

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР: ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

LITERATURE REVIEW: APPLICATION OF AUTOMATED DIGITAL PRODUCTION SYSTEMS BASED ON DIGITAL TWINS

**Sultan Nebras
V. Petrov**

Summary. The article examines the concept of digital twins and their role in facilitating the introduction of automation into production processes and highlights the opinions of prominent scientists studying digital twin technologies. This article presents a literary review of the application of automated production systems based on digital twins. The concept of digital twins, involving the creation of virtual copies of physical objects, has attracted considerable attention in various industries, including industry. This literature review examines how digital twins are used to improve the efficiency, accuracy and productivity of industrial processes at the current stage of the development of science and technology. The paper highlights the advantages and problems associated with the implementation of the studied automated systems.

Keywords: digital twin, modeling, analysis, models, controls, systems, automation.

Султан Небрас

аспирант, Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
nebras.sultan88@gmail.com

Петров Валерий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, преподаватель,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
sv58@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается концепция цифровых двойников и их роль в содействии внедрению автоматизации в производственные процессы, а также выделяются мнения видных ученых, изучающих технологии цифровых двойников. В данной статье представлен литературный обзор применения автоматизированных производственных систем на основе цифровых двойников. Концепция цифровых двойников, предполагающая создание виртуальных копий физических объектов, привлекла значительное внимание в различных отраслях, в том числе и в промышленности. В данном обзоре литературы рассматривается, как цифровые двойники используются для повышения эффективности, точности и производительности промышленных процессов, на современном этапе развития науки и техники. В работе освещаются преимущества и проблемы, связанные с внедрением исследуемых автоматизированных систем.

Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, анализ, модели, управление, системы, автоматизация.

По определению руководства НАСА, цифровой двойник — это интегрированная симуляция, воспроизводящая транспортные средства или системы с помощью вероятностных моделей, включающих различные физические и размерные элементы. Этот тип моделирования зависит от сложных физических моделей, текущей информации, обновляемой датчиками, и предыдущих оперативных данных [3].

Однако, по мнению М. Гривза, цифровой двойник — это коллекция виртуальных информационных структур, которые полностью характеризуют физический объект, независимо от того, был ли он ранее создан или нет, вплоть до атомной структуры и геометрических характеристик в любом масштабе — от микроскопического до макроскопического [12].

В работе [16] подчеркивается важность использования данных как из реального, так и из виртуального пространства, а также их взаимодействия. Согласно [15], цифровые двойники — это цифровые копии живых и неживых объектов, которые помогают максимально

использовать возможности всех физических объектов и постоянно вносят свой вклад в повышение уровня жизни и общего благосостояния. В определении [14], подчеркивается, что данные в реальном времени используются цифровым двойником для функционирования на протяжении всего его жизненного цикла. В [13] уточняется, что цифровой двойник — это соответствующим образом синхронизированная коллекция релевантных данных о физическом объекте в виртуальной области, информационные потоки которой обеспечивают конвергенцию между виртуальным и физическим состояниями.

В работах [17, 18] дано более точное описание, которое помогает понять реальное применение цифрового двойника. В данном описании «цифровым двойником» называется семейство сложных междисциплинарных математических моделей, которые являются высокоточными представлениями реальных материалов, вещей, структур, машин, устройств, технических и киберфизических систем. Трехмерные нестационарные нелинейные уравнения с частными производными используются для

представления механических и физических процессов, включая технические и производственные процессы.

Более современное определение цифрового двойника в литературе дано Старком и Дамерау в 2019 году, оно звучит как «...цифровое представление активного уникального продукта [...] или уникальной системы продуктов и услуг [...], которое включает в себя его выбранные характеристики, свойства, условия и поведение с помощью моделей, информации, а также данных в рамках одного или даже нескольких этапов жизненного цикла» [5].

