

УДК 658

JEL C61, D79, M11, M49, O14, O32

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВОМ: ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Жарасов Баглан Сейтбатталулы¹, маг.

Абрамов Виктор Иванович^{1,2}, д-р экон. наук, проф.

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, Россия, 115409; e-mail: dav@v.ru

² НУ Институт прикладных информационных технологий, Каширское ш., 53, корп. 5, Москва, Россия, 115409; e-mail: vibramov@mephi.ru

Предмет: в статье обсуждаются теоретические и практические принципы создания, экономические выгоды, проблемы внедрения и перспективы развития цифровых двойников в контексте повышения эффективности управления производством. Цифровые двойники – системные и мощные технологические инструменты повышения эффективности компаний в условиях стремительных перемен и состояния нестабильности. *Цель:* анализ роли цифровых двойников в сфере управления производством, исследование принципов создания, проблем внедрения и перспектив развития. *Дизайн исследования:* в предположении, что предприятия стоят на пороге новой технологической эволюции, внедрение цифровых двойников становится не просто выбором, а стратегическим императивом для тех, кто стремится преуспеть в динамичной и конкурентной среде современного управления производством. Рассмотрены ключевые аспекты, связанные с созданием, внедрением и использованием цифровых двойников. *Результаты:* представлены принципы, которые следует соблюдать при разработке создания цифровых двойников, рассмотрены практические примеры успешного использования цифровых двойников и проблемы их внедрения в производство.

Ключевые слова: цифровой двойник, инновации, цифровая трансформация, цифровизация производства, цифровые технологии, интернет вещей.

DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/6/80-94

Введение

Ландшафт управления производством претерпевает трансформационные изменения с появлением цифровых двойников – технологической инновации, способной пересмотреть подходы компаний к концептуализации, мониторингу и оптимизации своих производственных процессов. В эпоху перехода в шестой технологический уклад и Индустрии 4.0 цифровые двойники становятся эффективными инструментами повышения эффективности управления во многих отраслях, в том числе управления городами [1] и регионами [2].

Новые технологии – такие как большие данные, облачные технологии, искусственный интеллект, машинное обучение, усовершенствованная робототехника, анализ данных, 3D-печать и блокчейн – вызывают масштабные изменения в промышленном бизнесе [16]. Эти технологические сдвиги ставят перед руководителями предприятий задачи по трансформации бизнеса, но пока промышленные компании испытывают трудности в проведении цифровой трансформации и пока 70% всех инициатив в этой сфере не достигли своих целей [15]. Проблема заключается в сложности ряда параллельных видов деятельности, которые должны реализовать промышленные предприятия. Например, компаниям необходимо заранее планировать цифровизацию и интегрировать ее в бизнес и корпоративные стратегии, пересматривать свою организационную структуру и осваивать новые цифровые технологии, а также создавать перспективы для продвижения собственных ценностных предложений, или альтернатива – остаться позади [14]. Что характерно, исследования показывают, что уровень успеха цифровых преобразований среди промышленных предприятий составляет всего лишь от 4 до 11%¹. Вместе с тем осуществлять эффективное управление предприятием без активного использования цифровых технологий и развития цифровой зрелости персонала не представляется возможным. Следует отметить, что в условиях формирующейся новой экономической реальности представляется оправданным обозначить особенности и тенденции расширения спектров возможностей цифровой трансформации производственных компаний в качестве одной из ведущих движущих сил успешного становления цифровой экономики [5].

С момента своего появления в 2003 г. концепция цифровых двойников вызывает неизменный интерес, а количество ежегодных публикаций растет, особенно с 2017 г.: количество ежегодных публикаций выросло в геометрической прогрессии [21]. Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели реальных объектов, систем и процессов, обладающие способностью отображать их поведение и характеристики в реальном времени². В контексте производства эти виртуальные реплики играют критическую

¹ McKinsey Company Unlocking success in digital transformations. 2018. Доступно: <https://www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/unlocking-success-in-digital-transformations> (дата обращения: 17.12.2023).

² IBM. What is a digital twin? 2021. Доступно: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (дата обращения: 27.12.2023).

роль, обеспечивая не только возможность моделирования, тестирования и оптимизации производственных процессов, но и обеспечивая анализ больших объемов данных для принятия решений на основе информационных моделей. Цифровой двойник содержит информацию о структуре, состоянии, характеристиках объекта или системы, а также о его окружении и позволяет проводить виртуальные тесты, моделирование и анализировать поведение объекта или процесса без необходимости вмешательства в реальную среду.

