеспечивает непрерывный мониторинг состояния оборудования, интеграцию с полевыми системами контроля, прогнозирование остаточного ресурса оборудования, второй – комплексный анализ данных всех уровней управления, оптимизацию графиков обслуживания, динамическое планирование ремонтных мероприятий. Предлагаемая система обеспечивает сквозную интеграцию данных из АСУ ТП, ЕАМ, ERP-систем и других источников в единое информационное пространство. Аналитическое ядро на основе машинного обучения рассчитывает показатели надежности, выявляет зависимости и формирует проактивные рекомендации по обслуживанию с учетом критичности оборудования, доступности запчастей и персонала. Это позволяет реализовать интеграцию с цифровым двойником для визуализации и уточнения моделей. Выявлены основные преимущества и ограничения предлагаемого решения. К преимуществам относятся: переход от реактивного к проактивному обслуживанию, снижение простоев и затрат на экстренные ремонты. К ограничениям: высокие требования к качеству данных, сложности масштабирования для крупных объектов, дорогостоящая интеграция и вопросы кибербезопасности. Разработанное решение демонстрирует значительный потенциал для применения в электроэнергетике.

Ключевые слова: проактивное техническое обслуживание, топливно-энергетический комплекс, предиктивная аналитика, машинное обучение, цифровой двойник, интеграция данных, надежность оборудования.

ORGANIZATION OF PROACTIVE MAINTENANCE PROCESSES AT AN ENTERPRISE IN THE
ENERGY INDUSTRY

A.R. Denisov, A.E. Nikulin

Artem R. Denisov* (ORCID 0000-0002-3359-4103), Anatoliy E. Nikulin (ORCID 0009-0008-2352-5869)

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Popova str., 5 F, St. Petersburg, 197376, Russia

E-mail: iptema@yandex.ru*, nikulin.a.e@bk.ru

The article is devoted to the development of a comprehensive proactive maintenance model for energy enterprises. The relevance of the research is determined by the need to ensure the uninterrupted operation of critical equipment, minimize downtime and optimize maintenance costs in the context of the digital transformation of the energy industry. The limitations of traditional enterprise management systems (ERP, MES, SCADA) are analyzed, revealing the key problem – the fragmentation of data and the lack of a unified methodology for predicting failures. As a solution, a modular design is proposed that integrates data from various sources using machine learning and predictive analytics methods. The design is complemented by two specialized modules: reliability management and CMMS. The first module provides continuous monitoring of the equipment's condition, integration with field monitoring systems, forecasting the remaining useful life of the equipment, the second provides comprehensive data analysis at all levels of management, optimization of maintenance schedules, and dynamic planning of repairs. The proposed system provides end-to-end integration of data from automated process control systems, EAM, ERP systems and other sources into a single information space. The machine learning-based analytical core calculates reliability indicators, identifies dependencies and forms proactive maintenance recommendations, taking into account the equipment criticality, availability of spare parts and personnel. This allows integration with a digital twin for visualization and refinement of models. The main advantages and limitations of the proposed solution are identified. The advantages include: the transition from reactive to proactive maintenance, reduced downtime and cost of emergency repairs. The limitations are: high data quality requirements, scaling difficulties for large facilities, expensive integration, and cybersecurity issues. The developed solution demonstrates significant potential for use in the energy industry.

Keywords: proactive maintenance, energy industry, predictive analytics, machine learning, digital twin, data integration, equipment reliability.

Для цитирования:

Денисов А.Р., Никулин А.Е. Организация процессов проактивного технического обслуживания на предприятии топливно-энергетического сектора. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2025. № 04(66). С. 105-114. DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.750

For citation:

Denisov A.R., Nikulin A.E. Organization of proactive maintenance processes at an enterprise in the energy industry. *Ivecofin*. 2025. N 04(66). P. 105-114. DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.750 (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым трендом развития современных промышленных предприятий является цифровая трансформация производственных систем, связанная с внедрением новых производственных и бизнес-моделей [1, 2], ориентированных на улучшение процесса выпуска товарной продукции, способов ее производства, а также со снижением издержек в том числе за счет сокращения простоев производства и увеличения срока службы оборудования, что напрямую влияет на экономическую эффективность предприятия. Так, Тайити Оно в [3] подчеркивал: «Автономизация меняет принцип работы оборудования: если процесс идет нормально, станок не требует присутствия оператора. Человек нужен лишь при возникновении сбоев. Благодаря этому один работник может обслуживать несколько единиц техники, что сокращает затраты на персонал и повышает общую эффективность». Этот вопрос по-прежнему остается актуальным и в эпоху Индустрии 4.0, где автоматизация и предиктивная аналитика играют ключевую роль в оптимизации производства [4].

В топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) обеспечение безаварийной и бесперебойной работы оборудования является критически важной задачей и связано с необходимостью обеспечения круглосуточной эксплуатации энергетического оборудования [5]. Ключевую роль в решении этой задачи играют процессы технологического обслуживания оборудования (ТОиР), традиционные подходы к которому основаны на регламентных ремонтах или реагировании на уже возникшие отказы [6]. Это не всегда позволяет обеспечить необходимую надежность и экономическую эффективность [7]. В этой связи особую актуальность приобретает переход к проактивному техническому обслуживанию (ПТО), что позволяет прогнозировать и предотвращать неисправности до их возникновения [6, 8]. Однако анализ текущей ситуации в отрасли выявил отсутствие единой методологии внедрения проактивного технического обслуживания (ПТО). Разрозненность данных, недостаточная цифровизация

процессов и несистемное использование предиктивной аналитики существенно ограничивают возможности предприятий в этой сфере.

Данное исследование направлено на разработку комплексной модели проактивного обслуживания в электроэнергетике на основе анализа исторических данных, телеметрии оборудования и методов машинного обучения. Полученные решения планируется апробировать на пилотных объектах сетевого хозяйства с последующим масштабированием на другие предприятия ТЭК. Внедрение разрабатываемой модели позволит не только снизить эксплуатационные риски, но и оптимизировать затраты на обслуживание инфраструктуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время на основе как российского, так и мирового опыта сформировано единое видение архитектуры управления производственными процессами [9], состоящей из нескольких иерархических уровней, каждый из которых выполняет строго определенные функции и взаимодействует с другими уровнями системы. Применительно к энергетике данная структура имеет вид, представленный на рис. 1.



Рисунок 1. Иерархическая структура системы управления предприятием

Figure 1. Hierarchical structure of the corporate management system

Современные системы управления производством (АСУП) строятся по принципу многоуровневой организации [10-13], что обеспечивает гибкость, масштабируемость и эффективное распределение задач между различными подсистемами. В общем случае структура включает следующие уровни [9]:

1. *Верхний уровень (стратегическое управление и планирование)*. На данном уровне функционирует информационно-управляющая система (ИУС предприятия), также известная как

ERP-система (Enterprise Resource Planning). Основой этой системы является корпоративное хранилище данных (Data Warehouse, DWH), которое аккумулирует информацию из всех подразделений и обеспечивает поддержку принятия управленческих решений [14]. ERP-система интегрирует данные о финансах, логистике, кадрах и производственных процессах, позволяя оптимизировать ресурсы и стратегическое планирование.

2. *Уровень управления производственными процессами (оперативное управление)*. Этот уровень представлен системой управления производством (MES, Manufacturing Execution System), которая отвечает за мониторинг и контроль выполнения производственных операций в реальном времени. В отличие от ERP, MES оперирует данными, поступающими непосредственно с производственных линий, используя локальные базы данных, специфичные для каждого объекта автоматизации. Ключевые функции MES включают управление качеством продукции, диспетчеризацию заданий и анализ эффективности оборудования (OEE).

3. *Уровень промышленных АСУ ТП (автоматизация технологических процессов)*. На этом уровне применяются SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition), обеспечивающие сбор данных с оборудования, визуализацию процессов и удаленное управление. SCADA взаимодействует с промышленными контроллерами, серверами и автоматизированными рабочими местами (АРМ), предоставляя операторам инструменты для контроля параметров производства и реагирования на аварийные ситуации.

4. *Уровень контроллеров и программируемых устройств (реализация алгоритмов управления)*. Основу автоматизации составляют программируемые логические контроллеры (PLC, Programmable Logic Controller) и программируемые контроллеры автоматизации (PAC, Programmable Automation Controller), которые выполняют задачи управления оборудованием по заданным алгоритмам. Эти устройства обеспечивают высокую надежность и детерминированность выполнения операций в реальном времени.

5. *Уровень полевого оборудования (первичные данные и исполнительные механизмы)*. Нижний уровень включает датчики, измерительные приборы и исполнительные устройства, которые непосредственно взаимодействуют с производственной средой. Эти компоненты формируют первичные данные о температуре, давлении, расходе материалов и других технологических параметрах, передавая их в вышестоящие системы для обработки.

Таким образом, современные промышленные предприятия функционируют в условиях

сложной многоуровневой архитектуры управления, где особое значение приобретает уровень управления производственными процессами (MES). Он обеспечивает критически важные функции оперативного управления производственными заданиями в режиме реального времени, детального планирования работы технологического оборудования, диспетчеризации производственных потоков, контроля материальных, энергетических и человеческих ресурсов, а также анализа эффективности производственных операций через ключевые показатели. Формируемая на этом уровне информация служит основой для принятия управленческих решений как на оперативном, так и на стратегическом уровнях. Однако существующие реализации MES-систем сталкиваются с рядом системных проблем, ограничивающих их эффективность.

Одной из ключевых проблем современных производственных систем является дезинтеграция данных. Производственные данные оказываются распределенными между локальными MES-системами, SCADA-комплексами, ERP-системами и специализированными системами учета. Такая разрозненность приводит к несогласованности данных, трудностям верификации информации и существенным задержкам в принятии решений.

