

УДК 004.93'12

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Лобович А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чаяевский В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс создания цифровых двойников. Анализируются этапы разработки цифровой модели, включая создание виртуального прототипа, сбор и обработку данных с сенсоров, интеграцию аналитических инструментов и машинного обучения, моделирования и симуляцию процессов, а также организацию обратной связи. Особое внимание уделено архитектуре цифровых двойников, их агрегации с облачными платформами и технологиями искусственного интеллекта.

Ключевые слова. Цифровой двойник, виртуальный прототип, моделирование, симуляция, обратная связь, облачные платформы, мониторинг, оптимизация процессов.

1. Введение

Известно, что цифровой двойник – это цифровая модель предполагаемого или фактического физического продукта, системы или процесса из реального мира, которая служит его цифровым аналогом для таких целей, как моделирование, интеграция, тестирование, мониторинг и техническое обслуживание [1]. Простыми словами, цифровой двойник — это «цифровой» «двойник» существующего физического объекта. Цифровой двойник был впервые представлен Гривзом [2]. Хотя буквальное значение цифрового двойника на первый взгляд кажется простым, определение цифрового двойника является предметом дискуссий и эволюции [2]. тремя компонентами: цифровой (виртуальной частью), реальным физическим продуктом и связью между ними. Однако другие авторы, например, такие как Тао и др. [3], расширили эту концепцию до пяти компонентов, включив данные и услуги в состав цифрового двойника, и определяют VV&A (верификация, валидация и аккредитация) как компоненты цифрового двойника, заявляя, что «цифровые двойники характеризуются бесшовной интеграцией между киберпространством и физическим пространством».

Процесс создания цифрового двойника является сложной и многоуровневой задачей, требующей интеграции различных технологий и подходов. В его основе лежит идея формирования цифровой модели, которая максимально точно воспроизводит характеристики и поведение реального объекта [4].

2. Этапы создания цифрового двойника

На начальном этапе создаётся виртуальный прототип объекта (рисунок 1).



Рисунок 1 – Этапы создания цифрового двойника

В соответствии с общепринятым определением и целями цифрового двойника, технологии цифрового двойника можно разделить на четыре функциональные области: технологии визуализации, технологии цифровизации, технологии динамического моделирования и технологии моделирования, специфичные для отдельных функций, как показано на рисунке 2. Эта классификация отражает последовательные этапы жизненного цикла цифрового двойника, начиная от интуитивно понятного представления и заканчивая точным цифровым преобразованием, воспроизведением поведения и, наконец, специализированным функциональным моделированием [5].

