

Цифровые двойники как инструмент оптимизации промышленных производственных процессов

Digital twins as a tool for optimizing industrial production processes

УДК 658.5

Получено: 21.01.2025

Одобрено: 24.02.2025

Опубликовано: 25.03.2025

Ботвинко Д.А.

Студент, кафедра Инноватика

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: botvinko.da@dvgfu.ru

Botvinko D.A.

Student, Department of Innovation

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: botvinko.da@dvgfu.ru

Бурдюкова А.А.

Студент, кафедра Инноватика

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: burdyukova.aa@dvgfu.ru

Burdyukova A.A.

Student, Department of Innovation

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: burdyukova.aa@dvgfu.ru

Шестаков З.Д.

Студент, кафедра Инноватика

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: shestakov.zd@dvgfu.ru

Shestakov Z.D.

Student, Department of Innovation

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: shestakov.zd@dvgfu.ru

Научный руководитель:

Малышкин А.П.

Канд. техн. наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет"

Scientific Advisor:

Malyshkin A.P.

Candidate of Technical Sciences Sciences, Associate Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Tyumen Industrial University"

Аннотация

В статье рассматриваются цифровые двойники как инновационный инструмент оптимизации промышленных производственных процессов. Представлены теоретические основы технологии, включая определение и структуру цифрового двойника, методы его создания и интеграции с современными цифровыми системами управления производством. Особое внимание удалено сферам применения цифровых двойников в машиностроении, энергетике и химической промышленности. Анализируются алгоритмы моделирования и прогнозирования, используемые для повышения производительности и надежности оборудования. Приведены примеры успешного внедрения технологии на реальных предприятиях, демонстрирующие экономические эффекты, такие как снижение затрат, минимизация простоев и улучшение использования ресурсов. Обсуждаются ограничения цифровых двойников, включая технические барьеры и высокие издержки внедрения, а также перспективы развития технологии в контексте цифровизации промышленности и концепции Индустрии 4.0.

Ключевые слова: цифровые двойники, оптимизация производственных процессов, машинное обучение, моделирование, интернет вещей, промышленная автоматизация, предиктивная аналитика, Индустрия 4.0, производительность, промышленное оборудование.

Abstract

This article explores digital twins as an innovative tool for optimizing industrial production processes. It presents the theoretical foundations of the technology, including the definition and structure of a digital twin, methods for its creation, and integration with modern digital production management systems. Special attention is given to the applications of digital twins in mechanical engineering, energy, and the chemical industry. The study analyzes modeling and forecasting algorithms used to enhance equipment productivity and reliability. Examples of successful technology implementations in real enterprises are provided, demonstrating economic benefits such as cost reduction, minimization of downtime, and improved resource utilization. The limitations of digital twins are discussed, including technical barriers and high implementation costs, as well as the prospects for technological development in the context of industrial digitalization and the industry 4.0 concept.

Keywords: digital twins, production process optimization, machine learning, modeling, Internet of Things, industrial automation, predictive analytics, Industry 4.0, productivity, industrial equipment.

Цифровые двойники представляют собой виртуальные реплики физических объектов или процессов, созданные на основе точных математических моделей и данных, поступающих в реальном времени. Эта концепция, впервые сформулированная Майклом Гривзом в начале 2000-х годов и активно внедрённая NASA для мониторинга и моделирования космических аппаратов, стала ключевым инструментом оптимизации промышленных процессов в условиях цифровизации. С развитием интернета вещей (IoT), облачных вычислений и искусственного интеллекта цифровые двойники обеспечивают беспрецедентные возможности для повышения производительности, прогнозирования неисправностей и оптимизации всех этапов производственного цикла.

