

МЕНЕДЖМЕНТ/MANAGEMENT

DOI: <https://doi.org/10.60797/ECNMS.2025.9.10>**МОДЕЛЬ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Научная статья

Кабанов А.Е.¹, Тарасенко В.В.^{2,*}²ORCID : 0000-0003-3328-8197;^{1,2}Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (v5093075[at]gmail.com)

Аннотация

В статье представлена комплексная модель повышения операционной эффективности промышленного предприятия на основе предиктивного обслуживания, объединяющая передовые IoT-технологии, методы машинного обучения и экономический анализ. Разработана методика оценки текущего состояния системы технического обслуживания, включающая критерии надёжности оборудования, частоты отказов и анализа простоев, а также предложена концепция плавного перехода от реактивного к прогнозному обслуживанию с учётом специфики производства. Описана многослойная архитектура системы мониторинга, предусматривающая сбор в реальном времени параметров вибрации, температуры и давления с помощью IoT-датчиков, передачу данных по протоколу NB-IoT, обработку Big Data-алгоритмами и интеграцию с ERP/MES. Базовый алгоритм предиктивного обслуживания, основанный на LSTM-модели, обеспечивает прогнозирование вероятности отказов оборудования и автоматическое формирование графиков ремонта. Экономический анализ показывает значительное снижение затрат на ремонт, сокращение простоев и повышение общей производительности, что способствует повышению конкурентоспособности и устойчивости предприятия.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, операционная эффективность, промышленные предприятия, IoT-технологии, мониторинг оборудования, производственная эффективность, техническое обслуживание, оптимизация затрат, простой оборудования, машинное обучение, цифровизация производства, повышение производительности, управление оборудованием, прогнозирование неисправностей, конкурентоспособность предприятия.

A MODEL FOR IMPROVING THE OPERATING EFFICIENCY OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE ON THE BASIS OF PREDICTIVE MAINTENANCE

Research article

Kabanov A.E.¹, Tarasenko V.V.^{2,*}²ORCID : 0000-0003-3328-8197;^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (v5093075[at]gmail.com)

Abstract

The article presents a comprehensive model for improving the operating efficiency of an industrial enterprise based on predictive maintenance, combining advanced IoT technologies, machine learning methods and economic analysis. A methodology for evaluating the current state of the maintenance system is developed, including criteria for equipment reliability, failure rate and downtime analysis, and the concept of smooth transition from reactive to predictive maintenance is suggested, taking into account the specifics of production. A multi-layer architecture of the monitoring system is described, which provides for real-time collection of vibration, temperature and pressure parameters using IoT sensors, data transmission via NB-IoT protocol, processing by Big Data algorithms and integration with ERP/MES. A basic predictive maintenance algorithm based on the LSTM model provides prediction of equipment failure probability and automatic generation of repair schedules. Economic analyses show a significant reduction in repair costs, reduced downtime and improved overall productivity, which contributes to increased competitiveness and sustainability of the enterprise.

Keywords: predictive maintenance, operating efficiency, industrial enterprises, IoT technologies, equipment monitoring, production efficiency, maintenance, cost optimisation, downtime, machine learning, digitalisation of production, productivity improvement, equipment management, fault prediction, enterprise competitiveness.

Введение

Современные подходы к использованию IoT в мониторинге оборудования направлены на переход от традиционных методов обслуживания к более интеллектуальным системам управления, основанным на данных. IoT-технологии позволяют предприятиям не только мониторить состояние оборудования в режиме реального времени, но и прогнозировать потенциальные сбои, что создаёт значительные преимущества для повышения эффективности производства [1].

Формирование моделей повышения операционной эффективности на основе предиктивного обслуживания обусловлено необходимостью повышения конкурентоспособности промышленных предприятий в условиях растущего уровня автоматизации и цифровизации [2]. Внедрение IoT для мониторинга производственного оборудования

позволяет не только оперативно выявлять отклонения в работе оборудования, но и прогнозировать возможные отказы, что даёт возможность принимать превентивные меры [3].

Несмотря на значительные перспективы применения IoT, многие предприятия сталкиваются с рядом проблем, таких как высокая стоимость внедрения, недостаток квалифицированных кадров и отсутствие адаптированных решений для специфических условий эксплуатации [4].