Кун (Kuhn, 2017) [6] утверждает, что цифровой двойник может включать нефизические «сущности», такие как услуги, в дополнение к реальным предметам. Некоторые ученые заходят так далеко, что определяют цифровой двойник как систему в целом. Некоторые рассматривают активы компании как реальное пространство, а некоторые даже видят четкую связь между реальным пространством и конкретными продуктами. В отношении виртуального пространства существует консенсус, однако мнения о том, как понимать реальное пространство, расходятся. Большинство исследований придерживаются определения цифрового двойника, данного NASA, которое гласит, что одна из основных функций цифрового двойника — создание максимально реалистичного виртуального клона настоящего физического объекта.

Семераро и другие [19] проводят тщательный анализ литературы, уделяя особое внимание внедрению цифровых двойников в промышленных организациях. В их исследовании тщательно рассматривается ряд важных аспектов, таких как точное определение цифровых двойников, различные области, в которых они используются, когда имеет смысл внедрять их стратегически, мотивы их принятия и различные трудности, возникающие при их использовании в реальных сценариях. Авторы особо выделяют промышленные предприятия в качестве основных победителей, которые имеют все шансы воспользоваться преимуществами технологии цифровых двойников.

Аналогичным образом Бао и другие [3] исследуют сложное взаимодействие между традиционными парадигмами моделирования трафика и цифровыми двойниками, объясняя различия между ними. Они предлагают трехуровневую технологическую архитектуру и проводят глубокое исследование ключевых технологий, поддерживающих цифровых двойников, особенно в отношении создания сложных дорожных ситуаций.

В рамках тщательного исследования, направленного на выявление элементов, которые либо способствуют, либо препятствуют интеграции цифровых двойников в перерабатывающую промышленность, Перно и кол-

леги [8] классифицировали широкий спектр влияний на стимулирующие факторы и препятствующие барьеры путем применения методологии описательного кодирования первичных литературных источников.

Стрельцов Г.Р. поясняет что, цифровой двойник представляет собой набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или реальный физический объект или систему. В транспортно-логистических системах, какую представляет собой дорожное движение, цифровые двойники используются для моделирования и оптимизации логистических процессов, маршрутизации транспорта, прогнозирования трафика и управления транспортными системами [4].

Методология цифровых двойников активно развивается в последние несколько лет в трудах множества ученых, таких как, Симченко Н.А., Бизингер Ф., Мейке Д., Созинов П.А., Андреев Г.И. [1, с. 5; 2, с. 15; 3 с. 18].

По нашему мнению, одно из главных преимуществ цифрового двойника — это возможность отражать изменение состояния во времени. То есть цифровой двойник не является обычной статической моделью, а изменяется (или точнее сказать отражает изменения объекта) с учётом телеметрии сенсоров интернета вещей, синхронизируя данные, полученные от них. Не уходя далеко от примера с банковской сферой (которая является самым активным, но далеко не единственным пользователем данной технологией), можем указать на то, что с помощью DToC компании отслеживают изменения вкусов и предпочтений клиентов. Таким образом, цифровой двойник клиента поможет подобрать персональное условие вклада, основываясь на данных о том, что потребителю важна возможность пополнения/снятия средств.

Альфонсо Велоса отмечает самое важное, это предсказательные способности цифровых двойников — отличительная черта от технологий мониторинга только текущего состояния. «Цифровые двойники усиливают влияние Интернета вещей (IoT) на бизнес, предлагая мощный способ мониторинга и управления активами и процессами», — говорит Альфонсо Велоса, вице-президент Gartner по исследованиям [9]. Умная модель на основе машинного обучения и искусственного интеллекта, используя данные, полученные от множества сенсоров, способна предсказывать поведение объекта, процесса или системы в будущем. Оставаясь в рамках примера с банком и вкладом, цифровой двойник клиента поможет ответить на вопрос «Когда клиенту может понадобиться другая услуга, основываясь на его предыдущих выборах или замеченной заинтересованности в чем-то?»

Майкл Гривз описывает что, существует несколько классификаций цифровых двойников в зависимости

от того, где они задействованы. Рассмотрим одну из них, а именно классификацию, предложенную профессором Технологического университета Флориды Майклом Гривзом [7]. Он выделял 3 основных типа: прототип цифрового двойника (Digital Twin Prototype / DTP), экземпляр (Digital Twin Instance/DTI) и агрегированный цифровой двойник (Digital Twin Aggregate).