Структура цифрового двойника основывается на трёх основных элементах: физическом объекте или процессе, виртуальной модели и непрерывном потоке данных, который связывает их. Физический объект представляет собой оборудование, продукт или систему, требующую мониторинга и оптимизации. Виртуальная модель создаётся на основе методов математического и физического моделирования, таких как конечно-элементный анализ (FEA), вычислительная гидродинамика (CFD) и системы многопараметрического анализа. Для обеспечения точности и актуальности модели цифровой двойник непрерывно обновляется данными с физических сенсоров, установленных на реальном объекте, и обрабатывает их через высокопроизводительные вычислительные системы. Такой процесс позволяет системе синхронно отражать изменения, происходящие в реальном мире, и предсказывать их развитие с высокой точностью.

Технологии создания цифровых двойников опираются на передовые методы моделирования и анализа данных. Комплексный подход требует объединения трёх ключевых направлений: симуляционного моделирования, аналитики больших данных и машинного обучения. Симуляционное моделирование используется для создания динамических и статических моделей процессов. Современные платформы, такие как Ansys Twin Builder и Siemens Simcenter, позволяют проектировать и тестировать цифровые двойники сложных инженерных систем с учётом внешних и внутренних факторов. Аналитика больших данных, в свою очередь, обеспечивает сбор и обработку массивов информации, поступающих с датчиков и IoT-устройств, что позволяет оперативно выявлять отклонения в поведении системы. Методы машинного обучения играют ключевую роль в прогнозировании отказов оборудования и оптимизации производственных параметров, что особенно актуально для предиктивного технического обслуживания.

Интеграция цифровых двойников с технологиями интернета вещей и системами управления производством MES (Manufacturing Execution System) и ERP (Enterprise Resource Planning) является необходимым условием их эффективного функционирования. IoT-технологии обеспечивают связь между физическим и цифровым миром через сеть сенсоров и устройств, передающих информацию о параметрах оборудования, таких как температура, давление, вибрация и износ компонентов. Потоки данных поступают в режиме реального времени и обрабатываются на облачных платформах, таких как Microsoft Azure Digital Twins или PTC ThingWorx. Эти платформы предоставляют возможность моделирования и анализа поведения оборудования с минимальными временными задержками, что критически важно для высокопроизводительных производств.

Системы управления производством (MES) и корпоративные системы управления ресурсами (ERP) обеспечивают координацию всех производственных и логистических процессов на предприятии. Интеграция цифровых двойников с MES позволяет в реальном времени оптимизировать производственные линии, контролировать выполнение технологических операций и обеспечивать точность планирования ресурсов. ERP-системы, такие как SAP S/4HANA, взаимодействуют с цифровыми двойниками для управления цепочками поставок и прогнозирования потребностей в ресурсах, что снижает издержки и улучшает производственную гибкость. Например, на предприятиях Tesla цифровые двойники взаимодействуют с ERP-системами для оперативного изменения производственного графика и минимизации простоев оборудования. Благодаря этому удаётся повысить эффективность производственного процесса и сократить время вывода продукции на рынок.

Цифровые двойники находят широкое применение в различных отраслях промышленности. В машиностроении они позволяют оптимизировать проектирование и эксплуатацию сложного оборудования, снижая потребность в дорогостоящих экспериментальных испытаниях. В энергетике цифровые двойники используются для мониторинга и прогнозирования работы турбин и систем распределения электроэнергии. На предприятиях химической промышленности внедрение цифровых двойников позволяет моделировать химические процессы и контролировать параметры оборудования, что приводит к минимизации отходов и повышению эффективности. Ярким примером успешного применения технологии является

проект General Electric, где цифровые двойники используются для моделирования и оптимизации работы газотурбинных двигателей, что позволяет снизить эксплуатационные затраты на 20–30%.

Цифровые двойники представляют собой технологический прорыв, позволяющий оптимизировать производственные процессы за счет точного моделирования, анализа и предсказания работы физических объектов. Одним из основных направлений применения цифровых двойников является машиностроение, где виртуальные копии оборудования и производственных линий обеспечивают высокую степень предсказуемости и точности операций. С их помощью возможно детально просчитать параметры работы механизмов, минимизировать износ компонентов и оптимизировать использование ресурсов. Например, на заводах General Electric цифровые двойники применяются для моделирования работы газовых турбин. Полученные данные позволяют не только отслеживать текущую производительность оборудования, но и предсказывать потенциальные неисправности, что обеспечивает значительное сокращение времени простоев и расходов на обслуживание.

