

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: АРХИТЕКТУРА, ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

А.М. Тюнина, Д.С. Кукуева, В.В. Кондусова, К.В. Зольников

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

В статье проводится комплексный анализ концепции цифровых двойников и их практического применения в современной промышленности. Исследование охватывает архитектурные особенности цифровых двойников, включая физический уровень, уровень данных и интеграции, уровень моделирования и уровень сервисов. Подробно рассмотрены технологии, лежащие в основе цифровых двойников: IoT-сенсоры, облачные платформы, машинное обучение и физико-математическое моделирование. На практическом примере прогнозирования обслуживания насосной станции продемонстрированы преимущества перехода от планового к прогнозному обслуживанию. Результаты исследования показывают, что внедрение цифровых двойников позволяет сократить затраты на обслуживание на 20-30% за счет предотвращения неплановых простоев и оптимизации ресурсов. Статья представляет ценность для специалистов в области промышленной автоматизации, цифровой трансформации и управления производственными активами.

Ключевые слова: цифровые двойники, Industry 4.0, прогнозное обслуживание, IoT, промышленная аналитика, цифровая трансформация, виртуальное моделирование, кибер-физические системы.

DIGITAL TWINS IN INDUSTRY: ARCHITECTURE, APPLICATION AND ECONOMIC EFFICIENCY

A.M. Tyunina, D.S. Kukueva, V.V. Kondusova, K.V. Zolnikov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

The article provides a comprehensive analysis of the concept of digital twins and their practical application in modern industry. The study covers the architectural features of digital twins,

including the physical layer, the data and integration layer, the modeling layer, and the service layer. The technologies underlying digital twins are considered in detail: IoT sensors, cloud platforms, machine learning and physical and mathematical modeling. Using a practical example of forecasting the maintenance of a pumping station, the advantages of switching from planned to predictive maintenance are demonstrated. The results of the study show that the introduction of digital twins can reduce maintenance costs by 20-30% by preventing unplanned downtime and optimizing resources. The article is valuable for specialists in the field of industrial automation, digital transformation and management of production assets.

Keywords: digital twins, Industry 4.0, predictive maintenance, IoT, industrial analytics, digital transformation, virtual modeling, cyber-physical systems.

Современная промышленность сталкивается с растущими требованиями к эффективности, гибкости и надежности производственных процессов. Традиционные подходы к управлению активами, основанные на плановом или корректирующем обслуживании, демонстрируют ограниченную эффективность в условиях динамично меняющейся производственной среды. Высокие затраты на unplanned downtime оборудования, растущая сложность технологических линий и необходимость оптимизации ресурсов создают потребность в принципиально новых подходах к управлению производственными активами. Концепция цифровых двойников предлагает решение этих проблем через создание виртуальных копий физических объектов, позволяющих проводить глубокий анализ, симуляцию и прогнозирование в режиме реального времени. Однако внедрение цифровых двойников сталкивается с рядом challenges, включая сложность интеграции с существующей ИТ-инфраструктурой, необходимость обработки больших объемов данных и обеспечение точности моделей. В связи с этим возникает необходимость в системном анализе архитектурных решений, технологических возможностей и экономической эффективности внедрения цифровых двойников в промышленных условиях.

Концепция цифровых двойников занимает центральное место в четвертой промышленной революции, оказывая значительное влияние на способы управления активами и производственными процессами.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического объекта или системы, которая постоянно синхронизируется с оригиналом через непрерывный обмен данными в режиме реального времени.

В этой статье мы подробно рассмотрим архитектуру цифрового двойника и проанализируем его применение для прогнозирования технического обслуживания и оптимизации процессов на «умных» заводах. Мы обсудим

ключевые компоненты цифрового двойника, такие как сбор данных с датчиков, моделирование и визуализация.

