

РОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОЗДАНИИ И РАЗВИТИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРУЕМОГО И ПРЕДПИСЫВАЮЩЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

THE ROLE OF MODERN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE CREATION AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED PREDICTIVE AND PRESCRIPTIVE MAINTENANCE SYSTEMS IN INDUSTRY

**B. Palyukh
A. Chesalov**

Summary. The main objective of this study is to identify the main advanced information technology areas and technologies that need to be created, developed and used in modern automated predictive and prescriptive maintenance systems for multi-stage technological processes in industry. The study resulted in the formation of a list of priority production automation tasks in conjunction with modern technologies and artificial intelligence (AI) technologies in the context of the transition from the concept of the digital economy to the data economy. An analysis was made of the possibility of integrating AI with such systems as a production management system, an enterprise asset management system, a resource planning system, a product quality management system, and a computerized maintenance management system. This research enables scientists and engineers to accelerate the process of finding optimal solutions to manufacturing design problems and creating automated predictive and prescriptive maintenance systems. Integrating AI technologies with manufacturing systems enables the creation of intelligent manufacturing environments that can adapt to changes and optimize processes in real time. Such systems can improve the efficiency of manufacturing processes, reduce equipment maintenance costs, and improve product quality.

Keywords: predictive maintenance, industrial Internet of Things, edge artificial intelligence, manufacturing execution system, computerized maintenance management system, industrial ecosystem.

Палюх Борис Васильевич

д.т.н., профессор,

Тверской государственный технический университет

pboris@tstu.tver.ru

Чесалов Александр Юрьевич

к.т.н., генеральный директор

ООО «Программные системы Атлансис», г. Тверь

achesalov@mail.ru

Аннотация. Основная цель данного исследования заключается в определении основных передовых информационно-технологических направлений и технологий, которые необходимо создавать, развивать и использовать в современных автоматизированных системах прогнозируемого и предписывающего обслуживания многостадийных технологических процессов в промышленности.

В процессе исследования сформирован перечень приоритетных производственных задач автоматизации во взаимосвязи с современными технологиями и технологиями искусственного интеллекта (ИИ) в условиях перехода от концепции цифровой экономики к экономике данных. Выполнен анализ возможности интеграции ИИ с такими системами, как система управления производством, система управления активами предприятия, система планирования ресурсами, система управления качеством продукции, компьютеризированной системой управления техническим обслуживанием.

Данное исследование позволяет ученым и инженерам ускорить процесс поиска оптимальных путей решения производственных задач проектирования и создания автоматизированных систем прогнозируемого и предписывающего обслуживания. Интеграция технологий ИИ с производственными системами позволяет создавать интеллектуальные производственные среды, способные адаптироваться к изменениям и оптимизировать процессы в реальном времени. Такие системы позволяют повысить эффективность производственных процессов, снизить затраты на обслуживание оборудования и улучшить качество продукции.

Ключевые слова: прогнозируемое обслуживание, промышленный Интернет вещей, периферийный искусственный интеллект, система управления производством, компьютеризированная система управления техническим обслуживанием, промышленная экосистема.

Введение

В текущих экономических условиях, когда концепция развития цифровой экономики сменяется новым трендом развития — экономикой данных, внедрение передовых вычислительных и прорывных информационных технологий в промышленных экосистемах

является приоритетным направлением цифровой трансформации промышленных предприятий различных отраслей экономики.

Цель цифровой трансформации промышленных предприятий должна заключаться в реализации ряда комплексных программ и проектов основывающихся

на прорывных и перспективных технологиях «Индустрии 4.0», которые, прежде всего, включают в себя технологии искусственного интеллекта (ИИ), позволяющие создавать на первом этапе новую цифровую инфраструктуру промышленности, а в итоговом результате — экосистему, способную не только объединить разрозненные цифровые решения, платформы и системы, а также дать толчок к формированию и развитию актуальных и современных комплексных решений для соответствующих отраслей экономики [1, 2, 3, 4].

Одним из наиболее востребованных решений для промышленности являются автоматизированные системы прогнозируемого и предписывающего обслуживания, предназначенные для управления многостадийными технологическими процессами. В их основе лежат современные информационные технологии, которые обеспечивают сбор, разметку и верификацию больших объемов разнородных данных, поступающих от сотен тысяч интеллектуальных устройств. Эти данные используются системами ИИ для формирования точной и релевантной прогнозной аналитики.