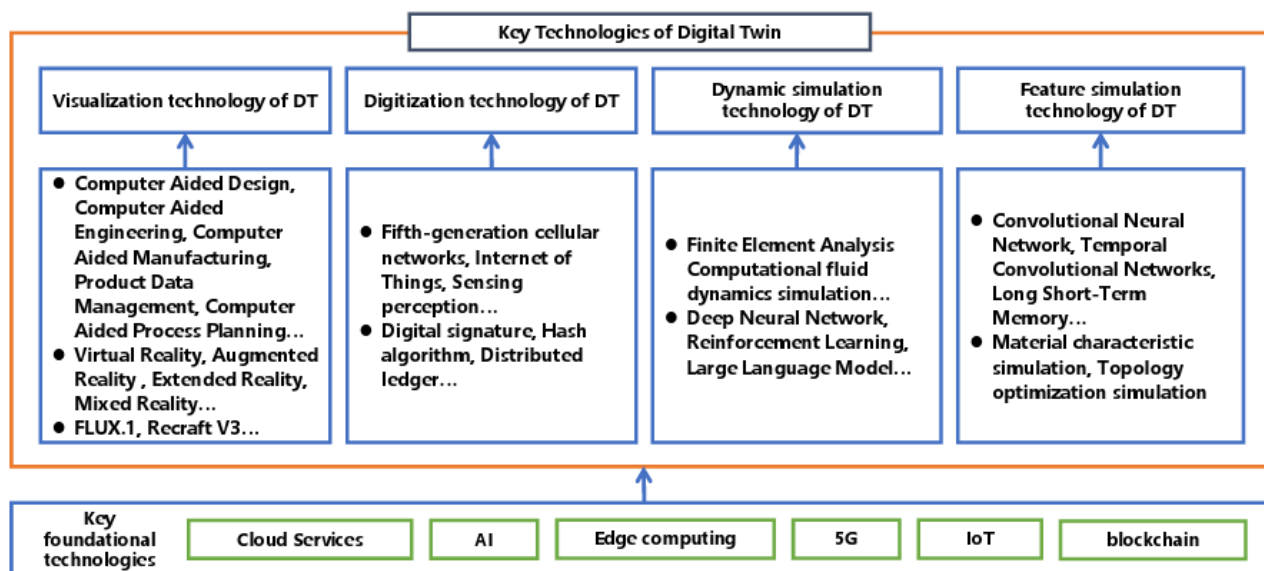


Рисунок 2 – Ключевые технологии цифровых двойников

Обычно для этого используются системы автоматизированного проектирования, позволяющие описать геометрию, структуру и основные физические свойства изделия. Такой прототип служит основой будущего цифрового двойника и позволяет проводить предварительное моделирование ещё до начала реального производства. В случае проектирования существующего физического объекта, такого как производственный цех или промышленное оборудование, процесс может начинаться с 3D-сканирования объекта или окружающей среды. Для получения точной геометрии объекта используются такие технологии, как LiDAR и сканирование структурированным светом, создавая детальное облако точек или сетку, которая служит основой для цифровой модели [6].

Следующий важный этап связан с организацией сбора данных. Для этого применяются различные сенсоры, датчики (вибрации, температуры, силы тока) и исполнительные устройства, подключённые к системе промышленного интернета вещей (IIoT). Например, данные с датчиков силы, температуры и вибрации могут использоваться для мониторинга процесса в реальном времени. Они фиксируют параметры работы оборудования, условия окружающей среды и характеристики технологических процессов. Полученные данные передаются в цифровую систему, где они обрабатываются и используются для обновления модели [7].

Ключевую роль в создании и функционировании цифрового двойника играет интеграция аналитических инструментов. Применение методов машинного обучения и нейронных сетей позволяет выявлять скрытые нелинейные закономерности в накопленных данных, строить точные прогнозы и адаптировать модель к постоянно изменяющимся условиям эксплуатации. Благодаря этому цифровой двойник эволюционирует и превращается из статической компьютерной копии в динамическую интеллектуальную систему, способную к самообучению на основе собственного опыта [8].

3. Архитектура и агрегация цифровых двойников

Рассчитанная архитектура цифрового двойника переносится на специализированные платформы – такие как Siemens или Dassault Systèmes, которые объединяют математические модели, данные и интерфейс управления в единую динамическую систему [9].

После создания базовой модели формируется так называемый цифровой экземпляр (Digital Twin Instance), который соответствует конкретному физическому объекту. После изготовления и ввода изделия в эксплуатацию его цифровой двойник продолжает собирать данные о производительности, часто называемые экземпляром цифрового двойника. Он постоянно получает данные из реального мира и синхронизируется с ним, обеспечивая двустороннюю связь между физической и виртуальной средой. Это позволяет не только наблюдать за состоянием объекта, но и управлять им на основе результатов моделирования [9].

В более сложных системах несколько цифровых двойников объединяются в единую сетевую структуру (Digital Twin Aggregate), что даёт возможность анализировать взаимодействие различных элементов. Агрегируя данные со всего парка активов – агрегат цифрового двойника – производители могут понять, как их продукция работает в различных реальных условиях. Это позволяет использовать полученные данные для оптимизации процессов и разработки будущих решений. Такая интеграция особенно важна для крупных производственных комплексов, где необходимо учитывать множество взаимосвязанных процессов. Отправной точкой в иерархии цифровых двойников служит прототип (DTP) – базовая

модель, позволяющая проверить проектные идеи и параметры производительности ещё до начала реального производства. С помощью CAD-систем создаётся виртуальная копия объекта, на которую накладываются оцифрованные данные с датчиков [8].

4. Моделирование, симуляция и обратная связь

Отдельного внимания заслуживает этап моделирования и симуляции. Виртуальная среда позволяет проводить эксперименты, которые в реальности были бы слишком дорогими или рискованными. Это даёт возможность оптимизировать параметры производства, тестировать новые решения и снижать вероятность ошибок ещё до их возникновения. При виртуальном вводе в эксплуатацию предлагаемой какой-либо производственной линии цифровой двойник может имитировать её работу для выявления узких мест, оптимизации компоновки оборудования и проверки логики автоматизации до установки какого-либо физического оборудования. Например, для процессов, таких как сварка, цифровой двойник может использоваться для планирования процесса путем моделирования распределения тепла и свойств материала предлагаемого сварного соединения [8].

Завершающим элементом является организация обратной связи (Closed-Loop Control). Цифровой двойник не только получает данные, но и может передавать управляющие воздействия обратно в физическую систему. Это позволяет автоматически корректировать работу оборудования и поддерживать оптимальные условия производства [8]. Процесс управления изменениями на основе динамического моделирования изображен на рисунке 3.