Другой значимой проблемой является отсутствие целостной цифровой модели предприятия. Несмотря на активное развитие автоматизированных систем, сохраняется заметный разрыв между моделями бизнес-процессов в ERP-системах, моделями технологических процессов в MES/SCADA и фактическим физическим состоянием оборудования.

Особенно остро эти проблемы проявляются в области управления техническим обслуживанием и ремонтами (ТОиР), что особенно критично для нефтегазового комплекса, энергетической отрасли и производств непрерывного цикла. В этих отраслях требуется обеспечение исключительно высокой готовности оборудования на уровне 99.9%, минимальных простоев и максимальной эффективности ремонтных операций.

Перспективные направления развития производственных информационных систем включают создание единого информационного пространства через разработку унифицированных интерфейсов обмена данными, внедрение промышленных шин данных и использование современных стандартов [14]. Особое значение приобретает развитие цифровых двойников [15-17], позволяющих интегрировать данные всех уровней, создавать предиктивные модели и оптимизировать производственные процессы.

Важным направлением совершенствования является внедрение интеллектуальных систем ТОиР на основе предиктивной аналитики, методов машинного обучения и компьютерного зрения для диагностики оборудования. Современный этап развития промышленных информационных систем требует глубокой интеграции MES- и ERP-систем, систем управления оборудованием и платформ анализа данных. Ключевыми технологическими драйверами этих преобразований становятся промышленный интернет вещей (IIoT) и облачные вычисления для верификации данных. Реализация этих подходов позволит создать единое информационное пространство предприятия, разработать целостные цифровые модели производственных активов и внедрить интеллектуальные системы поддержки принятия решений.

В данной работе предлагается решение по внедрению модели проактивного технического обслуживания, которое позволяет преодолеть указанные выше ограничения. Разрабатываемая система использует данные из различных источников, обеспечивая их комплексную верификацию, ранжирование и анализ. Полученные результаты предоставляются заинтересованным сторонам в виде структурированной информации, включающей рекомендации по оптимизации процессов ТОиР, прогнозные показатели работы оборудования и оценку потенциальных рисков. Такой подход позволяет перейти от реактивных методов обслуживания к превентивным, значительно повышая надежность и эффективность производственных процессов.

Предлагаемая система проактивного технического обслуживания органично встраивается в концепцию построения единого цифрового пространства, используя передовые методы анализа данных и машинного обучения для прогнозирования состояния оборудования. Система не только агрегирует информацию из различных источников, но и применяет интеллектуальные алгоритмы для выявления скрытых зависимостей и закономерностей, что позволяет существенно повысить точность прогнозов и своевременность принимаемых решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Современная парадигма управления предприятием распределяет функции ТОиР на промышленном уровне (рис. 2, без модулей А и Б) [4, 9, 18]. В данной архитектуре задачи ТОиР реализуются через три взаимосвязанные, но организационно обособленные системы:

1. Система планирования и диспетчеризации (*Advanced Planning & Scheduling (APS)*):

- оптимизация производственных режимов в реальном времени;

ция усугубляется отсутствием полноценной интеграции между различными информационными системами предприятия, создающей «информационные разрывы» в управлении производственными активами. Следствием такого положения дел становится невозможность формирования достоверной оценки реального состояния оборудования, что неизбежно ведет к ошибкам в производственном планировании. Отсутствие надежных инструментов прогнозирования технического состояния существенно ограничивает возможности профилактики отказов. В конечном итоге это выливается в неоправданно высокие показатели простоев технологического оборудования и нерациональное использование производственных ресурсов, что негативно сказывается на общей эффективности предприятия.

Современные промышленные предприятия демонстрируют активный поиск инновационных решений в области организации технического обслуживания оборудования. Анализ практики ведущих компаний, таких как ПАО «Газпром», ООО «Азоттех» и ПК «Композит» [19-22], выявляет тенденцию к разработке специализированных систем, ориентированных на конкретные технологические процессы и типы оборудования. Эти решения, как правило, фокусируются на критически важных производственных активах или законченных технологических цепочках.

Параллельно на рынке промышленной автоматизации появляются универсальные платформы от ведущих разработчиков, предлагающие комплексные решения для цифровизации предприятий. Однако практика внедрения показывает, что даже наиболее совершенные из этих систем требуют существенной адаптации к конкретным производственным условиям, особенностям технологического оборудования и существующей инфраструктуре управления.

Такая диверсификация подходов к автоматизации технического обслуживания отражает сложность стоящих перед промышленными предприятиями задач. С одной стороны, существует потребность в специализированных решениях, учитывающих отраслевую специфику. С другой – сохраняется спрос на универсальные платформы, способные обеспечить комплексную цифровизацию управления производственными активами. Этот парадокс современной промышленной автоматизации требует дальнейшего научного осмысления и методологической проработки.