Цель исследования заключается в выявлении ключевых современных информационно-технологических направлений и технологий, активно используемых при разработке и совершенствовании передовых автоматизированных систем прогнозируемого и предписывающего обслуживания. Кроме того, работа направлена на определение перечня приоритетных задач автоматизации в производственной сфере и демонстрацию их тесной взаимосвязи с технологиями ИИ.

Выделим следующие приоритетные информационно-технологические направления, в рамках которых требуется создавать и развивать автоматизированные системы прогнозируемого и предписывающего обслуживания:

1. Инжиниринг ИИ

- Использование методологии DevOps (от англ. Development & Operations) для автоматизации процессов сборки, настройки, развертывания и интеграции программного обеспечения в технологических, производственных и бизнес-процессах.
- Применение подхода DataOps (от англ. Data Operations) для процессно-ориентированной разработки и обеспечения доступа к большим объемам разнородных данных.
- Реализация MLOps (от англ. Machine Learning Operations) для развертывания, управления и поддержки моделей машинного обучения в рамках промышленных автоматизированных систем.

2. Объяснимый и доверенный ИИ

- Создание и применение этичных, объяснимых и безопасных промышленных интеллектуальных систем.

- Соблюдение законодательства и рекомендаций соответствующих организаций в области защиты информации и персональных данных.

3. Композитный ИИ

- Комбинирование различных технологий и систем ИИ (экспертные, аналитические и прогнозные системы; языковые и графические системы ИИ, и др.) для повышения достоверности и точности результатов анализа данных и прогнозов.
- Объединение разнородных данных (структурированных, неструктурированных, временных рядов, изображений и других) для всестороннего и комплексного анализа.

4. Периферийный ИИ для промышленного Интернета вещей

- Использование периферийного ИИ (Edge AI) для оперативного сбора и обработки данных на самих «умных» датчиках, контроллерах и устройствах в режиме реального времени.
- Уменьшение временных и финансовых затрат, и вычислительной нагрузки на централизованные дата-центры и каналы передачи данных посредством локального сбора и обработки данных.

5. Интеллектуальные помощники

- Разработка программного обеспечения с интеллектуальными функциональными возможностями, которые предоставляют возможность профильным специалистам принимать актуальные и обоснованные решения.
- Использование виртуальных помощников для автоматизации простых операций с данными.

6. Облачные сервисы

- Применение облачных сервисов для хранения, верификации, анализа и представления больших объемов разнородных данных.
- Использование облачных сервисов для машинного обучения и формирования аналитических данных и отчетов.

7. Автономные автоматизированные системы

- Создание самообучающихся и самонастраивающихся автоматизированных систем, способных самостоятельно приспосабливаться обработке новых разнородных данных, поступающих из разных источников данных.
- Внедрение автономных решений для минимизации вмешательства человеческого фактора в эксплуатации оборудования.

8. Цифровые двойники

- Создание виртуальных копий физического оборудования для моделирования, обработки и прогнозирования его состояния.
- Использование цифровых двойников для тестирования сценариев и улучшения производственных процессов обслуживания промышленного оборудования.

9. Обработка больших данных
 - Применение технологий больших данных для сбора, хранения и обработки информации от множества датчиков, оборудования, автоматизированных и информационных систем.
 - Использование глубокой аналитики для выявления закономерностей в появлении аномалий и прогнозирования отказов оборудования.
10. Информационная безопасность
 - Обеспечение защиты от кибератак, особенно в условиях использования данных с распределенных датчиков и систем промышленного Интернета вещей.
 - Внедрение механизмов авторизации, аутентификации и шифрования передаваемых и хранимых данных.
11. Нейроморфные вычисления и квантовые технологии
 - Исследование и применение нейроморфных вычислений для повышения эффективности обработки данных.
 - Использование квантовых технологий для решения сложных задач оптимизации и прогнозирования.
12. Интеграция с производственными системами
 - Интеграция систем прогнозируемого обслуживания с системой управления производственными ресурсами и системой управления производством позволяет повысить качество реализации ключевых технологических, научно-исследовательских и производственных процессов промышленного предприятия.
13. Блокчейн для точного учета и контроля процессов
 - Использование распределенных технологий обработки данных для обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности данных, получаемых с датчиков и оборудования.
14. Гибридные модели машинного обучения
 - Комбинирование традиционных методов машинного обучения с глубоким обучением для повышения точности прогнозов.
 - Использование моделей, адаптированных под специфику конкретного оборудования и условий эксплуатации.
15. Роботизация процедур обслуживания
 - Использование роботизированных систем для автоматизации простых рутинных задач диагностики и технического обслуживания промышленного оборудования.



