

УДК 004.93'12

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Золотухина Д.И., Томчик А.А., студенты

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

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

Аннотация. В данной статье рассматривается сущность и ключевые особенности цифровых двойников как одной из базовых технологий Индустрии 4.0. Раскрываются их структура, принципы функционирования и роль в синхронизации физического и виртуального объектов. Особое внимание уделяется перспективам применения, включая повышение операционной эффективности, развитие предиктивного обслуживания и интеграцию с IIoT, Big Data и PLM-системами. Отмечаются направления использования в промышленности, городской инфраструктуре и экологии, а также основные преимущества и существующие ограничения технологии.

Ключевые слова. цифровые двойники, индустрия 4.0, IIoT, Big Data, предиктивное обслуживание, моделирование, цифровая нить, умные фабрики, PLM-системы, машинное обучение, промышленная автоматизация, мониторинг, оптимизация процессов.

1. Введение

Цифровой двойник был впервые представлен M. Grieves [1] в 2015 году и состоит из трех компонентов: цифровой (виртуальной) части, реального физического продукта и связи между ними. Цифровые двойники определяются как цифровое представление производственной системы или услуги, или просто активного уникального продукта, характеризующегося определенными свойствами или условиями. Международный совет системных инженеров (INCOSE) в своем своде знаний по системной инженерии (SEBoK) утверждает: «Цифровой двойник – это связанное, но отличное от цифровой инженерии понятие. Цифровой двойник – это высокоточная модель системы, которая может использоваться для эмуляции реальной системы» [2]. Таким образом, физические свойства компонентов или оборудования могут быть отражены в реальном времени цифровой моделью, которая является визуальной и более легко наблюдаемой. В результате реальный физический мир можно описать кибермиром.

В настоящее время цифровые технологии уже становятся неотъемлемой частью современной промышленности, рынок которых в ближайшие годы может достичь \$16 млрд. [2].

2. Концепция цифрового двойника

Общая схема концепции цифрового двойника приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема концепции цифрового двойника

Концепция цифрового двойника состоит из трех отдельных частей: физического объекта или процесса и его физической среды, цифрового представления объекта или процесса и канала связи между физическим и виртуальным представлениями. Связи между физической и цифровой версиями включают потоки информации и данных, в том числе потоки физических датчиков между физическими и виртуальными объектами и средами. Коммуникационное соединение называется цифровой нитью [3].

Цифровые двойники представляют собой одну из наиболее значимых технологий современной промышленности, тесно связанной с концепцией «Индустрия 4.0» [4]. Их суть заключается в создании виртуальной копии физического объекта или процесса, которая постоянно обновляется на основе данных, поступающих в реальном времени. Такая синхронизация между физической и цифровой средой открывает новые возможности для анализа, управления и оптимизации производственных систем.

Применение цифровых технологий в физике охватывает компьютерное моделирование сложных процессов, автоматизацию экспериментов, анализ больших данных (Big Data) и машинное обучение [5]. Технологии ускоряют исследования, позволяют визуализировать невидимые явления и обрабатывать данные с уникальных установок, повышая точность теоретических предсказаний и экспериментальных результатов.

3. Повышение операционной эффективности и предиктивное обслуживание

Одним из ключевых направлений развития цифровых двойников является повышение операционной эффективности [6]. Благодаря непрерывному мониторингу технологических процессов (например, высокоскоростной мехобработки) становится возможным оперативно выявлять даже малейшие отклонения от заданных допусков. Это обеспечивает минимизацию выпуска дефектной продукции и сокращение производственных потерь, а также позволяет предотвращать незапланированные простои оборудования. Подобный контроль напрямую влияет на экономическую рентабельность предприятия, исключая затраты на повторную обработку или утилизацию бракованных деталей.