Основная цель цифровых двойников – улучшение управления, оптимизация производства, предсказание и предотвращение отказов, а также создание новых решений и инноваций на основе данных, полученных от виртуальных моделей. Безопасность и надежность функционирования предприятий в контексте цифровой трансформации, а также оптимизация возможных расходов – один из приоритетов в деле обеспечения эффективности производственной и финансовой деятельности компаний [7]. Мировой рынок ЦД оценивался в 2021 г. в 5,1 млрд долл. США и будет расти экспоненциально в ближайшие годы, поэтому важно понять и оценить потенциальное влияние внедрения ЦД в зависимости от характера отрасли, в которой они используются [9].

Цель статьи – анализ роли цифровых двойников в сфере управления производством, исследование принципов создания, проблем внедрения и перспектив развития. Поскольку предприятия стоят на пороге освоения принципиально иных достижений в области технологий, внедрение цифровых двойников становится не просто выбором, а стратегическим императивом для тех, кто стремится преуспеть в динамичной и конкурентной среде современного управления производством.

Методы и результаты исследования

Применены системный подход исследования сложных экономических систем и общепринятые научные методы сбора информации: накопление фактов, анализ, сравнение, логические построения, синтез, изучение актуальных научных статей из общедоступных ресурсов, в том числе с привлечением как поисковых систем общего назначения, так и специализированных поисковых систем и баз данных.

Технология цифровых двойников представляет собой инновационный подход, который использует виртуальные модели для отображения и моделирования реальных объектов, процессов или систем. М. Гривз предложил концепцию цифрового двойника в 2003 г., основываясь на предпосылке, что каждая система состоит из двух структур: физической – всегда существовавшей, и новой виртуальной, содержащей всю информацию о физической системе [10], что означает наличие зеркального отражения или системы двойников между реальным и виртуальным пространством и наоборот, то есть цифровой двойник – это информационная конструкция физического двойника. Цель использования цифрового двойника заключается в предоставлении такой же или лучшей информации, чем у физического двойника,

и ключевое предположение заключается в том, что тип, уровень детализации и объем информации, содержащейся в цифровом двойнике, определяются вариантами использования [11].

Проблема разработки методологии создания цифровых двойников заключается в том, что различные нормативные организации предъявляют к объектам разные требования, которые могут меняться в течение жизненного цикла конструкции [3]. Подход, основанный на непрерывном информационном сопровождении жизненного цикла объекта, предполагает целесообразность создания цифровых двойников на этапе проектирования. Однако параллельное проектирование объектов и разработка цифровых двойников сопряжены с определенными трудностями, поскольку методы должны быть согласованы с более ранними и более поздними проектными работами.

В свете указанных обстоятельств выделим принципы, которые следует соблюдать при разработке методик создания цифровых двойников.

1. Структурирование и модульность. При разработке методики имеет значение ее структура, соответствующая структуре цифровых двойников. Поскольку нормативные требования, типы сооружений и особенности применения цифровых двойников разнообразны, методика должна включать базовые и специфические элементы структуры. Главная концепция должна соответствовать базовой модели структуры цифровых двойников и быть согласована с инструментами измерения и мониторинга³.

Частные методики, или модули, могут использоваться для уточнения базовой модели цифрового двойника или добавления отдельных функциональных модулей, зависящих от аспектов применения цифровых двойников.

2. Структурная иерархия и расстановка подмоделей. Разработка детальной модели конструкции в соответствии с локальными геометрическими и прочностными характеристиками может потребовать достаточно много усилий и не всегда дает гарантию качества вследствие вероятных просчетов. В таком случае рекомендуется строить иерархическую систему (общая модель, подмодели пролетов, перекрытий, рам, узлов и т. д.), используя методы подмоделирования⁴. Все подмодели привязываются к модели с помощью автоматически определяемых граничных условий, исходя из анализа модели, и это помогает достаточно свободно варьировать параметры и организацию подмодели по мере надобности, поддерживая при этом требуемую степень точности аналитики.

3. Обратная связь и управление. Параметры модели корректируются по результатам анализа физических данных, поступающих в ходе различных этапов жизненного цикла конструкции, включая показания датчиков,

³ Чижумов С., Вепринян И., Немов А. Особенности разработки цифровых двойников инженерных конструкций на этапе проектирования. 2020. Доступно: https://www.researchgate.net/publication/358537936_osobennoti_razrabki_cifrovyyh_dvojnikov_inzenernykh_konstrukcij_na_etape_proektirovania (дата обращения: 27.12.2023).

⁴ Ladj A., Wang Z., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C. (2021). A knowledge-based digital shadow for the machining industry in a digital twin perspective. 2021. Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027861252030128X> (дата обращения: 27.12.2023).