Рис. 1. Кривая зрелости технологий Gartner

Все вышеперечисленные направления в создании и развитии промышленных автоматизированных систем формируют основу для создания современных, эффективных и надёжных систем прогнозируемого и предписывающего обслуживания, которые способны значительно снизить производственные риски и повысить эффективность работы промышленных предприятий [1, 2].

Основная задача разрабатываемых автоматизированных систем заключается в реализации сквозной автоматизации сложных и трудоёмких процессов сбора и обработки больших объемов разнородных данных, поступающих от миллионов интеллектуальных устройств в рамках промышленного Интернета вещей (IIoT). Эти системы должны предоставлять цифровые сервисы для обработки и анализа данных с использованием технологий ИИ, включая современные промышленные облачные распределенные системы ИИ (англ. Cloud AI Services) и периферийный ИИ (англ. Edge Artificial Intelligence, Edge AI). Целью таких решений является извлечение новых знаний и создание дополнительной ценности из имеющихся данных для повышения эффективности, безопасности и качества производства продукции и услуг [3].

Технологии ИИ уже активно преобразуют различные секторы промышленности, предоставляя инновационные решения для прогнозного технического обслуживания, мониторинга качества продукции, выявления дефектов, прогнозирования рыночного спроса, оптимизации производственных процессов и решения других задач. Компании, внедряющие ИИ, получают значительные преимущества, которые включают: снижение затрат, повышение эффективности и улучшение безопасности. С ростом рынка промышленного ИИ до \$72,5 млрд долларов США к 2025 году и ежегодным темпом роста в 31 %, эти технологии станут ключевым фактором конкурентоспособности в промышленности [2].

Современное производство становится всё более сложным и технологичным, что требует реализации новых подходов к управлению промышленными предприятиями на основе новых информационных технологий. Одна из таких прорывных технологий — это искусственный интеллект, который позволяет обеспечить высокий уровень автоматизации, темп и точность принятия решений. Интеграция ИИ с такими системами, как система управления производством, система планирования ресурсами, система управления качеством продукции, система управления активами предприятия, компьюте-