Проведенный анализ опыта внедрения систем технического обслуживания выявил ключевую системную проблему – отсутствие единой

методологии обработки и планирования, способной агрегировать и анализировать все доступные данные из различных источников. Для преодоления этого ограничения предлагается расширение стандартной архитектуры системы управления двумя специализированными модулями (рис. 2):

1. Модуль управления надежностью (А),

который обеспечивает:

- непрерывный мониторинг состояния оборудования;
- интеграцию с полевыми системами контроля;
- прогнозирование остаточного ресурса оборудования [23].

2. Модуль ТОиР (Б), который реализует:

- комплексный анализ данных всех уровней управления;
- оптимизацию графиков обслуживания;
- динамическое планирование ремонтных мероприятий.

Следует особо отметить, что большинство существующих решений страдают от проблемы «островной автоматизации», когда отдельные автоматизированные системы функционируют изолированно, без полноценной интеграции в единое информационное пространство. Это существенно снижает их эффективность и ограничивает аналитические возможности. Предлагаемая архитектура (рис. 2) предусматривает сквозную интеграцию всех компонентов системы, что позволяет создать целостную цифровую модель управления производственными активами.

Более подробно рассмотрим предлагаемую работу модуля ТОиР для типовой электроустановки (ЗРУ-10 кВ), представленную на рис. 3. Для эффективного прогнозирования и предотвращения аварий система интегрирует данные из АСУ ТП, систем управления надежностью, кадровых служб и других источников. Это позволяет анализировать параметры работы оборудования, историю отказов, загрузку персонала и наличие запчастей.

Основу системы составляет аналитическое ядро, которое обрабатывает данные, рассчитывает показатели надежности [24] и выявляет скрытые зависимости между параметрами работы и отказами. На основе этих данных формируются рекомендации по срокам и объемам технического обслуживания с учетом критичности оборудования и доступности ресурсов.

Система поддерживает интеграцию с цифровым двойником для визуализации состояния активов и автоматизирует управление ремонтами: от планирования работ до формирования заданий для бригад и оптимизации складских запасов.

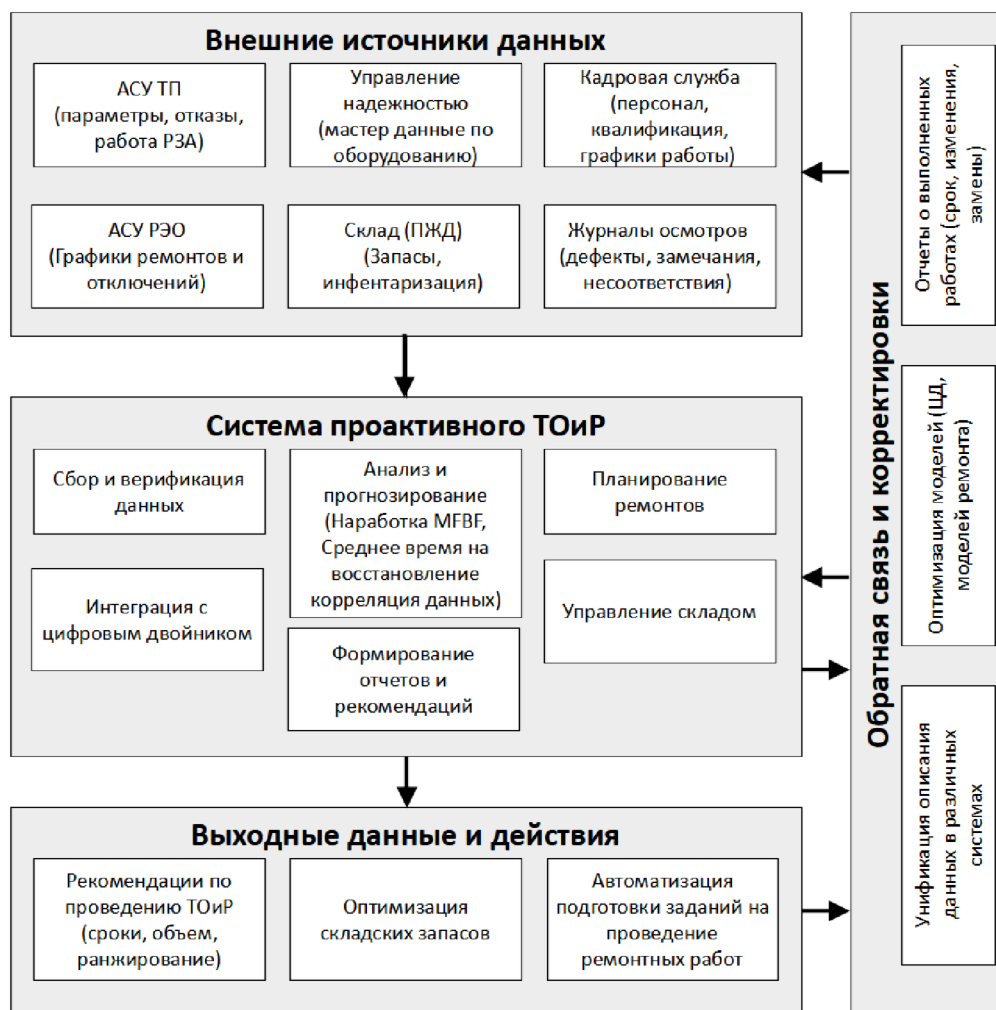


Рисунок 3. Схема работы системы проактивного ТОиР
Figure 3. Operation scheme for the proactive CMMS