Рост идеи цифрового двойника показан на рис. 1, где также выделены основные этапы ее развития. М. Гривз внес существенный вклад еще в 2014 году, подробно объяснив феномен цифрового двойника. Его объяснение содержалось в новаторской «белой книге» [4], предназначенной для распространения в деловых кругах. В ней не только были описаны нюансы новой технологии, но и заложена основа для глубокого понимания этой области. После ее выхода крупные компании, в том числе «Сименс», быстро включили эту фразу в свою рекламу, закрепив понятие «цифровой двойник» в деловом языке.

Очевидно, цифровой двойник клиента, скорее всего можно как раз отнести к категории агрегированного двойника. Все данные о выборе клиента поступают в ЦОД, где обрабатываются и анализируются. DToC обеспечивает двунаправленную взаимосвязь — с одной стороны, клиент предоставляет компании данные о своих интересах и предпочтениях, а с другой стороны, компания, обрабатывая эти данные, предлагает клиенту персонализированные предложения, снова затем, собирая данные о его реакции на предложения, и «полезный цикл» замыкается.

Тщательно изучая поведение моделей цифровых двойников, можно получить полезные сведения о кривых спроса на энергию и эффективном управлении генерирующими мощностями. Используя цифровых двойников, авторы А. Франциско и Н. Мохаммади создают платформу для «умного управления энергией в городе» (2020). Эти исследователи используют информацию, полученную от интеллектуальных счетчиков, которые регистрируют электрические параметры, для оценки степени энергоэффективности в цифровых моделях зда-

ний-близнецов. Цель проекта Франциско и Мохаммади — создать передовые модели, оценивающие важные метрики и модели поведения, используя технологию цифровых двойников в контексте электростанций [11].

Эта работа является частью более масштабной инициативы по использованию цифровых двойников для создания систем, специально предназначенных для моделирования различных условий работы электросетей. Для оценки эффективности моделей также используются методы машинного обучения.

В исследовании, проведенном Петтеем К., используется ряд методов моделирования, которые используют оптимизационные модели для определения лучших мест для зарядных станций электромобилей. Важные переменные, включая потребление энергии, емкость аккумулятора и частоту зарядки, включены в модели, созданные для различных электромобилей, а главной целью является максимизация времени, которое транспортные средства тратят на зарядку [10].

Кроме того, согласно другому исследованию, интеллектуальная электросеть может использовать передовые модели для прогнозирования и определения неидеальных условий работы. Это позволяет эффективно контролировать распределение энергии между зарядными станциями [12]. Эти результаты подчеркивают важность цифровых двойников для точного моделирования управления зарядкой электромобилей, что, в свою очередь, играет важную роль в обеспечении надежности интеллектуальных сетей в условиях растущего парка электромобилей.

Следует раскрыть сферу последних достижений и новейших разработок в области цифровых двойников в 2024 году.

В 2024 году IBM активно участвует в инициативе по изменению ситуации в Роттердамском порту, в рамках которой цифровые двойники используются для продвижения инноваций и повышения эффективности портовых операций. Для оптимизации своей деятельности ключевые участники нефтегазовой отрасли, такие как



Рис. 1. Основные этапы развития концепции цифровых двойников

ADNOC, BP, Chevron, Equinor, Petrobras и Royal Dutch Shell, активно используют виртуальные копии производственных систем. В этот растущий список входят такие титаны индустрии, как IBM, Microsoft, SIEMENS, General Electric, Emerson Electric Co, Bosch, Rockwell Automation, PTC Inc, SAP SE, Hitachi Ltd. и многие другие. Список зарубежных компаний, внедряющих DDC, расширяется по мере того, как их использование становится все более распространенным.