В энергетике цифровые двойники играют ключевую роль в управлении сложными системами и оптимизации процессов выработки, передачи и распределения энергии. Электростанции и сети на основе цифровых моделей способны прогнозировать изменения нагрузки, что особенно актуально при интеграции возобновляемых источников энергии. Так, компания Siemens использует цифровые двойники для управления ветряными турбинами, моделируя их поведение при различных ветровых нагрузках. Применение методов машинного обучения и анализа больших данных позволяет определить оптимальные углы наклона лопастей и скорость вращения для максимизации производительности при минимальном износе компонентов. Это способствует снижению себестоимости электроэнергии и продлению срока службы оборудования.

Химическая промышленность требует высокой точности и безопасности процессов, что делает цифровые двойники незаменимым инструментом для моделирования реакций и управления технологическими установками. Цифровые модели позволяют предсказать изменение параметров химических реакций в реальном времени, обеспечивая контроль качества и стабильности производственного процесса. Например, Dow Chemical использует цифровые двойники для моделирования поведения полимерных смесей, что позволяет минимизировать отходы и повысить однородность продукции. Дополнительно цифровые двойники применяются для мониторинга коррозии оборудования, где точные симуляции помогают прогнозировать износ резервуаров и трубопроводов, снижая вероятность аварийных ситуаций.

Алгоритмы моделирования и прогнозирования при использовании цифровых двойников основаны на комбинации методов численного анализа, машинного обучения и динамического моделирования. Методы CFD (Computational Fluid Dynamics) применяются для моделирования потоков жидкости и газа в турбомашинах, системах отопления и вентиляции. При оптимизации сложных производственных систем используется Finite Element Analysis (FEA) для расчета напряжений и деформаций в конструктивных элементах оборудования. Прогнозирование отказов оборудования осуществляется на основе предиктивной аналитики, которая анализирует данные, поступающие с датчиков в реальном времени. Подобные подходы внедрены на заводах Rolls-Royce, где цифровые двойники авиадвигателей собирают и анализируют данные о температуре, вибрациях и давлении, позволяя предотвратить критические сбои и снизить затраты на техническое обслуживание.

Реальные кейсы внедрения цифровых двойников демонстрируют их экономическую и технологическую эффективность. Так, компания BASF, один из мировых лидеров химической промышленности, внедрила цифровые двойники для контроля технологических процессов на своих предприятиях. В результате удалось добиться 30%-го снижения энергозатрат за счет оптимизации параметров работы реакторов и теплообменников. В автомобилестроении BMW использует цифровые двойники для моделирования сборочных линий и виртуального тестирования производственных процессов. Это позволило сократить цикл разработки новых моделей автомобилей на 20% и минимизировать затраты на физические испытания.

Цифровые двойники, как инновационный инструмент оптимизации промышленных процессов, оказывают значительное влияние на экономические и производственные показатели предприятий. Основные эффекты от внедрения данной технологии проявляются в снижении затрат, повышении производительности и надежности оборудования. За счет моделирования и мониторинга производственных систем в реальном времени цифровые двойники позволяют минимизировать простой оборудования и повысить эффективность его использования. Например, компания General Electric сообщила о 20%-м снижении операционных расходов на обслуживание газотурбинных установок благодаря прогнозной аналитике, основанной на цифровых двойниках. В машиностроении применение цифровых двойников для симуляции рабочих процессов помогает оптимизировать параметры эксплуатации оборудования, что приводит к повышению его производительности на 15–25% при одновременном сокращении износа и затрат на ремонт.