Модуль анализирует текущее состояние оборудования и прогнозирует возможные отказы, формируя оптимальный график обслуживания. Система собирает данные из различных источников: показания датчиков, историю ремонтов, информацию о запчастях и доступности персонала.

На первом этапе система проверяет и объединяет данные из разных источников, устраняя возможные противоречия. Затем анализирует историю отказов, выявляя закономерности и рассчитывая важные показатели надежности. На основе этих данных модуль оценивает текущее состояние каждого оборудования, определяя вероятность возникновения неисправности.

Система предлагает план технического обслуживания, учитывающий несколько факторов: критичность оборудования, доступность запчастей и специалистов, утвержденные графики отключений. Рекомендации включают сроки и объем работ, необходимые материалы, а также ответственных сотрудников.

Модуль выдает персоналу конкретные указания по обслуживанию оборудования, начиная от срочных ремонтов до плановых профилактических работ. Дополнительно система формирует отчеты, позволяющие оценить эффективность обслуживания и прогнозировать потребность в запчастях.

Полученные данные передаются в цифровой двойник оборудования, что позволяет уточнять расчетные модели и улучшать точность прогнозов. Вся информация отображается в удобном для пользователей виде с возможностью ручной корректировки рекомендаций.

Схема данных, необходимых для работы предлагаемой системы, приведена на рис. 4.

Основное достоинство модуля – возможность предотвращать аварии, а не реагировать на их последствия. Это достигается за счет комплексного анализа данных и автоматизированного планирования работ. В результате снижаются простои оборудования и затраты на экстренные ремонты, повышается общая надежность работы.

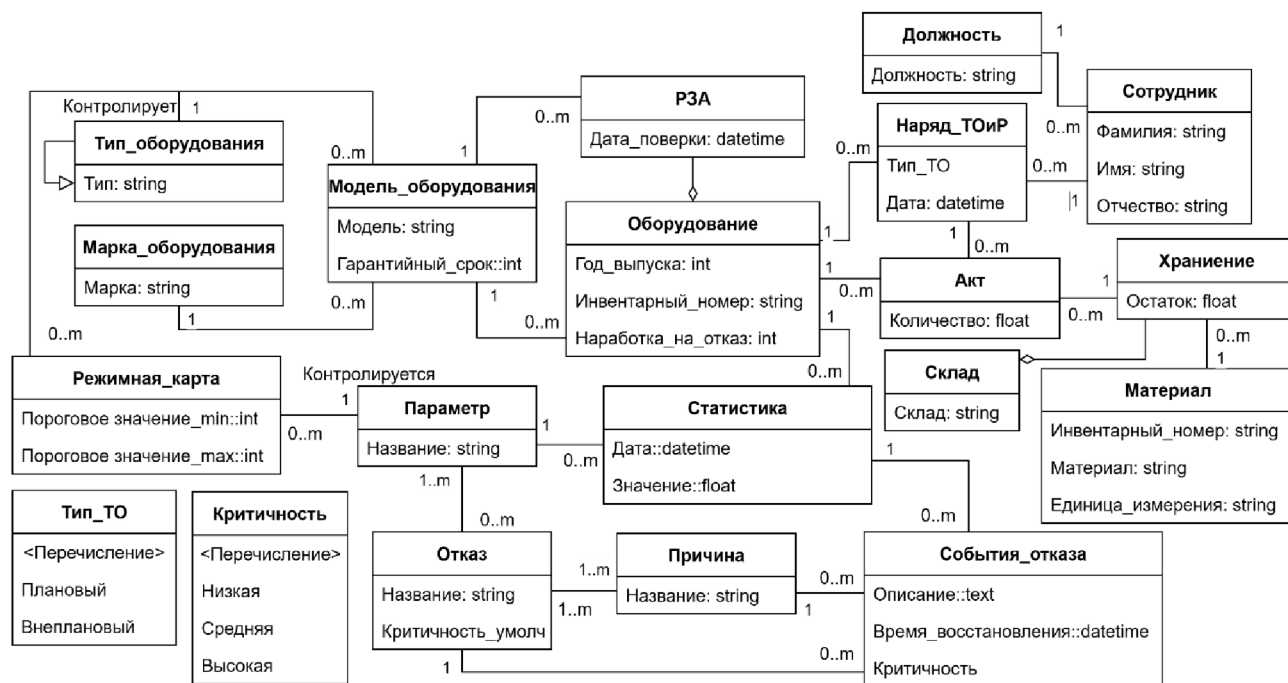


Рисунок 4. ER-диаграмма системы проактивного ТОиР
Figure 4. ER-diagram of the proactive CMMS