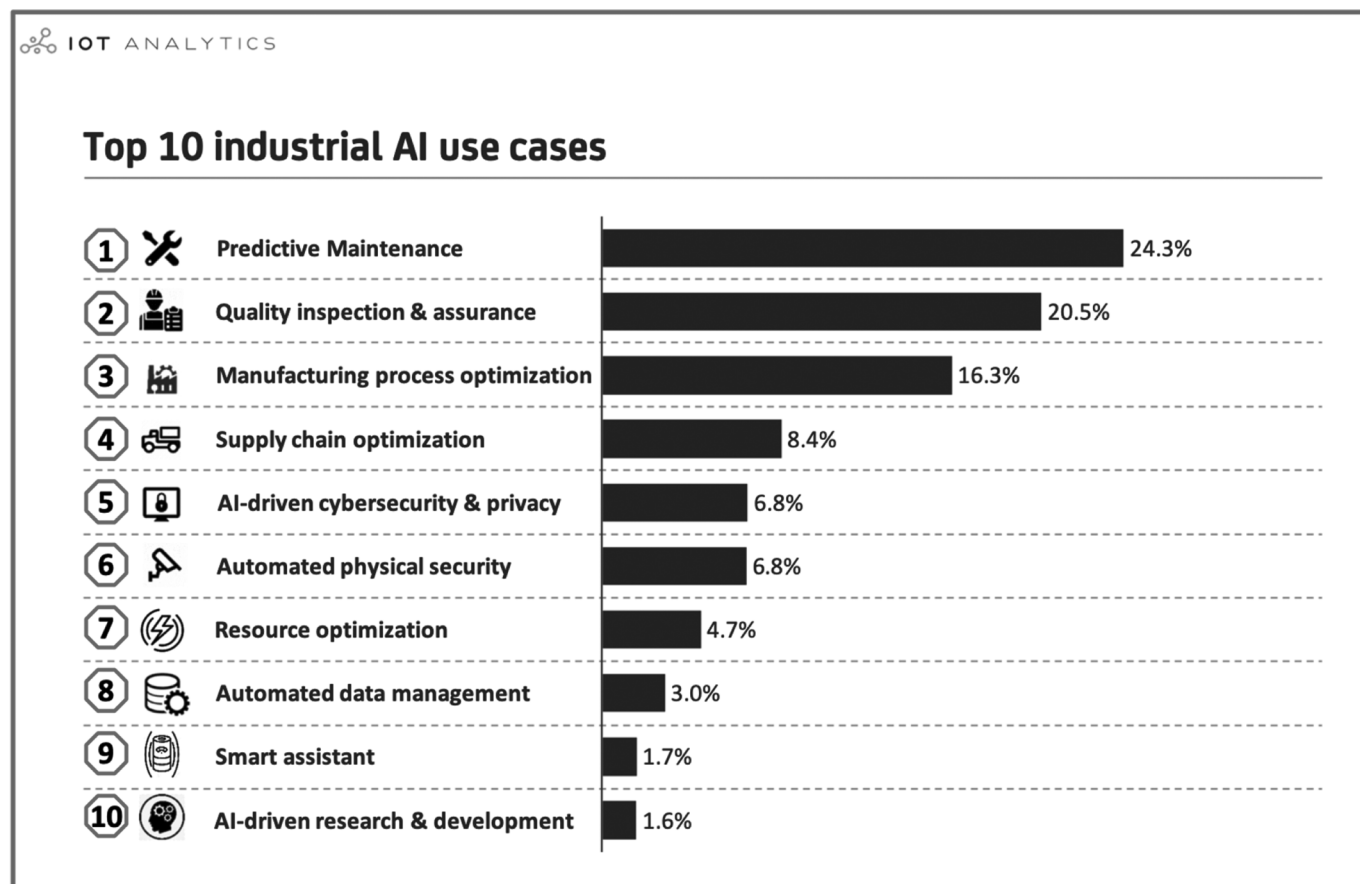


Рис. 2. Десять передовых промышленных направлений использования технологий ИИ.
Отчет IoT Analytics о рынке промышленного ИИ 2020–2025

ризированной системой управления техническим обслуживанием и другими отраслевыми производственными системами, открывает новые возможности для управления рисками, повышения производительности и улучшения качества выпускаемой продукции [1].

Рассмотрим несколько примеров взаимодействия ИИ с производственными системами:

- Система управления производством (MES) управляет и контролирует производственные процессы в реальном времени. ИИ может значительно расширить функциональность MES, добавляя возможности прогнозирования, анализа данных и принятия решений. ИИ способен анализировать данные с датчиков и оборудования, предсказывать возможные сбои в производстве и предлагать оптимальные пути их устранения. Это позволяет минимизировать простои и повысить общую производительность.
- Система управления активами предприятия (EAM) отвечает за контроль процессов их своевременного технического обслуживания. ИИ может по-

мочь в оптимизации и контроле данных процессов.

- Система планирования ресурсами (ERP), на сегодняшний день, является одной и обеспечивающих подсистем, которая контролирует финансовые потоки, бюджетирование, планирование и реализацию закупок, производство продукции и управление персоналом. ИИ может расширить функциональные возможности ERP. Например, ИИ может анализировать текущую ситуацию на рынке и предсказывать спрос на выпускаемую продукцию. В качестве иллюстрации (на рисунке 3) представлено решение задачи автоматизации прогнозирования спроса.
- Система управления качеством продукции (QMS) отвечает за контроль качества производимой продукции. ИИ способен значительно ускорить процесс выявления брака и существенно минимизировать затраты на его устранение. На сегодняшний день, возрастает роль специалистов, которые тщательно контролируют технологические процессы производства и сертификации