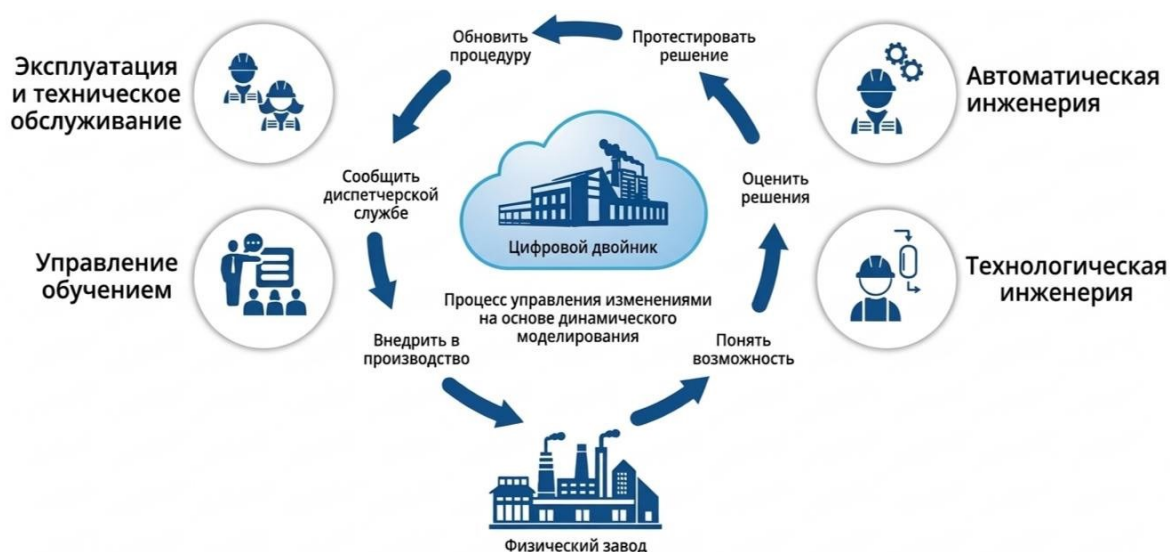


Рисунок 3 – Процесс управления изменениями на основе динамического моделирования

5. Интеграция с искусственным интеллектом и облачными платформами

Важным направлением развития цифровых двойников является их интеграция с технологиями искусственного интеллекта и облачных вычислений. Использование методов машинного обучения, включая нейронные сети, позволяет цифровым двойникам не только анализировать накопленные данные, но и выявлять сложные нелинейные зависимости, которые трудно обнаружить традиционными методами. Это даёт возможность строить более точные прогнозные модели и адаптировать поведение системы к изменяющимся условиям эксплуатации [7].

Кроме того, применение облачных платформ обеспечивает масштабируемость решений и доступ к вычислительным ресурсам, необходимым для обработки больших объёмов данных, поступающих с множества датчиков. Это особенно важно для крупных промышленных систем, где требуется одновременная обработка данных в режиме реального времени [8].

Современные тенденции показывают, что создание цифровых двойников всё чаще связано с использованием облачных технологий, распределённых вычислений и систем искусственного интеллекта. Это делает возможным обработку огромных массивов данных и создание высокоточных моделей даже для сложных объектов.

6. Заключение

Исследования в области технологии цифровых двойников привлекли значительные инвестиции и внимание из многих крупных регионов мира, что отражает растущую важность этой области в научных инновациях и промышленных приложениях. Согласно статистике распределения ведущих финансирующих организаций, внесших вклад в литературу по цифровой трансформации за последние два десятилетия, к концу 2024 года более 100 финансирующих учреждений по всему миру активно поддерживали исследования в области цифровой трансформации, как показано на рисунке 4.