Разработанная модель ПТО демонстрирует значительный потенциал для применения в электроэнергетике. Прогнозируется, что она может стать основой для интеллектуальных систем управления активами, сочетающих превентивное обслуживание с оптимальным распределением ресурсов. Наиболее перспективным направлением представляется интеграция ИИ и промышленного IoT, что позволит создать новые механизмы повышения надежности и эффективности производственных процессов. При этом ее внедрение сталкивается с рядом технологических и организационных ограничений:

1. Требования к качеству данных: эффективность прогнозов существенно зависит от точности датчиков и полноты исторических данных;
2. Проблемы масштабирования: несмотря на успешную апробацию на ЗРУ-10 кв, адаптация системы для сложных объектов (например, ПС 110 KV и выше) требует дополнительных исследований;
3. Сложности интеграции: внедрение в существующую ИТ-инфраструктуру предприятий осложняется высокой стоимостью и необходимостью переподготовки персонала;
4. Вопросы кибербезопасности: распределенный характер системы требует разработки специальных механизмов защиты данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным научным достижением исследования стала модульная архитектура системы проактивного технического обслуживания для предприятий топливно-энергетического комплекса, объединяющая данные из разрозненных систем

(АСУ ТП, ЕАМ, ERP) с применением методов машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования. Такой подход позволяет преодолеть ключевые недостатки традиционных методов ТОиР, включая неоптимальные затраты на плановые ремонты и высокую вероятность незапланированных простоев. Для реализации предложенной модульной архитектуры при построении системы управления производственным оборудованием необходимо реализовать специализированные модули (рис. 2, А и Б), обеспечивающие комплексный анализ данных и адаптивное планирование ремонтов. Это позволит перейти от планово-предупредительного обслуживания к проактивному.

В ходе исследования выявлены ограничения внедрения системы, включая зависимость от качества данных, сложность интеграции с существующими системами и необходимость адаптации алгоритмов под специфику оборудования. Эти факторы требуют дополнительных исследований, особенно при масштабировании решения на крупные промышленные объекты.

Существующие прогнозы развития свидетельствуют о значительном потенциале предложенной модели как фундамента для создания интеллектуальных систем управления производственными активами. Эти системы будущего смогут органично сочетать превентивные подходы к техническому обслуживанию с оптимальным распределением всех видов ресурсов и автоматизированным планированием ремонтных операций. Наиболее перспективным направлением представляется глубокая интеграция искусственного

интеллекта с промышленным интернетом вещей. Такой симбиоз технологий позволит создать принципиально новые механизмы прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций, а также разработать адаптивные алгоритмы оптимизации производственных циклов. В результате можно ожидать существенного повышения надежности оборудования, эффективности производственных процессов и общей экономической отдачи от эксплуатации промышленных активов.

Дальнейшее развитие исследования предполагает проработку по следующим направлениям:

- создание более совершенных алгоритмов обработки данных, способных эффективно работать в условиях неполной или искаженной информации, что характерно для многих промышленных предприятий с устаревшим парком оборудования;

- разработка единых стандартов интеграции, которые обеспечат совместимость системы с разнородными промышленными платформами и IoT-устройствами;

- разработка методов оценки экономической эффективности внедрения таких решений на стратегически важных производственных объектах.

Работа в этом направлении сможет обеспечить переход от традиционных методов обслуживания к интеллектуальным системам нового поколения, основанным на принципах превентивности и оптимального ресурсного планирования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА

1. Царевский Д.А., Валинурова А.А., Привалов А.Н., Данилова С.В. Совершенствование бизнес-процессов организации на основе внедрения современных информационных технологий. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством»* [Ивэкофин]. 2024. №03(61). С.72-80. DOI: 10.6060/ivecofin.2024613.691.
2. Колычев В.Д., Белкин И.О. Интеграция бережливого производства и цифровых технологий в управление операционной деятельностью промышленных предприятий. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством»* [Ивэкофин]. 2023. №03(57). С.45-58. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.653.
3. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства. М.: Институт комплексных стратегических исследований. 2005. 192 с.
4. Filipov V., Vasilev P. Manufacturing operations management - the smart backbone of Industry 4.0. *International scientific Journals "Industry 4.0"*. 2016. Vol.1. Is. 1. P.19-24.
5. Плеханова А.Ф., Сухарев Д.Ю. Проблемы внедрения риск-ориентированного подхода к управлению активами электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия с целью повышения его эффективности. *Modern Economy Success*. 2024. № 6. С. 166-174. DOI: 10.58224/2500-3747-2024-6-166-174.
6. Никитин П.С. Сравнительный анализ традиционных и современных подходов к управлению основными фондами. *Экономика и предпринимательство*. 2025. № 5(178). С. 1086-1092. DOI: 10.34925/EIP.2025.178.5.190.
7. Ширин С.В., Горбенко А.В. Модель управления затратами на жизненном цикле объектов энергетики с использованием цифровых двойников в концепции совокупной стоимости владения. *Экономический анализ: теория и практика*. 2025. № 4(24). С. 101-123. DOI: 10.24891/ea.24.4.101.
8. Яковлева М.В., Шалина А.И. Алгоритм принятия решений о внедрении предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятиях. *Вопросы инновационной экономики*. 2023. Т. 13. № 1. С. 159-172. DOI: 10.18334/vinec.13.1.117426.
9. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2010. Интеграция систем управления предприятием. Модели и терминология. М.: Стандартинформ. 2014. 136 с.
10. Matharoo S. The Role of Enterprise Architecture in the Digital Transformation of Energy Companies. *American Research Journal of Business and Management*. 2024. Vol. 10. N 1. P. 65-69. DOI: 10.21694/2379-1047.24010.
11. Pilipczuk O. Building the Cognitive Enterprise in the Energy Sector. *Energies*. 2022. N 15. 9479. DOI: 10.3390/en15249479.