выявление и распознавание неисправностей и отказов, модернизационные процессы и т. д.⁵. Параллельно с этим вычислительные эксперименты с использованием модели могут предсказать и контролировать процессы, определяющие техническое состояние конструкции.

4. Мотивация для улучшения правил. Нормативы, составленные достаточно узким кругом экспертов для широкого круга людей с различным техническим образованием и опытом, лишь приблизительно и недостаточно полно отражают физическую реальность и практический уровень пользователей⁶. Поэтому нормативы при разработке регламентов должны быть максимально ясными: исходные допущения, методы и зависимости должны быть понятны и обладать четким физическим смыслом. Следует четко определить данные и выявить способы преодоления нерешенных вопросов и факторов неопределенности.

Данные для цифровых двойников, связанные с физическими объектами, виртуальной моделью, сервисами, и знания о предметной области – эти четыре вида составляют основу данных для цифровых двойников. Динамическая информация о физическом объекте (например, его состояние, параметры окружающей среды и помехи) может собираться в режиме реального времени с помощью датчиков, встроенных систем, радиочастотной идентификации (RFID) и т. д.⁷. В то время как статические данные, такие как атрибуты, характеристики и функции объекта, можно получить с помощью автономных измерений и отбора проб; данные, связанные с виртуальной моделью, как правило, генерируются путем моделирования и проверки этих геометрических, физических, поведенческих и управляющих моделей. Данные могут быть собраны с помощью справочников, журналов моделирования и выходных данных моделирования в реальном времени. В частности, поскольку моделирование на основе физических моделей (например, компьютерное моделирование гидродинамики), как правило, отнимает много времени и даже является неточным, для повышения эффективности и точности может быть применен гибридный метод, сочетающий физические модели и подходы, основанные на данных. Данные, относящиеся к сервису, генерируются на основе прикладных служб и функциональных сервисов и могут быть получены на протяжении всего процесса создания, эксплуатации и технического обслуживания сервиса. Знания о предметной области обычно собираются экспертами, краудсорсингом, базами знаний, историческими данными и т. д.

⁵ Ladj A., Wang Z., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C. (2021). A knowledge-based digital shadow for the machining industry in a digital twin perspective. 2021. Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027861252030128X> (дата обращения: 27.12.2023).

⁶ Leng J., Wang D., Shen W., Li X., Liu, Q., Chen X. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. // *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60, 119-137. Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612521001151> (дата обращения: 25.12.2023).

⁷ Zhang M., Tao F., Huang B., Liu, A., Wang L., Anwer N., Nee A. Digital twin data: methods and key technologies, 2021. Доступно: https://www.researchgate.net/publication/354770875_Digital_twin_data_methods_and_key_technologies (дата обращения: 27.12.2023).

С помощью цифрового двойника можно анализировать и изменять эксплуатационные характеристики выпускаемых изделий. Цифровой двойник можно использовать для моделирования всего производственного процесса, от сырья до готового изделия, делать проверку всевозможных сценариев и рассчитывать реакцию компонентов системы в различных условиях. Таким образом, производители могут своевременно определять возникающие сложности и совершенствовать систему для достижения большей надежности [17].

В условиях интеллектуального производства целый комплекс сенсорных датчиков и других измерительных устройств обеспечивает работу соединенного с ними цифрового двойника, в режиме реального времени предоставляя актуальную информацию на основе данных, собранных в процессе производства, за счет чего наблюдение и контроль за системой становятся более качественными и удобными и предусматривают своевременное внесение соответствующих изменений [8].

Реализация цифрового двойника и соответствующее этому построение цифровой модели и средства анализа позволяют отказаться от разработки и производства физических прототипов [18]. Цифровые двойники также служат для отслеживания и совершенствования всей производственной линии и всей технологической цепочки, начиная со стадии замысла и заканчивая выходом серийной продукции [15]. С помощью цифровых двойников можно решать задачи оптимизации дизайна моделей или их конструктивных особенностей при проектировании с привлечением математического метода нахождения многокритериальных парето-оптимальных решений [6]. Такой подход позволяет наглядно и достаточно легко провести предварительную комплексную проработку дизайна изделия в виртуальной реальности и добиться требуемой точности и качества продукции [22]. Цифровые двойники поддерживают способность производителей своевременно распознавать потенциальные проблемы и реагировать на них, сокращая время простоя и поддерживая стабильно высокую продуктивность [12].

Помимо этого, можно использовать цифровые двойники для проведения испытаний и аттестации технических новшеств и устройств перед их запуском в производство. Такие меры значительно сокращают риск опасных неисправностей и уменьшают сроки выхода новых товаров на рынок⁸. Цифровые двойники предоставляют обширную информацию относительно планируемых эксплуатационных свойств, что способствует проведению более глубоких исследований и разработке новых продуктов. Эти данные могут быть использованы компаниями и для внесения необходимых изменений до запуска продукта в производство [12].