Итак, цифровые двойники, сегодня, часто выступают в роли «предвестников», поскольку постоянно анализируют огромные объемы данных. Например, значительная поломка компрессора на нефтеперерабатывающем заводе была предсказана технологией предиктивной аналитики Schneider Electric на 25 дней раньше, чем планировалось. Это позволило сотрудникам принять необходимые меры и предотвратить значительные финансовые потери. Цифровые двойники находят применение и в работе городских властей. Например, в Финляндии с помощью технологии CityGML был создан цифровой двойник города Хельсинки 3D+, учитывающий несколько аспектов городской жизни, таких как загруженность дорог, изменение климата, нагрузки на систему отопления и строительные процессы. Это гарантирует эффективное распределение ресурсов и позволяет прогнозировать проблемы до того, как они окажут серьезное влияние на инфраструктуру.

Научное обсуждение темы

Благодаря использованию передовой робототехники и искусственного интеллекта, предлагается внедрить инновационную технологию Digital Doppelganger, или создать реалистичный виртуальный клон реальной промышленной системы. Данные цифровой двойник, в отличие от уже имеющихся в промышленности симуляторов, будет сочетать в себе данные в реальном времени и минутные функции, чтобы предложить абсолютно реалистичное и точное изображение актива, который он представляет. Цифровой двойник будет иметь способность разрабатывать сложные модели прогнозирования, сочетая искусственный интеллект и машинное обучение, имитируя несколько раундов, чтобы определить идеальные обстоятельства и параметры процедур.

Цифровой двойник будет как органичное продолжение существующей промышленной инфраструктуры, легко интегрируясь в машины, сборочные линии и производственные процессы. Этот цифровой клон обладает способностью обрабатывать огромные объемы данных в режиме реального времени, что позволяет ему принимать обоснованные решения и молниеносно адаптироваться к динамичным условиям. Благодаря передовым сенсорным возможностям и когнитивным вычислениям этот цифровой двойник может обнаруживать аномалии,

предсказывать необходимость технического обслуживания и оптимизировать работу, сокращая эксплуатационные расходы. Сферы применения цифрового двойника: от автомобилестроения до фармацевтического производства, при всем этом не ограничиваясь только физическими задачами. Он также будет обладать функциями помощи в проектировании совершенно новых продуктов, способствуя сотрудничеству и обмену знаниями между экспертами в различных областях. Предоставляя общую платформу, где инженеры, дизайнеры и аналитики могут сотрудничать, проверять гипотезы и обмениваться идеями, он ускоряет инновационный цикл и способствует постоянному совершенствованию.

Непрерывно собирая и анализируя потоки данных от множества датчиков, встроенных в промышленную инфраструктуру, двойник будет генерировать действенные идеи по оптимизации производительности и профилактическому обслуживанию оборудования, промышленного предприятия. Из преимуществ выделим, такой проактивный подход обеспечивает максимальное время безотказной работы, минимизирует риск неожиданных сбоев и, в конечном счете, позволяет промышленным предприятиям сэкономить значительные средства. Моделируя различные сценарии и внося потенциальные коррективы, современные промышленные предприятия смогут выявлять узкие места, оптимизировать процессы и повышать производительность, и все это в виртуальной сфере, сводя к минимуму сбои и простои в физическом мире, перечисленное позволит экспертам изучать непроработанные стратегии производства, экспериментировать с альтернативными конфигурациями и разрабатывать инновационные решения, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким физическим прототипам.

Таким образом, следует заключить, на основании данного обзора литературы, что в исследованиях, существует несколько различных трактовок термина «цифровой двойник». Он функционирует как цифровое представление объектов реального мира, облегчающее автоматизированный обмен данными и информацией для поддержки выявления проблем и поиска решений. Авторы, А. Саад и С. Фаддел, разработали интегрированную энергетическую систему, предназначенную для оценки влияния оборудования, которое динамически настраивается в соответствии с требованиями системы распределения энергии [13]. Они используют цифровые двойники подсистем для оптимизации интеграции огромных энергетических систем с их подсистемами. Основанная на концепции «система в системе», эта модель включает в себя аппаратное обеспечение, которое подключается к ней для запуска и управления симуляцией, что помогает справиться со сложностью энергораспределительных сетей.