REFERENCES

1. Tsarevsky D.A., Valinurova A.A., Privalov A.N., Danilova S.V. Improvement of business processes of an organization based on the introduction of modern information technologies. *Ivecofin*. 2024. N 03(61). P.72-80. DOI: 10.6060/ivecofin.2024613.691. (in Russian).
2. Kolychev V.D., Belkin I.O. Integration of lean manufacturing and digital technologies in the operational activity management of industrial enterprises. *Ivecofin*. 2023. N 03(57). P.45-58. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.653. (in Russian)
3. Ohno T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Moscow: Institute of Integrated Strategic Studies. 2005. 192 p. (in Russian).
4. Filipov V., Vasilev P. Manufacturing operations management - the smart backbone of Industry 4.0. *International scientific Journals "Industry 4.0"*. 2016. Vol.1. Is. 1. P.19-24.
5. Plekhanova A.F., Sukharev D.Yu. Problems of implementing a risk-oriented approach to asset management of an industrial enterprise's electric power infrastructure in order to increase its efficiency. *Modern Economy Success*. 2024. N 6. P. 166-174. DOI: 10.58224/2500-3747-2024-6-166-174. (in Russian).
6. Nikitin P.S. Comparative analysis of traditional and modern approaches to the management of fixed assets. *Economics and entrepreneurship*. 2025. N 5(178). P. 1086-1092. DOI: 10.34925/EIP.2025.178.5.190. (in Russian).
7. Shirin S.V., Gorbenko A.V. Cost management model for the life cycle of energy facilities using digital twins in the concept of total cost of ownership. *Economic analysis: theory and practice*. 2025. N 4(24). P. 101-123. DOI: 10.24891/ea.24.4.101. (in Russian).
8. Yakovleva M.V., Shalina A.I. Decision-making algorithm for the implementation of predictive equipment maintenance in high-tech companies. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2023. Vol. 13. N 1. P. 159-172. DOI: 10.18334/vinec.13.1.117426. (in Russian).
9. GOST R IEC 62264-1-2010. Integration of enterprise management systems. Models and terminology. Moscow: Standartinform. 2014. 136 p. (in Russian).
10. Matharoo S. The Role of Enterprise Architecture in the Digital Transformation of Energy Companies. *American Research Journal of Business and Management*. 2024. Vol. 10. N 1. P. 65-69. DOI: 10.21694/2379-1047.24010.
11. Pilipczuk O. Building the Cognitive Enterprise in the Energy Sector. *Energies*. 2022. N 15. 9479. DOI: 10.3390/en15249479.
12. Bonepalli R. Enterprise architecture framework for renewable energy integration in utility systems. *International Journal of Information Technology & Management Information System*. Vol. 16. N 1. P. 130-142. DOI: 10.34218/IJTMIS_16_01_011.