Цель стратегии использования цифрового двойника – добиться более высокого качества продукции, усовершенствовать технологические

⁸ Soori M., Arezoo B., Dastres R. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2023, vol. 2, 100017. Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344423000099#bib0083> (дата обращения: 25.12.2023).

процессы во всей цепочке создания стоимости. При изготовлении деталей для конкретного оборудования или линии производства могут быть созданы цифровые двойники для обеспечения контроля в режиме реального времени за ходом технологических процессов. Это предполагает мониторинг таких параметров, как, например, температура, давление и скорость потока, способных оказывать воздействие на показатели качества готового продукта⁹. При анализе данных цифрового двойника могут быть установлены области, требующие оптимизации или изменения производственных процессов. Например, если будет обнаружено, что определенный станок выпускает комплектующие с большей долей брака, чем другие, в производственный процесс могут быть внесены коррективы для повышения качества [12]. Цифровые двойники также могут использоваться для отслеживания потребления энергии в процессе изготовления деталей и поиска областей, где можно сэкономить деньги. Постоянные улучшения на производстве также могут быть достигнуты путем отслеживания в реальном времени рабочих характеристик оборудования в сравнении с ожиданиями с помощью цифровых двойников [15].

Примеры успешного применения:

1) Цифровые двойники в производстве

Rolls-Royce использует цифровых двойников в своей программе IntelligentEngine. Программа создает цифровых двойников для каждого производимого двигателя¹⁰. При этом они могут собирать данные по более чем десятку параметров от бортовых датчиков. Это позволяет им контролировать работу двигателя в режиме реального времени во время полетов, прогнозируя необходимость технического обслуживания и сокращая время простоев.

2) Цифровые двойники в автомобилестроении

Volvo, известная автомобильная компания, обеспечивающая максимальную безопасность пассажиров, использует цифровых двойников. Они создают виртуальные копии для тестирования и опробования различных материалов и аэродинамики новых конструкций автомобилей. Таким образом, они могут выбрать идеальную конструкцию, которая позволит улучшить производительность и создать экономичные модели¹¹.

3) Цифровые двойники в строительстве

Cuby Technologies, Inc. использует технологию цифровых двойников для обеспечения производства деталей, необходимых для сборного строительства в количестве, соответствующем требуемому объему. Согласно статистике, до 40% всех твердых отходов в США приходится на отходы строи-

⁹ Soori M., Arezoo B., Dastres R. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2023, vol. 2, 100017. Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344423000099#bib0083> (дата обращения: 25.12.2023).

¹⁰ Amazing Examples of Digital Twin Technologies for Industries. Tobler. Доступно: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-examples> (дата обращения: 25.12.2023).

¹¹ Amazing Examples of Digital Twin Technologies for Industries. Tobler. Доступно: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-examples> (дата обращения: 25.12.2023).

тельства и сноса. Применение предварительного изготовления всех деталей позволяет снизить объем отходов до 90%¹².

Изучение и усовершенствование процессов с помощью интеллектуального анализа в сочетании с моделированием обеспечивает прозрачность текущих процессов без необходимости полагаться на интуицию. Это позволяет проводить анализ «что, если», что значительно более эффективно, поскольку предоставляет реальное представление о событиях и позволяет проводить моделирование изменений до их внедрения. Часто внесение изменений может не дать ожидаемого результата или создать новые проблемы в других областях¹³.

Индустрия 4.0 и последующие усилия по созданию интеллектуальной цепочки поставок позволили добиться значительных успехов в совершенствовании операций и построении гибких цепочек поставок, но без технологий цифровых двойников эти усилия потребовали бы значительных затрат.

Преимущества, которые цифровые двойники приносят производственному сектору, представлены на рис. 1¹⁴.



Рис. 1. Преимущества от использования цифровых двойников¹⁵

¹² Panel E. Council post: 16 smart and effective uses for Digital Twin Technology. Forbes. (2022, September 21). Доступно: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2022/09/20/16-smart-and-effective-uses-for-digital-twin-technology/?sh=6d6172952228> (дата обращения: 25.12.2023).

¹³ Panel E. Council post: 16 smart and effective uses for Digital Twin Technology. Forbes. (2022, September 21). Доступно: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2022/09/20/16-smart-and-effective-uses-for-digital-twin-technology/?sh=6d6172952228> (дата обращения: 25.12.2023).

¹⁴ Digital twin. Databricks. 2020. Доступно: <https://www.databricks.com/glossary/digital-twin> (дата обращения: 25.12.2023).