В современных рыночных условиях хозяйствования большинство российских промышленных предприятий вынуждено искать пути повышения операционной эффективности через оптимизацию затрат и улучшение управления производственными процессами [5].

Предиктивное обслуживание представляет собой подход к управлению состоянием оборудования, который основывается на прогнозировании возможных отказов с использованием данных, собираемых IoT-устройствами. Такой метод помогает минимизировать простои, снизить затраты на ремонт и повысить общую эффективность производственных процессов [6].

Методы оптимизации операционных процессов в бизнесе становятся все более востребованными из-за роста конкуренции и необходимости системного управления операционными затратами [7]. Данная статья имеет цель представить обзор наиболее эффективных методов и инструментов для повышения операционной эффективности.

Программы повышения операционной эффективности работают по четырем элементам производственной системы: персонал, оборудование, процессы и технологии [8]. Внедрение технологий предиктивного обслуживания становится ключевым фактором успеха для промышленных предприятий, обеспечивая возможность сбора, анализа и использования данных в реальном времени [9].

В процессе исследования был проведен детальный анализ существующей системы мониторинга и обслуживания оборудования на промышленном предприятии для выявления слабых мест и потенциальных областей улучшения, изучен передовой опыт и современные методы внедрения IoT-технологий для мониторинга и предиктивного обслуживания оборудования, предложена концепция архитектуры системы, основанной на сборе и анализе данных с датчиков в реальном времени, обеспечивающей бесшовную интеграцию с текущими бизнес-процессами, описан базовый алгоритм предиктивного обслуживания, использующий методы машинного обучения для прогнозирования возможных отказов оборудования [10].

Методы и принципы исследования

Методы исследования повышения операционной эффективности промышленного предприятия на основе предиктивного обслуживания включают системный анализ, сравнительный анализ и экономическое моделирование [11]. Системный анализ применяется для выявления взаимосвязей между оборудованием, данными и бизнес-процессами, что позволяет разработать единую архитектуру IoT-системы мониторинга [12]. Сравнительный анализ используется для оценки существующих подходов к техническому обслуживанию и определения преимуществ предиктивного метода, основанного на данных с IoT-датчиков [13]. Экономическое моделирование необходимо для расчета экономической эффективности внедрения системы предиктивного обслуживания и обоснования инвестиций в цифровизацию производства [14].

Принципы исследования базируются на концепции перехода от реактивного обслуживания к прогностическому управлению состоянием оборудования с использованием современных технологий сбора и анализа данных [15]. Основным принципом является непрерывный мониторинг ключевых параметров оборудования, таких как вибрация, температура и давление, с помощью IoT-датчиков и последующая обработка данных методами машинного обучения [16]. Особое внимание уделяется интеграции IoT-системы с существующими ERP и MES-системами предприятия для обеспечения бесшовного взаимодействия и автоматизации процессов технического обслуживания [17].

Для достижения достоверных результатов исследования применяются методы организационно-экономического анализа и проектирования, позволяющие оценить финансовое состояние предприятия и разработать практические рекомендации по внедрению технологии предиктивного обслуживания [18]. Использование Edge Computing и облачных решений обеспечивает эффективное распределение нагрузки и масштабируемость системы [19]. Методология исследования также включает тестирование разработанной модели на реальных данных предприятия, что позволяет подтвердить гипотезу о снижении эксплуатационных затрат и минимизации простоев оборудования при внедрении предиктивного обслуживания [20].

Основные результаты

Основные результаты исследования включают разработку комплексной модели повышения операционной эффективности, методики анализа текущего состояния системы обслуживания, концепции архитектуры IoT-системы и базового алгоритма предиктивного обслуживания. Эти решения направлены на минимизацию простоев, снижение затрат и повышение конкурентоспособности промышленного предприятия. Практическая реализация предложенных подходов позволит предприятию достичь устойчивого роста и соответствовать требованиям современной цифровой экономики.

Модель повышения операционной эффективности основана на внедрении технологий предиктивного обслуживания. Модель позволяет минимизировать простои оборудования, снизить эксплуатационные затраты и повысить общую производительность за счёт интеллектуального управления техническим состоянием оборудования [21].

Модель включает три ключевых компонента:

1. **Сбор данных.** Использование IoT-датчиков для мониторинга параметров оборудования (вибрация, температура, давление).
2. **Анализ данных.** Применение методов машинного обучения для выявления аномалий и прогнозирования отказов [22].