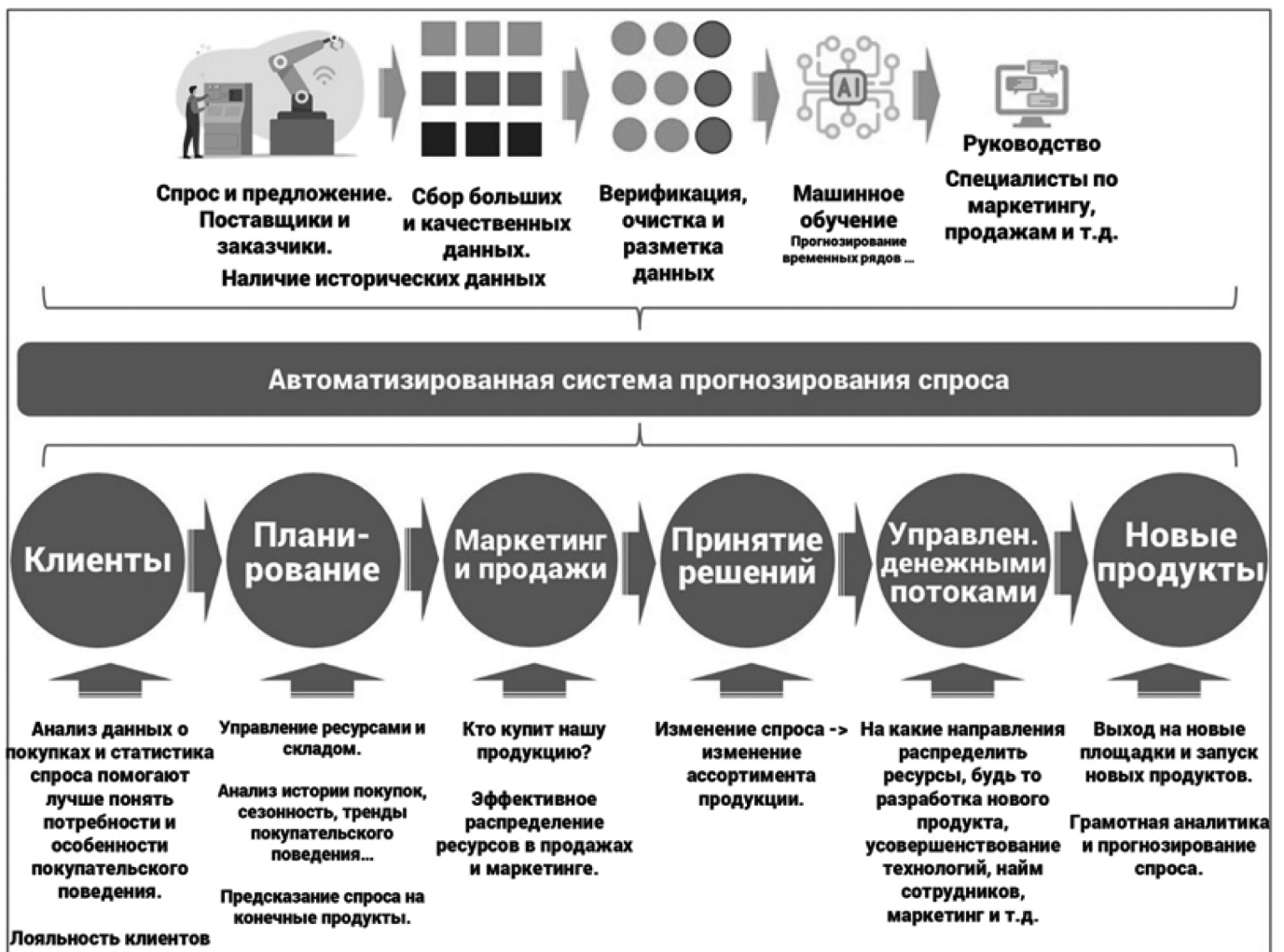


Рис. 3. Пример автоматизации прогнозирования спроса

соответствующей продукции с использованием интеллектуальных автоматизированных систем, которые умеют собирать, обрабатывать и анализировать соответствующую информацию. Существуют и специальные автоматизированные системы, которые осуществляют контроль качества воздуха, водоемов и сточных вод, радиационного фона и окружающей среды, на основе данных, собираемых специальными датчиками. Все эти системы требуют особых подходов в их создании и эксплуатации (от математического описания проблемы, программирования, сбора и верификации данных, моделирования, обработки и проверки результатов до получения итогового результата) [1]. На сегодняшний день, доля рынка систем автоматизации процессов контроля качества и обнаружение дефектов продукции на промышленных предприятиях составляет 20,5 %, что является существенной частью рынка промышленной автоматизации. В связи с тем, что на многих предприятиях технологический процесс производства продукции точно формализован,