¹⁵ Digital twin. Databricks. 2020. Доступно: <https://www.databricks.com/glossary/digital-twin> (дата обращения: 25.12.2023).

Проектирование и разработка продукта теперь осуществляются более эффективно и оперативно благодаря итеративному моделированию с учетом разнообразных ограничений. Так можно добиться получения наиболее удачного и оптимального дизайна. Цифровые двойники используются, в частности, при проектировании всех коммерческих самолетов. Цифровые двойники предоставляют информацию о состоянии запасов и снижают до минимума проблемы, связанные с цепочкой поставок.

Постоянный мониторинг качества производимых изделий с использованием обратной связи от машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет предотвращать возможные проблемы и повышает качество продукции. Например, окончательная проверка окраски автомобилей выполняется с помощью компьютерного зрения, основанного на технологии цифровых двойников. Использование цифровых двойников позволяет оптимально контролировать процесс замены деталей: с их помощью обеспечивается оперативная обратная связь, позволяющая предотвратить поломку или выход из строя оборудования.

Возможности и преимущества реализации цифрового двойника¹⁶:

- ориентация на видение будущего: основная область практического использования цифрового двойника – прогнозирование будущего состояния организации и аргументация при принятии оперативных и стратегических управленческих решений;
- универсальность – описание всех функциональных областей знаний построено на общих принципах, благодаря чему они легко интегрируются в рамках единой модели;
- системность – набор знаний, умений и навыков работников образует единый, взаимосвязанный комплекс показателей, при этом отслеживание и рассмотрение динамики движения любого показателя в какой-либо части системы осуществляется на основе совокупности причинно-следственных зависимостей;
- постоянное обновление и совершенствование – модель находится в постоянном процессе модификации: алгоритмы корректируются по результатам план-фактного и экспертного анализа, при необходимости в модель вносится свежая, или дополнительная, или более подробная информация.

Несмотря на очевидные преимущества использования цифровых двойников, внедрение этой технологии является стратегическим решением, которое определит будущее производства на многие годы вперед, но сегодня оно сталкивается со множеством проблем. Основной из них становится необходимость проведения огромного объема работ по цифровизации всех объектов и технологических процессов, а также наличие острого дефицита квалифицированных специалистов в данной области [11]. Поэтому нет

¹⁶ Digital twin. Databricks. 2020. Доступно: <https://www.databricks.com/glossary/digital-twin> (дата обращения: 25.12.2023).

универсального решения относительно цифровизации – для разных компаний выбор системы будет разным, зависящим от разных факторов, таких как возможность интеграции, затраты, перспективы развития, соответствие стратегии организации и др.

Технологии цифрового двойника находятся только в начале своего пути, а это значит, что для полного урегулирования законодательства и создания профессиональных стандартов пока не хватает опыта. Это создает парадоксальную ситуацию, поскольку многие предприятия внедряют цифровые двойники с целью повышения своей конкурентоспособности, но не поступают запросы на цифровые формы со стороны государственных заказчиков и других заинтересованных сторон [20]. В результате ключевые документы производства, такие как чертежи и технические отчеты, остаются в бумажной форме, что сопряжено с издержками при внедрении цифровых двойников.

Среди значимых проблем развития цифровых двойников выделяется вопрос обеспечения информационной безопасности. Внедрение цифровых двойников меняет схему управления, делегируя тактические аспекты программно-аппаратным средствам и сосредотачивая операторов на стратегических аспектах. Однако это также приводит к новым угрозам, связанным с адекватностью цифровой модели. Например, ошибки в моделях могут привести к серьезным инцидентам, как в случае с запуском ракеты-носителя с космодрома «Восточный» в 2017 г.¹⁷.

Поскольку полная прозрачность жизненного цикла является важнейшей особенностью концепции цифрового двойника, данные об отдельных активах также должны отражать его общий жизненный цикл. Данные об активах должны включать информацию о их производстве, а не только об их использовании. Например, учет активов для материала из углеродного волокна должен включать не только данные об окружающей среде во время производственных процессов, но и данные об окружающей среде во время его производства. Получение данных об активах от поставщика, которые исторически считались выходящими за рамки производственного применения, требует тесного сотрудничества с несколькими уровнями цепочки поставок.

Другой решающий момент – затраты на внедрение. Компания в первую очередь должна быть настроена на вложение средств в формирование технологической платформы, в разработку ПО, в подготовку кадров, в маркетинг и рекламу, и в меры безопасности [4]. Минимальная стоимость реализации цифрового двойника, согласно некоторым оценкам, достигает порядка 50 000 долл. США [20]. Для того, чтобы реализовать сложные проекты, необходимы значительные временные ресурсы и более серьезные затраты на разработку.