Экономический эффект также проявляется в снижении издержек на разработку и тестирование новых продуктов. В автомобилестроении цифровые двойники позволяют виртуально тестировать конструкции автомобилей до создания физических прототипов, что сокращает сроки разработки и затраты на материалы. Так, компания BMW сократила время проектирования новых моделей на 20%, используя цифровые двойники сборочных линий и автомобилей. В химической промышленности точное моделирование процессов производства способствует снижению количества брака и оптимизации использования ресурсов. На предприятиях BASF, внедривших цифровые двойники, удалось сократить энергопотребление на 30%, а отходы производства – на 15%, что подчеркивает высокий потенциал технологии для повышения экологической устойчивости производственных процессов.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение цифровых двойников сопряжено с рядом технических и экономических ограничений. Одной из главных проблем остается высокая стоимость разработки и внедрения цифровых моделей, особенно для крупных промышленных предприятий с разветвленной инфраструктурой. Создание точной виртуальной копии требует значительных ресурсов для сбора, обработки и анализа данных, а также привлечения квалифицированных специалистов в области машинного обучения, инженерного моделирования и системной интеграции. Технические барьеры включают недостаточную совместимость цифровых двойников с существующими системами управления производством (ERP, MES) и устаревшим оборудованием, которое не оснащено сенсорами для сбора данных в режиме реального времени.

Кроме того, масштабирование цифровых двойников на уровне всего предприятия требует значительных вычислительных мощностей и продвинутой инфраструктуры для обработки больших объемов данных. Компании сталкиваются с необходимостью инвестиций в облачные технологии и развитие сетей IoT, что часто становится препятствием для малых и средних предприятий. Проблемы кибербезопасности также остаются актуальными, так как цифровые двойники, являясь частью сетевой инфраструктуры, подвержены рискам несанкционированного доступа и кибератак, что может привести к утечке критически важной информации.

Перспективы развития цифровых двойников связаны с их интеграцией с передовыми технологиями, такими как искусственный интеллект (AI), интернет вещей (IoT) и квантовые вычисления. В энергетике цифровые двойники могут быть использованы для оптимизации работы умных сетей (Smart Grids), где они будут прогнозировать изменение нагрузки и распределять ресурсы в режиме реального времени. В промышленности цифровые двойники, объединенные с технологиями 5G, позволяют сократить время отклика систем и повысить точность моделирования. В аэрокосмической отрасли цифровые двойники перспективны для создания и тестирования сверхсложных систем, таких как двигатели и космические аппараты. Например, компания NASA разрабатывает цифровые двойники для моделирования полетов и анализа системных сбоев в космических миссиях, что позволяет значительно повысить надежность оборудования и снизить затраты на тестирование.

В долгосрочной перспективе цифровые двойники будут играть ключевую роль в реализации концепции Индустрии 4.0, обеспечивая полную автоматизацию и оптимизацию производственных процессов на основе данных. Их применение охватит не только отдельные производственные системы, но и глобальные цепочки поставок, позволяя предприятиям интегрировать цифровые двойники в единую экосистему управления. Успешные примеры внедрения технологии в машиностроении, химической промышленности и энергетике подтверждают высокий потенциал цифровых двойников для решения задач повышения производительности, снижения издержек и обеспечения устойчивого развития промышленности.

Литература

1. Гризв М. Цифровые двойники: новый взгляд на управление жизненным циклом продукта // Системы управления жизненным циклом. 2002. № 1. С. 23–28.
2. Лаптев А. В., Смирнов С. Н. Технология цифровых двойников: концепция, возможности и перспективы // Вестник машиностроения. 2020. Т. 12, № 4. С. 42–49.
3. Siemens AG. Digital Twin: Driving Business Value Across the Product Lifecycle [Электронный ресурс]. Siemens Industry Inc., 2022. URL: <https://www.siemens.com/digitaltwin>
4. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415.
5. Крылов И. А., Платонов Д. В. Цифровые двойники как основа промышленной трансформации на предприятиях России // Проблемы современной науки. 2021. № 3. С. 55–60.
6. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020. Vol. 29. P. 36–52.