Не менее важной перспективой является развитие предиктивного (прогностического) обслуживания. Используя методы анализа данных и алгоритмы машинного обучения, цифровые двойники способны прогнозировать возможные неисправности оборудования ещё до их возникновения [4, 6]. Это меняет сам подход к техническому обслуживанию: вместо реактивного ремонта предприятия переходят к проактивной стратегии, что значительно снижает риски аварий и увеличивает срок службы техники.

4. Интеграция с промышленными цифровыми технологиями

Серьёзный импульс развитию цифровых двойников даёт интеграция с промышленным интернетом вещей (IIoT) и технологиями больших данных (Big Data) [7]. Современные сенсорные системы позволяют собирать огромные массивы информации о состоянии оборудования, параметрах среды и ходе производственного процесса. Эти данные становятся основой для построения точных цифровых моделей, способных не только отражать текущее состояние системы, но и прогнозировать её поведение в будущем. Технологии, обеспечивающие функционирование цифровых двойников, представлены на рисунке 2.

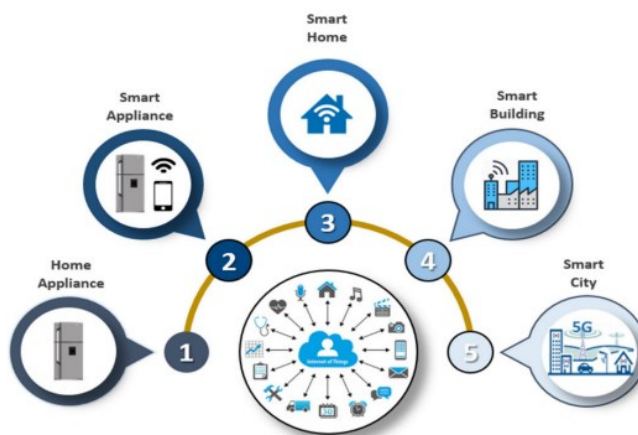


Рисунок 2 – Технологии, обеспечивающие работу цифровых двойников (IoT, AI, Big Data)

Перспективным направлением является интеграция цифровых двойников с системами управления жизненным циклом продукта (PLM [8]). Такая синергия обеспечивает непрерывное совершенствование продукта на всех этапах – от концептуализации до устаревания – за счёт данных в реальном времени, сокращает время выхода на рынок и повышает качество разработки. Пример архитектуры взаимодействия продукта с системой управления жизненным циклом представлен на рисунке 3.

5. Перспективы применения в различных сферах

В долгосрочной перспективе цифровые двойники будут играть центральную роль в автоматизации и роботизации производства. Уже сегодня наблюдается устойчивая тенденция к созданию «умных фабрик» (Smart Factories), где оборудование, автономные роботы и информационные системы взаимодействуют между собой практически без участия человека. Цифровые двойники в таких системах выполняют функцию интеллектуального координационного центра, обеспечивая согласованную работу всех разрозненных элементов [6]. Роль цифровых двойников в контексте концепции Индустрия 4.0 проиллюстрирована на рисунке 4.

Важным направлением является развитие технологий моделирования в реальном времени. Современные исследования (в частности, в области механообработки) направлены на создание цифровых моделей, которые способны мгновенно реагировать на изменения в физической системе. Это открывает возможности для управления сложными процессами в режиме онлайн, включая высокоточные производственные операции [9].