¹⁷ В чем ценность цифрового двойника? 2018. Доступно: <https://hightechsoftwarecluster.nl/paper/what-is-a-digital-twin-and-what-value-does-it-deliver/> (дата обращения: 25.12.2023).

Во многих отраслях внедрение высокотехнологичных наукоемких решений «цифрового двойника» расширяет спектр доступных инструментов для лучшего понимания производственных и управленческих процессов и, соответственно, повышения их эффективности и более глубокой оптимизации с целью выполнения как тактических, так и стратегических задач. В дальнейшем прогресс и результативность внедрения этих технологий определяются преодолением существующих барьеров и формированием инфраструктуры, содействующей развертыванию этого направления в самых разных отраслях экономики и социума.

В последнее время использование технологий интернета вещей, больших данных и искусственного интеллекта открыло новые возможности в области цифровых двойников. Внедрение этих методов обеспечивает создание идеального цифрового двойника и открывает новые исследовательские задачи и возможности, например, уже с 2015 г. в различных отраслях было разработано несколько цифровых двойников с использованием AI-ML и анализа больших данных. Благодаря этому количество соответствующих исследовательских статей и данных быстро растёт.

Положительные стороны использования ИИ при разработке цифровых двойников показаны в статье [13]:

1) ИИ цифровых двойников собирает, анализирует и обрабатывает данные с датчиков и устройств IoT. В созданной на основе этих данных виртуальной модели распознаются ее ограничения в физическом мире. Проектировщики могут итерационно дорабатывать проект на основе информации относительно реальных условий.

2) При использовании технологии цифрового двойника выполняется наблюдение и контроль за различными компонентами, узлами, деталями и самими изделиями или продуктами на протяжении всего их жизненного цикла. Аналитика больших данных и средства ИИ позволяют производителям определять наиболее предпочтительные стратегии и модели с учетом реальных данных. В режиме реального времени виртуальные модели автоматически корректируются, чтобы предвидеть, прогнозировать и реагировать на отклонения.

3) Проекты цифровых двойников направлены на непрерывную и последовательную модернизацию всех рабочих процедур и планирование мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту физических систем на основе прогнозов виртуальных моделей.

Заключение

В процессе эволюции современного производства цифровые двойники приобретают особое значение в качестве ведущего фактора, обеспечивая серьезные возможности и широкие перспективы в самых разных отраслях. С их появлением становится возможным проводить тщательное достоверное моделирование, налаживать точный контроль и регулирование технологических процессов, сокращать уровень образования отходов и загрязнения

окружающей среды, планомерно и стабильно совершенствовать показатели качества продукции и добиваться оптимального расходования имеющихся ресурсов. Поэтому современному бизнесу цифровые двойники нужны как надежный помощник и мощное средство формирования и поддержки будущей производственной системы.

С внедрением цифровых двойников становится возможным более достоверное прогнозирование событий, а глубокий анализ данных способствует выработке грамотных и обоснованных решений. Наличие постоянной обратной связи приводит к качественным изменениям в процессах управления и позволяет заблаговременно предупреждать возможные ошибки и неблагоприятные ситуации. Разнообразные технологические средства цифрового двойника открывают доступ к новым методам и разработкам, которые обеспечивают высокую степень организации и гармонизации производства, снижают затраты, повышают качество и общую производительность, что обеспечивает фундамент для нововведений и инновационного развития производства и открывает новые горизонты для построения, налаживания и запуска наукоемких, более пластичных, жизнеспособных и экологически чистых производств.

В общем и целом, цифровые двойники имеют потенциал произвести настоящий переворот в способах и методах организации производства, сделав их более удобными, мобильными, пластичными и рациональными, что в итоге серьезно отразится на перспективах развития промышленности и бизнеса.