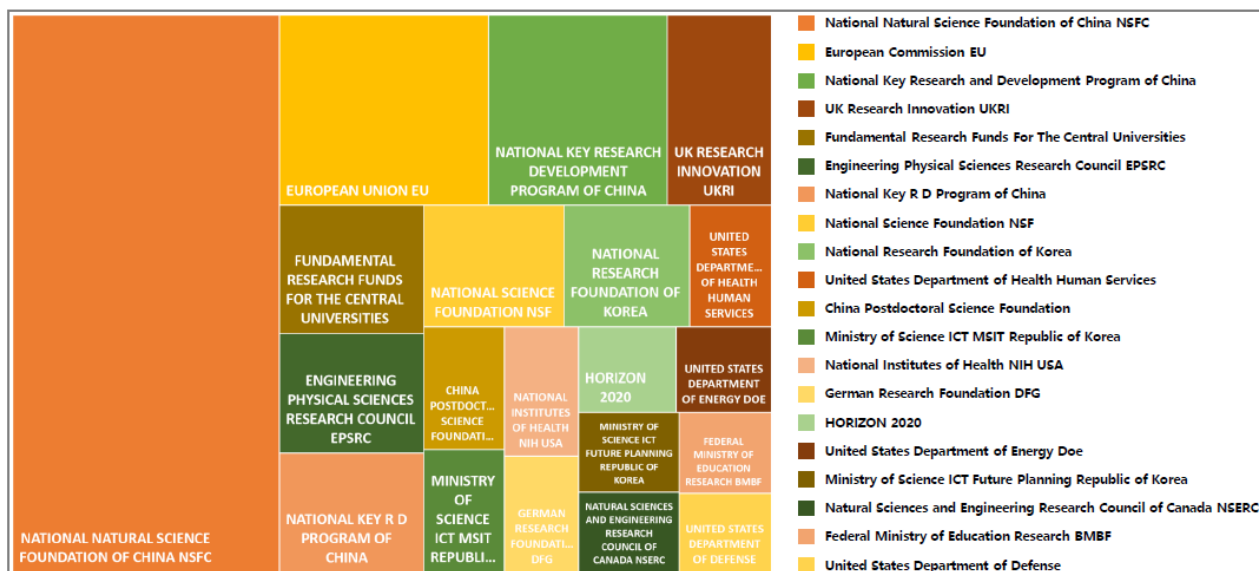


Рисунок 4 – Статистика финансирующих организаций в области литературы по цифровым двойникам

Среди них пятью ведущими организациями по объему поддержанных публикаций являются: Национальный фонд естественных наук Китая (35,14%), Европейская комиссия (9,42%), Национальная ключевая программа развития исследований Китая (8,04%), UK Research and Innovation (4,70%) и Фонд фундаментальных исследований центральных университетов (4,37%). Примечательно, что на долю ведущего учреждения приходится только на большую долю, чем совокупный вклад агентств, занимающих места со второго по седьмое. С точки зрения географического распределения, на Китай приходится наибольшая доля опубликованной литературы (39,86%), за ним следуют США (13,76%), Германия (10,53%) и Великобритания (8,07%).

Список использованных источников:

1. Angira Sharma, Edward Kosasih, Jie Zhang, Alexandra Brintrup, Anisoara Calinescu *Digital Twins: Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions.* // *Journal of Industrial Information Integration*, 2022. – Vol. 30. – 100383
2. J.M. Grieves. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication, white paper*, in: *Whitepaper / Florida Institute of Technology*, 2015.
3. F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui, *Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (9–12) (2018) 3563–3576.
4. Цифровой двойник: для чего нужен и как создается [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.linkedin.com/pulse/digital-twin-based-disaster-resilience-simulation-smart-reddy-ie1if?tl=ru> – Дата доступа: 29.03.2026г
5. *Digital Twin: A Literature Review of Concepts, Technologies and Applications* Weljie YU, Guangu LIU, Ling ZHU and Wujia YU *IEEE Access*, 2023, Vol 1. Pp. 1-24
6. Liu, Mangnan; Fang, Shuiliang; Dong, Huiyue; Xu, Cunzhi. *Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications.* *Journal of Manufacturing Systems* – 2021. – С. 346–361.
7. *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification* / W. Kritzing [et. al.] // *IFAC-Papers On Line*, 2018 – Vol. 51(11). – P. 1016–1022.
8. Lock, Oliver; Bednarz, Tomasz; Pettit, Christopher. "HoloCity – exploring the use of augmented reality cityscapes for collaborative understanding of high-volume urban sensor data". – 2019. – С. 1–2.
9. *Digital Twin Technology in Built Environment: A Review of Applications, Capabilities and Challenges.* *Smart Cities / Yalda Mousav [et. al.] // Smart Cities*, 2024. – Vol. 7(5). – P. 2594–2615

UDC 004.93'12

STAGES OF CREATING A DIGITAL TWIN

Lobovich A.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Chayauski V.V. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article examines the process of creating digital twins. It analyzes the stages of digital model development, including virtual prototyping, sensor data collection and processing, integration of analytical tools and machine learning, process modeling and simulation, and feedback loop organization. Particular attention is paid to the architecture of digital twins and their integration with cloud platforms and artificial intelligence technologies.

Keywords. Digital twin, virtual prototype, modeling, simulation, feedback, cloud platforms, monitoring, process optimization.