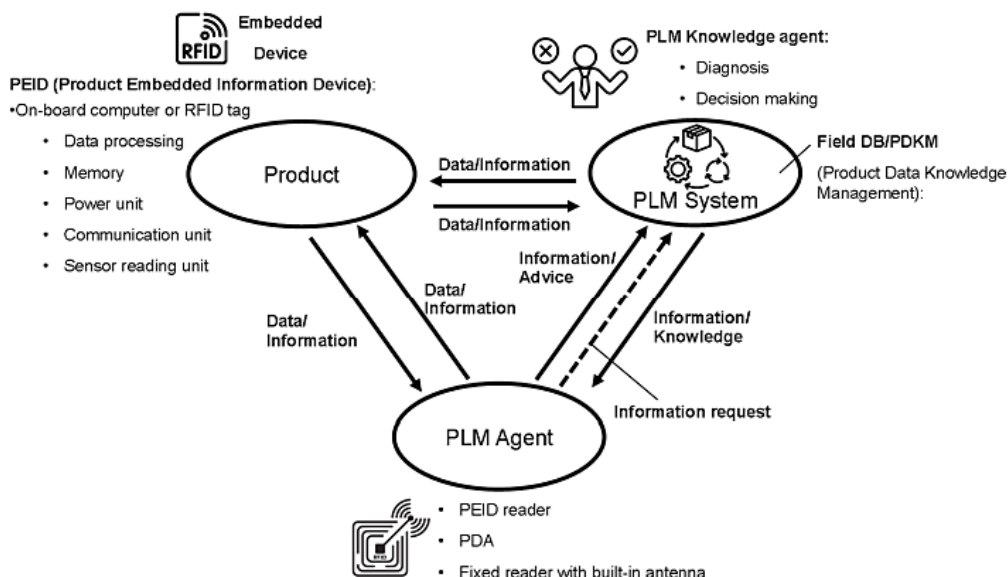


Рисунок 3 – Пример архитектуры взаимодействия продукта с системой управления жизненным циклом

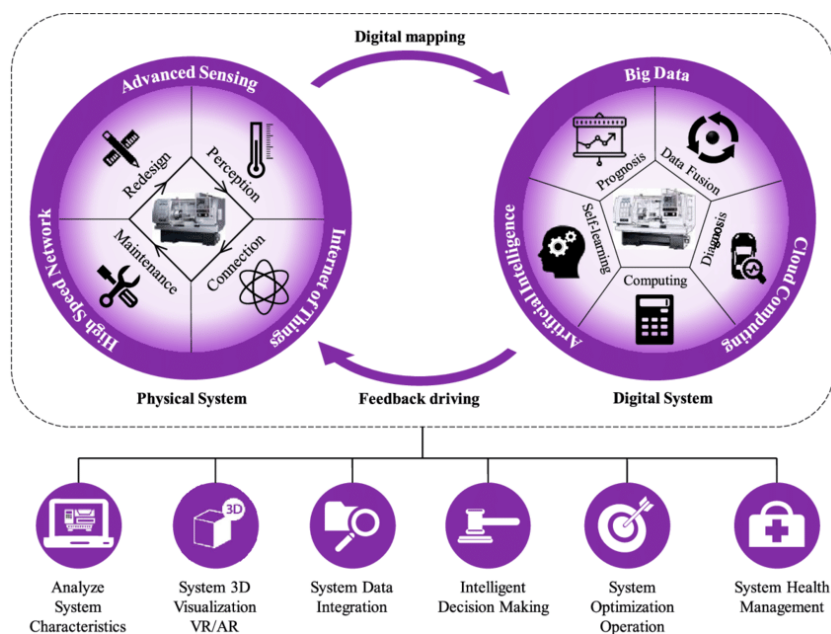


Рисунок 4 – Применение цифровых двойников в концепции Индустрии 4.0

В России получил наибольшее распространение в авиационной и космической промышленности MBSE-подход (модели виртуальной системы, используемые в модельно-ориентированное системное проектирование (Model Based Systems Engineering, MBSE) [10], где он используется на самом раннем этапе жизненного цикла изделия — предпроектном — для решения задач идентификации потребностей пользователей, определения и приоритизации требований заказчика. MBSE могут быть разного уровня сложности: от упрощенных до полномасштабных. Облегченные модели отражают упрощенную структуру. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку, особенно на предварительных стадиях проектирования. Такие облегченные модели позволяют моделировать сложные системы и системы систем (System of Systems, SoS) и получать необходимые данные с минимальными вычислительными затратами. Благодаря такому унифицированному языку моделирования значительно упрощается взаимодействие и совместная работа как внутри проектной команды, так и за её пределами. Такими моделями можно обмениваться внутри организации и с сетью поставщиков, тем самым помогая им лучше понимать создаваемую систему. По мнению экспертов, внедрение и развитие MBSE создает фундамент и необходимую инфраструктуру для перехода от документно-ориентированного проектного управления к модельно-ориентированной парадигме (MBSE), что в итоге приводит к созданию киберфизических систем, цифровых двойников и умных цифровых предприятий.