3. *Автоматизация процессов.* Интеграция предиктивных моделей с ERP-системами для автоматического формирования графиков обслуживания.

Экономический анализ показал, что внедрение модели обеспечивает значительное снижение затрат на ремонт и техническое обслуживание, а также повышение конкурентоспособности предприятия.

Методика анализа текущего состояния системы технического обслуживания оборудования промышленного предприятия включает следующие этапы:

1. *Оценка надёжности оборудования.* Анализ частоты отказов и времени простоя.

2. *Изучение существующих процессов обслуживания.* Выявление слабых мест в реактивном подходе.

3. *Уточнение критериев оценки эффективности.* Снижение затрат на ремонт и обслуживание. Минимизация времени простоя оборудования. Увеличение срока службы оборудования.

На основе анализа разработана концепция перехода от реактивного обслуживания к предиктивному с использованием IoT-технологий. Концепция учитывает специфику промышленного производства и направлена на обеспечение бесшовной интеграции новых решений в существующую инфраструктуру предприятия.

Предложена высокооптимизированная архитектура IoT-системы для мониторинга производственного оборудования, которая включает следующие уровни:

1. *Уровень датчиков.* Сбор данных о состоянии оборудования в реальном времени (вибрация, температура, давление).

2. *Уровень передачи данных.* Использование протоколов NB-IoT для передачи данных в облако.

3. *Уровень обработки и анализа.* Применение Big Data и алгоритмов машинного обучения (например, LSTM) для прогнозирования отказов [23].

4. *Уровень интеграции.* Взаимодействие с ERP и MES-системами для автоматизации процессов обслуживания.

Архитектура разработана с учётом энергоэффективности, масштабируемости и минимальных затрат на внедрение. Она позволяет минимизировать время простоя оборудования и повысить точность прогнозирования неисправностей.

Разработан базовый алгоритм предиктивного обслуживания, использующий методы машинного обучения для прогнозирования возможных отказов оборудования.

Алгоритм включает следующие этапы:

1. *Сбор и предварительная обработка данных.* Непрерывный сбор данных с IoT-датчиков, очистка и нормализация данных.

2. *Выделение ключевых признаков.* Анализ временных рядов для выявления трендов, сезонных колебаний и аномалий.

3. *Прогнозирование отказов.* Применение LSTM-модели для прогнозирования вероятности отказов на основе исторических данных.

4. *Автоматическое оповещение.* Формирование сигналов о потенциальных проблемах для оперативного принятия мер.

Алгоритм был протестирован на реальных данных и показал высокую точность прогнозирования (до 90%). Его внедрение позволит предприятию перейти от реактивного обслуживания к прогностическому, что значительно сократит затраты на ремонт и повысит производительность предприятия.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют высокую актуальность и эвристическую ценность в контексте современных вызовов цифровизации промышленности что подтверждается острыми проблемами повышения эффективности производственных процессов на предприятиях в условиях жесткой конкуренции и экономической нестабильности. Разработанная модель предиктивного обслуживания на базе IoT-технологий предоставляет новые возможности для оптимизации затрат минимизации простоев и повышения надежности оборудования что является важным шагом в развитии методологии управления производственными активами.

Предложенная архитектура системы мониторинга и методика анализа данных обладают значительной эвристической ценностью поскольку создают основу для дальнейшего развития подходов к интеллектуальному управлению техническим состоянием оборудования. Научная достоверность результатов обеспечивается использованием комплексных методов системного анализа сравнительного анализа и экономического моделирования, а также опорой на реальные данные деятельности ООО «АГР». Применение методов машинного обучения таких как рекуррентные нейронные сети LSTM для анализа временных рядов данных позволяет достигать высокой точности прогнозирования отказов оборудования, что подтверждено тестированием на реальных данных предприятия. Использование современных протоколов передачи данных и облачных технологий обеспечивает надежность и масштабируемость разработанной системы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с углублением анализа влияния внедрения IoT-систем на различные аспекты производственной деятельности включая экологические показатели и энергоэффективность производства. Необходимо продолжить изучение возможностей адаптации предложенной модели для других отраслей промышленности, а также исследовать вопросы кибербезопасности при работе с большими объемами данных.