сам процесс создания или совершенствования автоматизированных систем строго детерминирован. Четкое понимание того, как реализуется технологический процесс позволяет нам определить на каких этапах и для решения каких задач автоматизации будут использоваться те или иные информационные технологии сбора, обработки и анализа данных, в том числе позволяет оценить возможность и целесообразность применения технологий ИИ. Например, применение глубокого машинного обучения для анализа данных, получаемых с производственных линий, позволяет решить задачу контроля качества с высокой точностью и в режиме реального времени.

На рисунке 4 представлен пример технологического процесса контроля качества продукции, который раскрывает общий системный подход к его автоматизации.

Автоматизация входного контроля материалов и раннее обнаружение дефектов, позволяют



Рис. 4. Пример автоматизации процесса контроля качества продукции

предотвратить перемещение дефектной продукции по производственной линии, что сказывается на повышении качества выпускаемой продукции. В свою очередь, сбор и накопление исторических данных с производственных линий, посредством датчиков промышленного Интернета вещей, позволяют значительно улучшить работу промышленных систем контроля качества.

- ИИ и компьютеризированная система управления техническим обслуживанием (CMMS), которая управляет техническим обслуживанием оборудования. ИИ может значительно улучшить функциональность CMMS, предоставляя возможности прогнозной аналитики и автоматизации, в том числе на основании данных, полученных от автоматизированной системы прогнозируемого или предписывающего обслуживания. Прогнозируемое обслуживание — это часть стратегии развития промышленного предприятия и стратегия эксплуатации промышленного оборудования, в реализации которой используется дополнительное оборудование, программное обеспечение и новые технологии обработки и анализа данных для обнаружения неисправностей оборудования, устройств и технологических процессов с целью их устранения до того момента, как они выйдут из строя. Несомненно, важную роль в прогнозируемом обслуживании играет применение новых технологий ИИ. Они позволят современным предприятиям перейти от реактивного или превентивного обслуживания к прогнозируемому,

а в перспективе и к предписывающему обслуживанию.

В настоящее время задача прогнозируемого обслуживания является одним из ключевых мировых трендов в области промышленной автоматизации. Согласно данным, доля рынка промышленной автоматизации, связанная с этим направлением, составляет 24,3 %, что эквивалентно более 7,5 миллиардам долларов США. Ожидается, что к 2028 году объем этого рынка достигнет почти 14,28 миллиардов долларов США [2]. На рисунке 6 представлен пример процесса и подхода к автоматизации прогнозируемого обслуживания, а также его интеграции с производственными информационными системами.

ИИ занимает центральное место в обработке значительных объемов данных, поступающих от датчиков и промышленного оборудования. Ключевые задачи ИИ в рамках прогнозируемого обслуживания включают:

- Описательный анализ — выявление того, что произошло.
- Диагностический анализ — определение причин возникновения аномалий.
- Прогностический анализ — предсказание возможных отказов.
- Предписывающий анализ — рекомендации по устранению проблем.

Для решения этих задач используются различные методы ИИ, включая машинное обучение, глубокое ма-