6. Заключение

Таким образом, цифровые двойники представляют собой не просто инструмент оптимизации, а фундаментальную технологию, способную изменить саму логику функционирования промышленности в ближайшие десятилетия.

Их внедрение способствует повышению эффективности производства, снижению затрат, улучшению качества продукции и обеспечению более высокого уровня управления сложными техническими системами.

В условиях стремительного развития цифровых технологий и перехода к концепции Индустрии 4.0 значение цифровых двойников будет только возрастать, охватывая всё больше отраслей экономики и сфер деятельности. Это делает данную технологию одним из ключевых направлений дальнейшей цифровой трансформации современного общества.

Список использованных источников:

1. Grieves, M. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / A Whitepaper by Dr. Michael Grieves.* – Florida Institute of Technology, 2015 – P. 1-7.
2. *Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions / Angira Sharmaa [et al.] // Journal of Industrial Information Integration, 2022. – Vol. 30. – 100383.*
3. *Digital twin: Origin to future / M. Singh [et al.] // Applied System Innovation, 2021. – Vol. 4. – 36.*
4. da Silva, L.R.R. *Review of Applications of Digital Twins and Industry 4.0 for Machining / L.R.R. da Silva, D.Y. Pimenov, R.B. da Silva, A. Ercetin, K. Giasin // Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2025. – Vol. 9. – 211.*
5. Humam Khalid Yaseen. *Big Data: Definition, Architecture & Applications / Humam Khalid Yaseen, Ahmed Mahdi Obaid // International Journal on Informatics Visualization, 2020. – Vol. 4(1). – P. 45-51.*
6. *Digital Twins for Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Review / Li Zhang [et al.] // Applied Sciences, 2020. – Vol. 10(23). – 8350.*
7. *IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study / S. Aheleroff [et al.] // Advanced Engineering Informatics, 2020. – Vol. 43. – 101043.*
8. *Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things / D. Kiritsis // Computer-Aided Design, 2011. – Vol. 43(5). – P. 479-501.*
8. *Цифровая симуляция устойчивости к катастрофам на основе цифровых двойников: революционный прорыв для умных городов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kp.ru/guide/tsifrovoi-dvoinik.html> - Дата доступа: 29.03.2026 г.*
9. Grieves, M., *Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins, in Complex Systems Engineering: Theory and Practice / Editors S. Flumerfelt [et al]. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. – P. 175-200.*
10. *Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering / Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero // Systems, 2019. – Vol. 7. – P. 7.*

UDC 004.93'12

PROSPECTS FOR USING DIGITAL TWIN

Zholotuhina D.I., Tomchik A.A., students

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

Chayeuski V.V. – PhD in Physics and Mathematics

Anotation. This article examines the essence and key features of digital twins as a core technology of Industry 4.0. It describes their structure, operating principles, and role in synchronizing physical and virtual objects. Particular attention is given to potential applications, including increased operational efficiency, the development of predictive maintenance, and integration with IIoT, Big Data, and PLM systems. Applications in industry, urban infrastructure, and ecology are highlighted, as well as the key advantages and existing limitations of the technology.

Keywords. digital twins, industry 4.0, IIoT, Big Data, Predictive maintenance, modeling, digital thread, smart factories, PLM systems, machine learning, industrial automation, monitoring, process optimization.