В современном производстве существует острая потребность в повышении эффективности, гибкости и надёжности производственных систем. В связи с этим концепция цифровых двойников переходит из области теоретических исследований в практическую плоскость, становясь ключевым инструментом цифровой трансформации предприятий.

Цифровой двойник представляет собой динамическую модель, которая непрерывно развивается вместе с реальным объектом. В отличие от статических CAD-моделей, цифровой двойник получает данные с датчиков и обеспечивает глубокий анализ, симуляцию и прогнозирование состояния объекта в режиме реального времени.

Актуальность этой темы обусловлена стремительным развитием технологий Интернета вещей (IoT), облачных вычислений и больших данных, которые являются основой для создания цифровых двойников. Анализ существующих исследований показывает, что интерес к использованию цифровых двойников для оптимизации жизненного цикла изделий и управления производственными цепочками постоянно растёт.

Архитектура цифрового двойника может быть представлена в виде многоуровневой модели, включающей в себя следующие ключевые компоненты:

1. Физический уровень — это сам объект, будь то станок или насос, оснащённый датчиками (IoT-сенсорами), контроллерами и исполнительными механизмами.

2. Уровень данных и интеграции — это платформа, которая собирает, обрабатывает и анализирует данные с физического объекта. Для этого используются технологии IoT-хабов, такие как Azure IoT Hub или AWS IoT Core, а также различные протоколы связи, включая MQTT и OPC UA.

3. Уровень моделирования (виртуальный двойник) включает в себя:

- Ядро системы — это набор физико-математических моделей, описывающих поведение объекта, таких как модели механики и термодинамики.

- Данные машинного обучения — модели, обученные на исторических данных, которые могут прогнозировать аномалии и отказы.

- Динамическая симуляция — позволяет «проигрывать» различные сценарии работы объекта.

4. Уровень сервисов и приложений, открывающий доступ к данным и функциональности цифрового двойника.

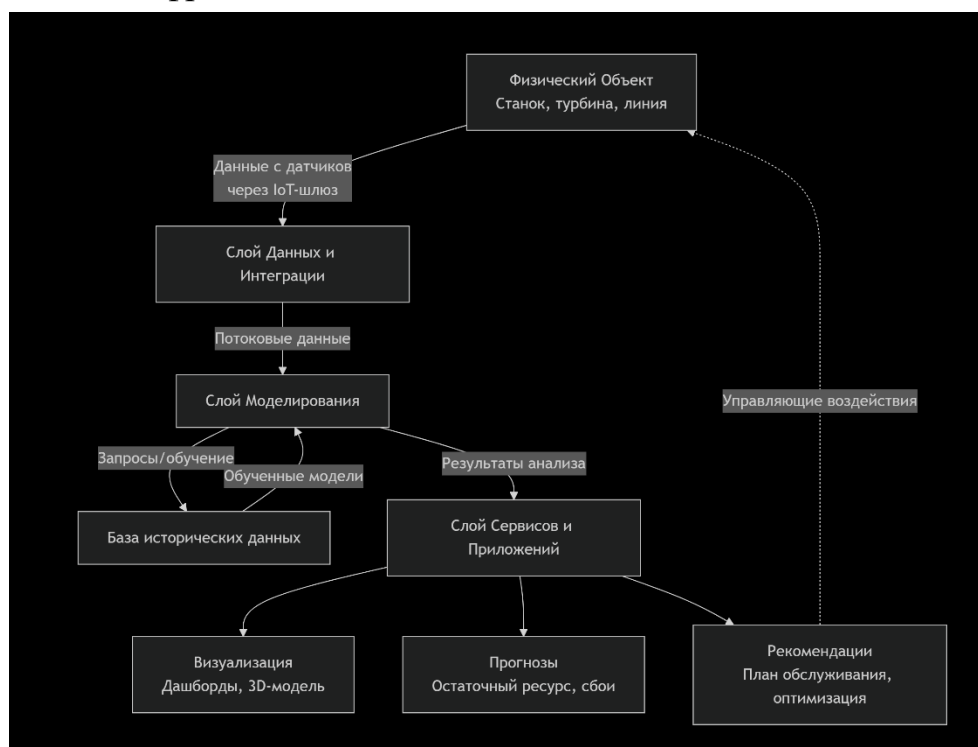


Рисунок 1– Упрощенная архитектура цифрового двойника

Система предлагает удобные интерфейсы для различных категорий пользователей, включая инженеров и операторов. Она включает в себя следующие элементы:

- Системы визуализации данных, позволяющие в реальном времени отслеживать состояние объекта.
- Инструменты анализа и диагностики, нацеленные на выявление и устранение неполадок.
- Приложения для мониторинга и управления процессами.

Панели визуализации и дашборды предоставляют актуальную информацию о состоянии и аналитические данные.

Системы поддержки принятия решений генерируют рекомендации, способствующие более эффективному принятию решений.

Рассмотрим пример применения цифрового двойника для прогнозирования обслуживания насосной станции.

В качестве исходных данных используются показания вибродатчиков, датчиков температуры и давления.

Сценарий моделирования включает в себя:

Модель машинного обучения анализирует данные о вибрации, которые предшествуют отказам подшипников, и выявляет аномальные закономерности.

Внедрение цифрового двойника позволяет перейти от планового или корректирующего обслуживания к прогнозному.

Проанализировав данные из таблицы 1, модель автоматически генерирует заявку на обслуживание и планирует его на наиболее удобное время. Это позволяет сэкономить до 20-30% затрат на ремонты по сравнению с реактивным подходом.

Результаты исследования показывают, что цифровые двойники — это не просто инструмент для визуализации, а мощный инструмент для проактивного управления и оптимизации на основе данных.

Цифровые двойники стали неотъемлемой частью процесса цифровизации промышленности. Они позволяют связывать физические активы с их виртуальными копиями для более глубокого анализа и прогнозирования.

Перспективы развития цифровых двойников в промышленности связаны с интеграцией искусственного интеллекта и технологий цифровых теней для создания самообучающихся и адаптивных систем. Особый потенциал демонстрируют подходы, сочетающие физико-математические модели с глубоким обучением для повышения точности прогнозирования. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку стандартизированных платформ для создания цифровых двойников, обеспечивающих интероперабельность между различными производителями оборудования и программного обеспечения. Важным направлением является также создание эффективных методов верификации и валидации цифровых двойников, гарантирующих соответствие виртуальных моделей реальным объектам. Учитывая растущий объем данных от IoT-устройств, особую актуальность приобретают исследования в области edge-вычислений и распределенной обработки данных для снижения задержек и обеспечения работы в режиме реального времени. Развитие цифровых двойников открывает новые возможности для создания автономных производственных систем, способных к самооптимизации и проактивному реагированию на изменения в производственной среде.

Список литературы

1. Баланов А.Н., Соколов Д.И. Цифровые двойники в промышленности: архитектура и кейсы внедрения // Автоматизация в промышленности. - № 5. - 2023. - С. 12-18.

2. Внуков А.А. Интеллектуальные системы прогнозного обслуживания на основе данных IoT: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. - Москва: Юрайт, 2022. - 185 с.

3. Орлов Д.К. Цифровые двойники сложных технических систем: от концепции до внедрения. - Москва: Инфра-Инженерия, 2024. - 204 с.

References

1. Balanov A.N., Sokolov D.I. Digital twins in industry: architecture and implementation cases // Automation in industry. - No. 5. - 2023. - pp. 12-18.

2. Vnukov A.A. Intelligent predictive maintenance systems based on IoT data: textbook. handbook for bachelor's and master's degrees. - Moscow: Yurait, 2022. 185 p.

3. Orlov D.K. Digital counterparts of complex technical systems: from concept to implementation. - Moscow: Infra-Engineering, 2024. - 204 p.