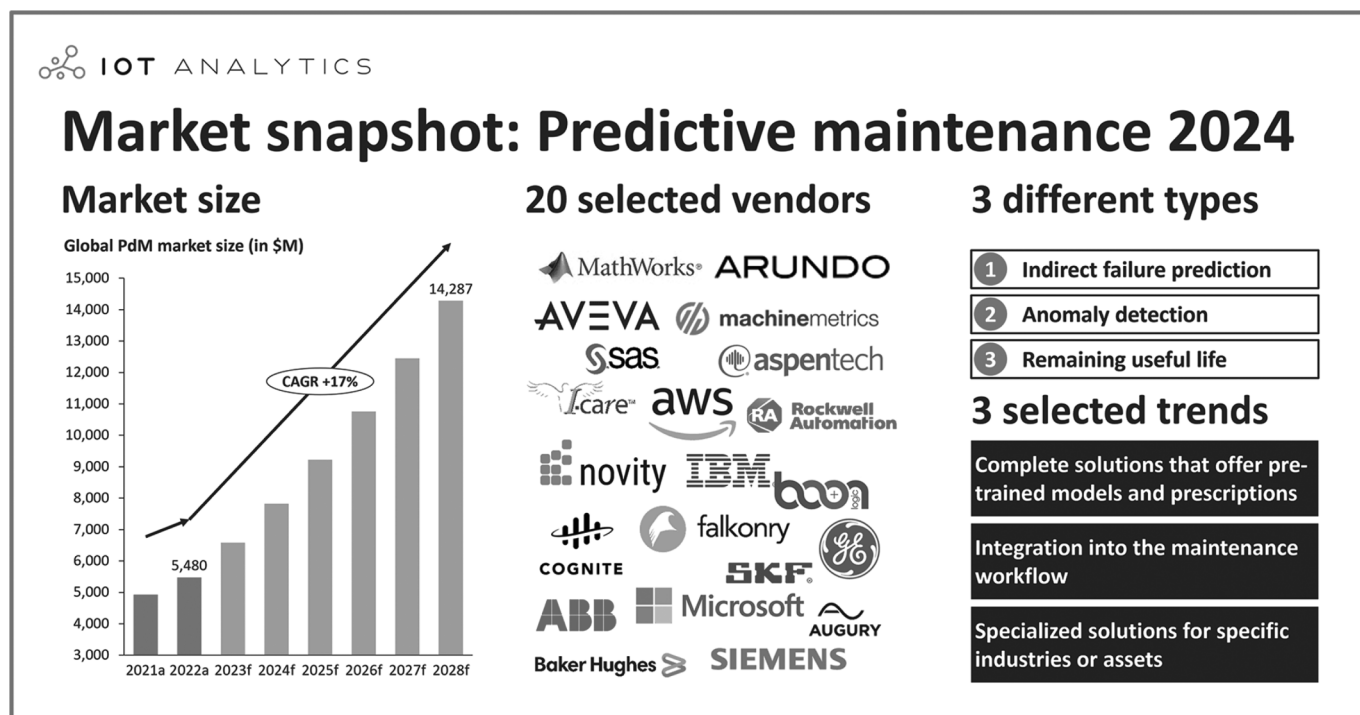


Рис. 5. Аналитический отчет IOT Analytics о рынке предиктивного технического обслуживания 2023–2028: 3 основных направления



Рис. 6. Пример автоматизации процесса прогнозируемого обслуживания

шинное обучение и другие. Для эффективной работы промышленных автоматизированных систем требуются большие вычислительные ресурсы, способные обрабатывать большие данные и выдавать точные прогнозы.

ИИ способен анализировать данные, собираемые датчиками и предсказывать возможность выхода из строя оборудования, что позволяет избежать незапланированных простоев в работе и снизить затраты на его ремонт. Кроме того, ИИ может оптимизировать графики технического обслуживания, учитывая множество факторов, таких как загруженность оборудования и доступность персонала, что делает процесс управления техническим обслуживанием более эффективным.

- Интеграция ИИ с другими промышленными автоматизированными системами. ИИ может быть интегрирован с другими отраслевыми системами, такими как системы управления цепочками поставок, системы управления энергопотреблением и системы управления персоналом. Все это позволяет создать единую цифровую экосистему

промышленного предприятия, которая охватывает все аспекты производственного процесса и обеспечивает максимальную эффективность, производительность и высокую конкурентоспособность на рынке.

