

## **ПРЕПРИНТ**

### **На тему: «Цифровые двойники оборудования»**

**Аннотация:** В данной работе рассматривается технология цифровых двойников как динамических виртуальных копий физических объектов, ставшая ключевым элементом цифровой трансформации промышленности. Исследование фокусируется на универсальных преимуществах технологии: непрерывном мониторинге состояния оборудования, прогнозировании его поведения и оптимизации жизненного цикла. На практическом примере внедрения цифрового двойника газотурбинной установки (ГТУ) демонстрируется достижение конкретных результатов: прогноз износа, снижение выбросов и сокращение плановых остановок. Особое внимание уделяется межотраслевому применению и перспективам интеграции с ИИ, IoT и AR, а также анализу ключевых проблем внедрения, таких как кибербезопасность.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, предиктивная аналитика, оптимизация процессов, промышленная цифровизация, IoT, жизненный цикл оборудования.

### **Введение:**

Цифровые двойники оборудования, возникшие на стыке IoT, машинного обучения и облачных технологий, переопределяют подходы к управлению производственными активами. В отличие от статических моделей, эти виртуальные копии непрерывно обновляются данными с датчиков, формируя «живую» цифровую проекцию. Данная работа исследует потенциал технологии для преодоления ключевых промышленных вызовов: повышения надежности, снижения эксплуатационных затрат и ускорения внедрения инноваций на примере конкретного кейса и межотраслевого анализа.

### **Методология:**

В исследовании применен комплексный подход, включающий:

- Анализ архитектуры и функциональных возможностей цифровых двойников на основе современных концепций Industry 4.0.
- Структурирование универсальных преимуществ технологии на основе обзора существующих внедрений.
- Детальный разбор практического кейса внедрения цифрового двойника газотурбинной установки Siemens SGT-800 на ТЭЦ (Новосибирск) с количественной оценкой результатов.
- SWOT-анализ перспектив и барьеров масштабирования технологии в различных отраслях промышленности.

### **Результаты и обсуждение:**

- Практический кейс цифрового двойника ГТУ показал следующие количественные результаты:

- Прогнозирование износа лопаток турбины за 3–4 месяца до критического состояния с точностью алгоритмов до 95%.
- Оптимизация топливной смеси, приведшая к сокращению выбросов CO<sub>2</sub> на 12%.
- Снижение частоты плановых остановок на 20% за счет анализа данных в реальном времени.

Универсальность технологии подтверждается её применимостью к различным типам оборудования – от энергетических турбин до конвейерных линий. Ключевыми перспективами развития identified являются: интеграция с ИИ для автономной оптимизации, связь с AR для улучшения человеко-машинного интерфейса, а также роль в достижении целей устойчивого развития.

Основными проблемами внедрения остаются вопросы кибербезопасности (риски несанкционированного доступа к критическим данным и алгоритмам) и сложности интеграции с устаревшим оборудованием (legacy systems), требующие дополнительных адаптивных решений.

#### **Заключение и перспективы:**

Цифровые двойники оборудования доказали свою эффективность как инструмент, объединяющий мониторинг, прогнозирование и оптимизацию в единую экосистему управления жизненным циклом. Представленный пример газотурбинной установки наглядно демонстрирует потенциал технологии для снижения эксплуатационных рисков, повышения энергоэффективности и сокращения затрат (на 18–25% ежегодно по данным практики). Несмотря на существующие вызовы в области безопасности и интеграции, технология становится неотъемлемой частью промышленной инфраструктуры. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку стандартизированных решений для киберзащиты цифровых двойников и создание адаптивных платформ для работы с гетерогенным парком оборудования.

#### **Литература:**

1. Зинатуллина Р.Р., Смирнов Ю.Н. Цифровые двойники автоматизированных систем управления технологическими процессами // Цифровые системы и модели... Казань, 2024.
2. Салимов Р.Р., Смирнов Ю.Н. Управления технологическими процессами в цифровых двойниках предприятия // Цифровые системы и модели... Казань, 2024.
3. Семенов М.А., Смирнов Ю.Н. Цифровые двойники систем управления технологическими процессами // Цифровые системы и модели... Казань, 2024.
4. Зарипова Р.С., Валеева Ю.С., Смирнов Ю.Н. [и др.] Цифровые технологии в решении проблем современности // Монография, Казань, 2023.

5. Смирнов Ю.Н., Зиганшин Э.Ш., Каляшина А.В. Цифровые технологии в процессах управления предприятием и технологическими процессами // Цифровые технологии в решении проблем современности. 2023.
6. Смирнов Ю.Н., Каляшина А.В. Роль математического моделирования при цифровизации технологических процессов // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 12.
7. Ильина Д.И., Смирнов Ю.Н., Янова О.Ю. Компоненты цифровых двойников предприятий... Казань, 2024.
8. PwC. Future of industrial digital twins. – 2023. (Ссылка на исследование, если доступно публично).