К физическим же двойникам относятся такие вещи, как ветряные турбины, реактивные двигатели, здания, промышленные предприятия и города; у каждого из них есть соответствующий цифровой двойник. Основная задача цифрового двойника — воспроизвести с определенной степенью точности и регулярности наблюдаемую структуру, состояние и поведение своего физического аналога. Следовательно, он эмулирует все взаимодей-

ствия — движения, давление, взаимодействие среды с системой и системы с системой, — с которыми физический двойник столкнулся бы в реальном мире. Понятие «цифровой двойник» получило развитие в современной литературе и в настоящее время широко понимается как цифровое изображение реальных предметов, процедур или систем [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бизингер Ф., Мейке Д., Кресе Б., Вейрих М. Цифровой двойник для планирования производства на основе киберфизических систем: пример создания цифрового двойника на базе киберфизической системы // *Procedia CIRP*, Volume 79, 2019, стр. 355–360. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119302045> (28.04.2024).
2. Симченко Н.А., Цифровые двойники в экономическом развитии промышленности: управление и эффекты: монография. — Симферополь: Издательский дом КФУ, 2021. — 237 с.
3. Созинов П.А., Андреев Г.И. и др. Цифровые двойники: монография / под ред. П.А. Созинова. — Москва: Радиотехника, 2022. — 311 с.
4. Стрельцов Г.Р. Цифровые двойники: риски, перспективы и влияние на мировую экономику. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Современные цифровые технологии». — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL chromeextension://efaidnbmnnpbpcjpcglcfindmkaj/https://elibrary.ru/download/elibrary_54479869_10149361.pdf ((28.04.2024).
5. Stark R., Damerau T. (2019). Digital Twin. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Vol. 66, pp. 1–8, https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_1 6870-1 (In Engl.).
6. Kuhn T. (2017). Digitaler Zwilling. *Informatik Spektrum*. No. 40, pp. 440–444, <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2> (In Engl.).
7. Цифровые двойники: не просто модный тренд // блог COMSOL URL: <https://www.comsol.ru/blogs/digital-twins-not-just-hype/> (дата обращения: (28.04.2024).
8. Perno M., Hvam L., and Haug A., «Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers», *Computers in Industry*, vol. 134, p. 103558, 2022. [Online], Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016636152100165237>
9. Prepare for the Impact of Digital Twins // Gartner URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/prepare-for-the-impact-of-digital-twins> (дата обращения: (28.04.2024).
10. Pettey C. Prepare for the Impact of Digital Twins / C. Pettey // Gartner: Stamford. — 2017.
11. Francisco A. Smart city digital twin-enabled energy management: Toward real-time urban building energy benchmarking / A. Francisco, N. Mohammadi, J.E. Taylor.
12. Saad A. On the Implementation of IoT-Based Digital Twin for Networked Microgrids Resiliency Against Cyber Attacks / A. Saad, S. Faddel, T. Youssef and O.A. Mohammed // *IEEE Transactions on Smart Grid*, Том 11, выпуск 6, страницы 5138–5150. — 2020.
13. Hicks B. Industry 4.0 and Digital Twins: Key lessons from NASA [Электронный ресурс]: <<https://www.thefuturefactory.com/blog/24>>, (28.04.2024).
14. Bolton R.N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical, and social realms // *J. of Service Management*. 2018. Vol. 29, N 5. P. 776–808.
15. Abdulmotaleb El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // *IEEE Multimedia*. 2018. Vol. 25, N 2. P. 87–92.
16. Tao F. et al. Digital twin-driven product de-sign framework // *Intern. Journal of Production Research*. 2018. P. 1–19.
17. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» [Электронный ресурс]: <<https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf>>, (28.04.2024).
18. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // *Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием, 20–22 июня 2019 г.* СПб: Политех-Пресс, 2019. С. 234–245. DOI:10.18720/IEP/2019.3/25.
19. Semeraro C, et al., Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 2021. 130: p. 103469
20. Bao L, Wang Q., and Jiang Y., «Review of digital twin for intelligent trans- portation system», *International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT)*, pp. 309–315, 2021.

© Султан Небрас (nebras.sultan88@gmail.com); Петров Валерий Евгеньевич (cu58@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»