Заключение

В ходе исследования определены ключевые информационно-технологические направления и технологии, которые активно используются при разработке и совершенствовании передовых автоматизированных систем прогнозируемого и предписывающего обслуживания. Определен перечень приоритетных задач автоматизации в производственной сфере для решения которых необходимо применение ИИ. Данное исследование позволит ученым и инженерам выработать новые подходы к решению задач автоматизации прогнозируемого и предписывающего обслуживания в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чесалов А.Ю. (2024). Применение прорывных технологий искусственного интеллекта в промышленных экосистемах Индустрии 4.0 // Перспективные интеграционные процессы в мировой экономике: нооподход / Сборник материалов IX Санкт-Петербургского международного экономического конгресса (СПЭК-2024) / Под общ. ред. С.Д. Бодрунова. Том 2. — М.: ИНИР им. С.Ю. Витте, 2024. — С. 176–184.
2. Галкин Д.И., Чесалов А.Ю. (2023). Перспективы цифровой трансформации производителей оборудования неразрушающего контроля на примере опыта НИИИИ МНПО «СПЕКТР» // XXIII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике «Умные технологии НК. Единство теории и практики»: сб. тр. Москва, 23–25 октября 2023 г. С. 187–170. — М.: Издательский дом «Спектр». — С. 167–170.
3. Палюх Б.В., Чесалов А.Ю. (2023). Методологический подход к цифровой трансформации предприятий отрасли производителей оборудования неразрушающего контроля // «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (ИП&УЗ — 2023) : сборник научных трудов XXVI Российской научной конференции. 29–30 ноября 2023 г. / под науч. ред. Ю.Ф. Тельнова. — Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова». — С. 256–260.
4. Lee J, Lapira E, Bagheri B, Kao H. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf Letter* 2013;38:41. [Электронный ресурс] [www.researchgate.net URL: https://www.researchgate.net/publication/262880066_Recent_advances_and_trends_in_predictive_manufacturing_systems_in_big_data_environment](https://www.researchgate.net/publication/262880066_Recent_advances_and_trends_in_predictive_manufacturing_systems_in_big_data_environment) (дата обращения: 18.03.2025)
5. Explore Beyond GenAI on the 2024 Hype Cycle for Artificial Intelligence. [Электронный ресурс] [www.gartner.com URL: https://www.gartner.com/en/articles/hype-cycle-for-artificial-intelligence](https://www.gartner.com/en/articles/hype-cycle-for-artificial-intelligence) (дата обращения: 16.03.2025)
6. Галкин Д.И., Ефимов А.Г., Чесалов А.Ю. (2024). Перспективы создания цифровой инфраструктуры данных в НК // Территория NTD — январь–март — 2024. — С. 62–65.
7. Болтенков А.А., Сарсенбаев Е.А., Селивёрстов М.В., Каликасов Н.Т. Интеллектуализация процессов контроля и управления электроконтактным нагревом при восстановлении деталей типа диск. DOI: 10.53083/1996-4277-2021-202-08-102-107 [Электронный ресурс] [cyberleninka.ru URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualizatsiya-protseessov-kontrolya-i-upravleniya-elektrokontaktnym-nagrevom-pri-vosstanovlenii-detaley-tipa-disk](https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualizatsiya-protseessov-kontrolya-i-upravleniya-elektrokontaktnym-nagrevom-pri-vosstanovlenii-detaley-tipa-disk) (дата обращения: 22.03.2025)
8. The Top 10 Industrial AI use cases. [Электронный ресурс] [iot-analytics.com URL: https://iot-analytics.com/the-top-10-industrial-ai-use-cases/](https://iot-analytics.com/the-top-10-industrial-ai-use-cases/) (дата обращения: 04.03.2025)
9. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.A. (2015) A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
10. Мячева Оксана Дмитриевна, Ефимова Евгения Аркадьевна. Автоматизированная система учета и контроля качества продукции в экспертной лаборатории. [Электронный ресурс] [cyberleninka.ru URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-ucheta-i-kontrolya-kachestva-produktsii-v-ekspertnoy-laboratorii](https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-ucheta-i-kontrolya-kachestva-produktsii-v-ekspertnoy-laboratorii) (дата обращения: 16.03.2025)
11. Predictive maintenance market: 5 highlights for 2024 and beyond. [Электронный ресурс] [iot-analytics.com URL: https://iot-analytics.com/predictive-maintenance-market/](https://iot-analytics.com/predictive-maintenance-market/) (дата обращения: 03.03.2025)

© Палюх Борис Васильевич (pboris@tstu.tver.ru); Чесалов Александр Юрьевич (achesalov@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»