Список источников

1. Абрамов В.И., Андреев В.Д. Сравнительный анализ цифровых двойников регионов // *Информационное общество*, 2023, no. 4, с. 106-117.
2. Абрамов В.И., Головин О.Л., Столяров А.Д. Методика поиска Парето-оптимальных решений по развитию умных городов на базе их цифровых двойников // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2021, no. 9 (141), с. 8-15.
3. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В., Марусева В.М., Кулемин В.Ю. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // *Оборонная техника. Научно-технический сборник*, 2018.
4. Михайленко Н.Н. Цифровые платформы и развитие бизнеса: исследование влияния и практические примеры // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2023, no. 8 (164), с. 33-48.
5. Пургаева И.А., Некрасова Т.А., На-ролина Т.С., Смотров Т.И. Цифровая трансформация промышленности: проблемы и перспективы // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2023, no. 1 (157), с. 34-49.
6. Столяров А.Д., Гордеев В.В., Абрамов В.И. Методика поиска многокритериальных решений на основе цифровых двойников // *Экономика и управление*, 2023, т. 29, no. 7, с. 851-858.
7. Щеголева Т.В. Обеспечение надежности бизнес-процессов высокотехнологичных промышленных предприятий в условиях цифровой трансформации // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2022, no. 2(146), с. 69-78.
8. Ali M.I., Patel P., Breslin J. G., Harik R., Sheth A. Cognitive digital twins for smart manufacturing // *IEEE Intelligent Systems*, 2021, vol. 36, pp. 96-100.
9. Erol T., Mendi A. F., Doğan D. Digital Transformation Revolution with Digital Twin Technology. *In Proceedings of the*

2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Istanbul, Turkey, 22–24 October 2020, pp. 1–7.

10. Grieves M., Vickers J. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior*. In Springer International Publishing Switzerland, F.-J. Kahlen et al. (eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 2017.

11. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. In *book: Complex Systems Engineering: Theory and Practice Publisher: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2019, pp. 175-200.

12. Ito D., Ishida H. Digital twin technology for continuous improvement at manufacturing sites // *Benefits*, 2020, vol. 2, pp. 2-11.

13. Khajavi S.H., Motlagh N.H., Jaribion A. et al.: Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings // *IEEE access*, 2019, vol. 7, pp. 147406-147419.

14. Krotov V., The Internet of Things and new business opportunities // *Bus. Horiz*, 2017, vol. 60(6), pp. 831-841.

15. Liu Q., Leng J., Yan D., Zhang D., Wei L., Yu A., Chen X. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system // *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pp. 52-64.

16. Morkunas V.J., Paschen J., Boon E. How blockchain technologies impact your business model // *Bus. Horiz*, 2019, no. 62 (3), pp. 295-306.

17. Mylonas G., Kalogeras A., Kalogeras G., Anagnostopoulos C., Alexakos C., Muñoz L. Digital twins from smart manufacturing to smart cities: a survey // *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 143222-143249.

18. Shao G., Jain S., Laroque C., Lee L. H., Lendermann P., Rose O. Digital twin for smart manufacturing: the simulation aspect // *Winter Simulation Conference (WSC), IEEE*, 2019, pp. 2085-2098.

19. Tabrizi B., Lam E., Girard K., Irvin V., Digital transformation is not about technology. // *Harv. Bus. Rev*, 2019.

20. Tuegel E.J., Ingraffea A.R., Eason T.G., Spottswood S.M.. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin // *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2011, vol. 2011, pp. 1-14.

21. Van der Valk H., Haße H., Möller F., Arbter M., Henning J-L., Otto B. A Taxonomy of Digital Twins // *In AMCIS 2018 Template*, 2020, pp. 1-10.

22. Zheng P., Sivabalan A. S. A generic tri-model-based approach for product-level digital twin development in a smart manufacturing environment // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 64, Article 101958.

DIGITAL TWINS IN PRODUCTION MANAGEMENT: CREATION PRINCIPLES, IMPLEMENTATION PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Zharasov Baglan Seitbattaluly¹, master's student
Abramov Viktor Ivanovich^{1,2}, Dr. Sci. (Econ.), Prof.

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe sh., 31, Moscow, Russia, 115409; e-mail: dav@v.ru

² SI Institute of Applied Information Technologies, Kashirskoye sh., 53, building 5, Moscow, Russia, 115409; e-mail: iabramov@mephi.ru

Importance: the article discusses the theoretical and practical principles of creation, economic benefits, implementation problems and prospects for the development of digital twins in the context of increasing the efficiency of production management. The digital twin is a comprehensive solution and an effective tool for increasing the efficiency of companies in an era of rapid change and uncertainty. *Purpose:* analysis of the role of digital twins in the field of production management, study of the principles of creation, implementation problems and development prospects. *Research design:* with businesses on the cusp of a new technological evolution, the adoption of digital twins becomes not just a choice, but a strategic imperative for those seeking to succeed in the dynamic and competitive environment of modern manufacturing management. Key aspects related to the creation, implementation and use of digital twins are considered. *Results:* the principles that should be followed when developing the creation of digital twins are presented, practical examples of the successful use of digital twins and the problems of their implementation in production are considered.

Keywords: digital twin, digital transformation, digitalization of production, digital technologies, Internet of things.