12. **Bonepalli R.** Enterprise architecture framework for renewable energy integration in utility systems. *International Journal of Information Technology & Management Information System*. Vol. 16. N 1. P. 130-142. DOI: 10.34218/IJITMIS_16_01_011.
13. **Лазарев Г.Б.** Smart Grid. Интеллектуальные сети - технология и применение. Часть I. Информационные и коммуникационные технологии. *Библиотечка электротехника*. 2024. № 10-11(310-311). С. 1-138. DOI: 10.71527/EP.BE.2024.10-11.310-311.
14. DAMA-DMBOK. Свод знаний по управлению данными. Второе издание. Dama International M.: Олимп-Бизнес. 2020. 828с.
15. **Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Ваняйки И.К., Отлягузов Д.С.** Разработка цифровых двойников типовых технологических процессов. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 1(81). С. 111-117. DOI: 10.6060/snt.20258101.00010.
16. **Золкин А.Л., Николаева С.Г., Исламгереева Я.С.** Разработка и применение цифровых двойников в промышленности. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2025. Т. 14. № 4(157). С. 303-310. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.14.033.
17. **Абрамов В.И., Гордеев В.В., Столяров А.Д.** Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития. *Вопросы инновационной экономики*. 2024. Т. 14. № 3. С. 691-716. DOI: 10.18334/vinec.14.3.121484.
18. **Lei Z., Shi J., Luo Z., Cheng M., Wan J.** Intelligent Manufacturing from the Perspective of Industry 5.0: Application Review and Prospects. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 167436-167451. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3496697.
19. СТО Газпром 2-1.15-878-2014. Основные положения по автоматизации объектов энергетики. СПб.: Газпром. 2016. 97 с.
20. **Крупович В.Ю., Никулин А.Е., Коротков С.А., Шаповало А.А., Шкитов Д.А.** История создания и развития автоматизированной системы комплексного учета энергоресурсов ПАО "Газпром". *Газовая промышленность*. 2021. № S2(818). С. 8-13.
21. **Коротков В.А.** Проактивные ремонты в металлургической отрасли. *Известия высших учебных заведений. Серия «Черная металлургия»*. 2014. № 8(57). С. 18-24. DOI: 10.17073/0368-0797-2014-8-18-24.
22. **Сахапова Т.С., Исмагилов Т.Ш., Тихонов В.А.** Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия. *Горная промышленность*. 2023. № 2. С. 62-68. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68.
23. **Пономарев Н.В.** Проблемы оценки надежности и эффективности оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике России. *Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия «Энергетика»*. 2021. № 2(21). С. 33-40. DOI: 10.14529/power210204.
24. **Астраханцева И.А., Горев С.В., Астраханцев Р.Г.** Фрактальный анализ в оценке эффективности и надежности сложных технических систем. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 4(76). С. 60-68. DOI: 10.6060/snt.20237604.0008.
13. **Лазарев Г.Б.** Smart Grid. Intelligent networks - technology and application. Part I. Information and communication technologies. *Library of Electrical Engineering*. 2024. N 10-11(310-311). P. 1-138. DOI: 10.71527/EP.BE.2024.10-11.310-311. (in Russian).
14. DAMA-DMBOK. Data Management Body of Knowledge. Second edition. Dama International Moscow: Olymp-Business. 2020. 828 p. (in Russian).
15. **Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Vanyaykin I.K., Otlaguzov D.S.** Digital twins design of typical technological processes. *Modern high technologies. Regional application*. 2025. N 1(81). P. 111-117. DOI: 10.6060/snt.20258101.00010. (in Russian).
16. **Zolkin A.L., Nikolaeva S.G., Islamgereeva Ya.S.** Development and application of digital twins in industry. *Economics and management: problems, solutions*. 2025. Vol. 14. N 4(157). P. 303-310. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.14.033. (in Russian).
17. **Abramov V.I., Gordeev V.V., Stolyarov A.D.** Digital twins: characteristics, typology and development practices. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2024. Vol. 14. N 3. P. 691-716. DOI: 10.18334/vinec.14.3.121484. (in Russian).
18. **Lei Z., Shi J., Luo Z., Cheng M., Wan J.** Intelligent Manufacturing from the Perspective of Industry 5.0: Application Review and Prospects. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 167436-167451. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3496697.
19. СТО Газпром 2-1.15-878-2014. The main principles of automation of energy facilities. St. Petersburg: Gazprom. 2016. 97 p. (in Russian).
20. **Krupovich V.Yu., Nikulin A.E., Korotkov S.A., Shapovalov A.A., Shkitov D.A.** History of creation and development of the automated system of complex accounting of energy resources of Gazprom PJSC. *The gas industry*. 2021. N S2(818). P. 8-13. (in Russian).
21. **Korotkov V.A.** Proactive repairs in steel industry. *Izvestiya – Ferrous metallurgy*. 2014. N 8(57). P. 18-24. DOI: 10.17073/0368-0797-2014-8-18-24. (in Russian).
22. **Sakhapova T.S., Ismagilov T.Sh., Tikhonov V.A.** A digital twin of the manufacturing system as a stage in the new digital business model of an industrial company. *Mining industry*. 2023. N 2. P. 62-68. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68. (in Russian).
23. **Ponomarev N.V.** Problems in assessing reliability and efficiency of operational dispatch control in the electric power industry of Russia. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2021. N 2(21). P. 33-40. DOI: 10.14529/power210204. (in Russian).
24. **Astrakhantseva I.A., Gorev S.V., Astrakhantsev R.G.** Fractal-based analysis of efficiency and reliability in complex engineering systems. *Modern high technologies. Regional application*. 2023. N 4(76). P. 60-68. DOI: 10.6060/snt.20237604.0008. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.09.2025
Принята к опубликованию 06.10.2025

Received 22.09.2025
Accepted 06.10.2025