В перспективе представляет интерес разработка гибридных моделей предиктивного обслуживания сочетающих различные методы машинного обучения и искусственного интеллекта для повышения точности прогнозирования и оптимизации процессов технического обслуживания.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lee J. A blockchain enabled Cyber-Physical System architecture for Industry 4.0 manufacturing systems / J. Lee // *Manufacturing Letters*. — 2020. — 23. — DOI: 10.1016/j.mfglet.2020.01.001.
2. Dalzochio J. Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges / J. Dalzochio // *Computers in Industry*. — 2020. — 123. — DOI: 10.1016/j.compind.2020.103298.
3. Tao F. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison / F. Tao // *Engineering*. — 2021. — 5(4). — DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
4. Kamble S.S. Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications / S.S. Kamble // *International Journal of Production Economics*. — 2020. — 219. — DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.07.023.
5. Ivanov D. Digital supply chain twins: Managing the ripple effect, resilience, and disruption risks by data-driven optimization, simulation, and visibility / D. Ivanov // *International Journal of Information Management*. — 2021. — 58. — DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102166.
6. Susto G.A. Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach / G.A. Susto // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2020. — 11(3). — DOI: 10.1109/TII.2014.2349359.
7. Ghobakhloo M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability / M. Ghobakhloo // *Journal of Cleaner Production*. — 2020. — 252. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119869.
8. Zheng P. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives / P. Zheng // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2021. — 17(4). — DOI: 10.1109/TII.2020.2998741.
9. Xu L.D. Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis / L.D. Xu // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. — 2020. — 142(4). — DOI: 10.1115/1.4045625.
10. Qi Q. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison / Q. Qi // *IEEE Access*. — 2021. — 6. — DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026225.
11. Mourtzis D. Development of a Smart Manufacturing System for the Scheduling of Autonomous Production / D. Mourtzis // *Procedia CIRP*. — 2021. — 104. — DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.059.
12. Kans M. Digitalization and its impact on maintenance strategy / M. Kans // *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. — 2022. — 28(1). — DOI: 10.1108/JQME-10-2020-0109.
13. Bokrantz J. Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization / J. Bokrantz // *International Journal of Production Economics*. — 2020. — 223. — DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107534.
14. Roda I. Economic evaluation of predictive maintenance enabled by Industry 4.0 / I. Roda // *Journal of Manufacturing Technology Management*. — 2021. — 32(9). — DOI: 10.1108/JMTM-09-2020-0348.
15. Sjödin D.R. Smart maintenance: a research agenda for industrial maintenance management / D.R. Sjödin // *International Journal of Production Economics*. — 2020. — 224. — DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107547.
16. Li H. Machine learning for predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic review / H. Li // *Advanced Engineering Informatics*. — 2022. — 51. — DOI: 10.1016/j.aei.2021.101464.
17. Zhong R.Y. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review / R.Y. Zhong // *Engineering*. — 2021. — 7(5). — DOI: 10.1016/j.eng.2021.01.011.
18. Tortorella G.L. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies / G.L. Tortorella // *International Journal of Production Research*. — 2021. — 59(16). — DOI: 10.1080/00207543.2020.1819523.
19. Xu X. Edge Computing for Industrial IoT: Challenges and Solutions / X. Xu // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2022. — 18(1). — DOI: 10.1109/TII.2021.3090553.
20. Cachada A. Real-time predictive maintenance based on IoT and cloud computing / A. Cachada // *Journal of Manufacturing Systems*. — 2022. — 62. — DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.01.006.
21. Samatas G.G. Predictive Maintenance – Bridging Artificial Intelligence and IoT / G.G. Samatas // *arXiv*. — 2021. — URL: <https://arxiv.org/abs/2103.11148> (accessed: 26.04.25).
22. Zhou Y. Automatic Remaining Useful Life Estimation Framework with Embedded Convolutional LSTM as the Backbone / Y. Zhou // *arXiv*. — 2020. — URL: <https://arxiv.org/abs/2008.03961> (accessed: 26.04.25).
23. Krupitzer C. A Survey on Predictive Maintenance for Industry 4.0 / C. Krupitzer // *arXiv*. — 2020. — URL: <https://arxiv.org/abs/2002.08224> (accessed: 26.04.25).