References

1. Abramov V.I., Andreev V.D. Sravnitel'nyj analiz cifrovyyh dvojnikov regionov. *Informacionnoe obshchestvo*, 2023, no. 4, pp. 106-117 (In Russ.)
2. Abramov V.I., Golovin O.L., Stoljarov A.D. Metodika poiska Pareto-optimal'nyh reshenij po razvitiyu umnyh gorodov na baze ih cifrovyyh dvojnikov. *Sovremennaja jekonomika: problemy i reshenija*, 2021, no. 9 (141), pp. 8-15 (In Russ.)
3. Borovkov A.I., Rjabov Ju.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Ju. Cifrovye dvojniki i cifrovaja transformacija predpriyatij OPK. *Oboronnaja tehnika. Nauchno-tehnicheskij sbornik*, 2018. (In Russ.)
4. Mihajlenko N.N. Cifrovye platformy i razvitie biznesa: issledovanie vlijaniya i prakticheskie primery. *Sovremennaja jekonomika: problemy i reshenija*, 2023, no. 8 (164), pp. 33-48. (In Russ.)
5. Purgaeva I.A., Nekrasova T.A., Narolina

- T.S., Smotrova T.I. Cifrovaja transformacija promyshlennosti: problemy i perspektivy. *Sovremennaja jekonomika: problemy i reshenija*, 2023, no. 1(157), pp. 34-49. (In Russ.)
6. Stoljarov A. D., Gordeev V. V., Abramov V. I. Metodika poiska mnogokriterial'nyh reshenij na osnove cifrovyh dvojniov. *Jekonomika i upravlenie*, 2023, T. 29, no. 7, pp. 851-858 (In Russ.)
7. Shhegoleva T.V. Obespechenie nadezhnosti biznes-processov vysokotekhnologichnyh promyshlennyh predpriyatij v uslovijah cifrovoj transformacii. *Sovremennaja jekonomika: problemy i reshenija*, 2022, no. 2 (146), pp. 69-78. (In Russ.)
8. Ali M.I., Patel P., Breslin J. G., Harik R., Sheth A. Cognitive digital twins for smart manufacturing. *IEEE Intelligent Systems*, 2021, vol. 36, pp. 96-100. (In Eng.)
9. Erol T., Mendi A. F., Doğan D. Digital Transformation Revolution with Digital Twin Technology. In Proceedings of the 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Istanbul, Turkey, 22–24 October, 2020, pp. 1-7. (In Eng.)
10. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior. In *Springer International Publishing Switzerland, F.-J. Kahlen et al. (eds.), Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 2017. (In Eng.)
11. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. In *book: Complex Systems Engineering: Theory and Practice Publisher: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2019, pp. 175-200. (In Eng.)
12. Ito D., Ishida H. Digital twin technology for continuous improvement at manufacturing sites. *Benefits*, 2020, vol. 2, pp. 2-11. (In Eng.)
13. Khajavi S.H., Motlagh N.H., Jaribion A. et al.: Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE access*, 2019, vol. 7, pp. 147406-147419. (In Eng.)
14. Krotov V., The Internet of Things and new business opportunities. *Bus. Horiz*, 2017, vol. 60 (6), pp. 831-841. (In Eng.)
15. Liu Q., Leng J., Yan D., Zhang D., Wei L., Yu A., Chen X. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pp. 52-64. (In Eng.)
16. Morkunas V.J., Paschen J., Boon E. How blockchain technologies impact your business model. *Bus. Horiz*, 2019, no. 62 (3), pp. 295-306. (In Eng.)
17. Mylonas G., Kalogeras A., Kalogeras G., Anagnostopoulos C., Alexakos C., Muñoz L. Digital twins from smart manufacturing to smart cities: a survey. *IEEE Access*, 2021, vol.9, pp. 143222-143249. (In Eng.)
18. Shao G., Jain S., Laroque C., Lee L. H., Lendermann P., Rose O. Digital twin for smart manufacturing: the simulation aspect. *Winter Simulation Conference (WSC)*, IEEE, 2019, pp. 2085-2098. (In Eng.)
19. Tabrizi B., Lam E., Girard K., Irvin V., Digital transformation is not about technology. *Harv. Bus. Rev*, 2019. (In Eng.)
20. Tuegel E.J., Ingrassia A.R., Eason T.G., Spottswood S.M.. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2011, vol. 2011, pp. 1-14. (In Eng.)
21. Van der Valk H., Haße H., Möller F., Arbter M., Henning J-L., Otto B. A Taxonomy of Digital Twins. In *AMCIS 2018 Template*, 2020, pp. 1-10 (In Eng.)
22. Zheng P., Sivabalan A.S. A generic tri-model-based approach for product-level digital twin development in a smart manufacturing environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol.64, Article 101958. (In Eng.)