

УДК 519.876.5:004.94:004.946

КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И РОЛЬ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В АРХИТЕКТУРЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Лычкина Н.Н., Павлов В.В. (Москва)

Введение

Digital Twin (DT) – одно из многообещающих цифровых решений, разрабатываемых в настоящее время для поддержки цифровой трансформации предприятий и принятия решений во многих отраслях. Несмотря на то, что концепция цифрового двойника уже почти 20 лет, она продолжает развиваться, охватывая новые отрасли и варианты применения. Это привело к постоянно растущему разнообразию определений, которые угрожают размыть концепцию и привести к неэффективному внедрению технологии в прикладных решениях. Цифровая трансформация предприятий требует разработки и применения цифровых моделей, часто называемых цифровыми двойниками (ЦД), которые представляют собой набор знаний о реальных процессах [3, 4]. Многообразие интерпретаций и приложений цифрового двойника требует также уточнения свойств цифровой модели, без которых затруднен архитектурный дизайн и практическое внедрение такой сложной технологической платформы, которой является цифровой двойник.

На текущий момент одна из основных проблем в области исследований цифрового двойника – отсутствие единых и общепринятых понятий, наборов компонентов и характеристик ЦД, следствием чего являются возникающие противоречия в исследованиях и практической реализации двойников на предприятиях и в бизнес-приложениях. В настоящей статье на основе анализа релевантной научной литературы предпринята попытка уточнить понятие, содержание концепции, архитектуру цифрового двойника и роль имитационной модели в общей архитектуре ЦД.

Статья охватывает следующие взаимосвязанные основные аспекты, а именно: определение цифрового двойника; его функции и роль имитационных (цифровых) моделей; компоненты и архитектура ЦД. Проведенный анализ научной литературы показывает, что парадигма цифрового двойника находится в стадии становления и формирования и в настоящее время сильно зависит от контекста конкретных приложений. В статье проводится анализ релевантной научной литературы и рассматриваются существующие определения цифрового двойника, уточняется определение и ключевые характеристики цифрового двойника и цифровой модели, а также основные компоненты в общей архитектуре ЦД. В ходе проведенного анализа уточняется роль и свойства цифровой (динамической, имитационной) модели объекта или системы.

Анализ литературы и определения цифрового двойника

Настоящий обзор охватывает научные исследования на тему цифровых двойников и их связи с технологиями имитационного моделирования, для которого были собраны и проанализированы более 30 актуальных источников за последние 4 года. На основе найденных источников было проведено исследование теоретических концепций цифрового двойника в следующих областях: определение ЦД, основные характеристики ЦД, базовые компоненты ЦД, связь ЦД и имитационного моделирования. Проведенный анализ показывает, что авторы работ по-разному подходят к вопросам определения сущности цифрового двойника, его компонентов и

основных характеристик, недостаточно исследованы и систематизированы требования к цифровым моделям в контексте общей архитектуры цифрового двойника.

Концепция цифрового двойника сформировалась в процессе развития технологий моделирования объектов в виртуальной среде в системах автоматизированного производства (САМ) и проектирования (САД), управления жизненным циклом изделия (PLM) и данными об изделии (PDM) [5]. Сам термин цифровой двойник был впервые использован Майклом Гривсом в 2002 году для описания виртуального представления физического продукта или системы в виде цифровой копии, которую можно использовать для исследования параметров и поведения моделируемого объекта внутри симуляции, работающей параллельно жизненному циклу реального объекта [6]. Более точное определение цифрового двойника Гривс и Викарс сформулировали в 2017 году: «виртуальный продукт, детально описывающий реальный физический продукт и содержащий в себе всю необходимую информацию от микроуровня до макроуровня, что позволяет интегрировать данные в виртуальную модель» [7]. Однако, данное определение ограничивает объект моделирования физическим продуктом и не раскрывает суть и архитектуру ЦД.

Для исследования различий в определениях цифрового двойника на основе информации из ряда источников составлена таблица с авторскими понятиями ЦД:

Таблица 1

Перечень определений понятия цифрового двойника

№ источника	Определение цифрового двойника
Semeraro C. et al. Digital twin paradigm: A systematic literature review [8]	Набор адаптивных моделей, которые симулируют поведение физической системы в виртуальной системе, получая данные в реальном времени для обновления параллельно жизненному циклу этой системы. цифровой двойник повторяет физическую систему для предсказания ошибок и возможностей для изменения, чтобы предписать действия в реальном времени по оптимизации или смягчению непредвиденных событий через наблюдение и оценки операционной профильной системы
Greif T., Stein N., Flath C.M. Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics [9]	Цифровое представление интересующего физического объекта
Purcell W., Neubauer T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review [10]	Представление активного уникального продукта, который может быть реальным устройством, объектом, машиной, услугой, нематериальным активом или системой, состоящей из продукта и связанных с ним услуг
Trauer J. et al. What is a digital twin? – definitions and insights from an industrial case study in technical product development [11]	Виртуальное динамическое представление физической системы, которое подключено к ней на протяжении всего ее жизненного цикла для двунаправленного обмена данными

<p>Van Der Valk H. et al. Supply Chains in the Era of Digital Twins – A Review [12]</p>	<p>Виртуальное представление физического артефакта (в данном случае - цепочки поставок), которое содержит двунаправленный поток данных между виртуальным и цифровым представлениями. Оно предоставляет решения для операций с данными, т. е. симуляции, оптимизации и мониторинга</p>
<p>Melesse T.Y., Di Pasquale V., Riemma S. Digital twin models in industrial operations: A systematic literature review [13]</p>	<p>Живая модель системы или физического актива, которая может постоянно адаптироваться к операционным изменениям на основе собранных онлайн-данных и информации, чтобы прогнозировать будущее соответствующего ей физического двойника</p>

Анализ определений показывает, что во многих исследованиях используется исходное определение Гривса, дополняемое новыми компонентами или выделением отдельных характеристик или функций цифрового двойника. При этом отдельные определения могут также соответствовать информационным системам других классов без дополнительных уточнений самой концепции ЦД.

Цифровой двойник тесно связан с областью имитационного моделирования, так как часто включает в себя имитационную модель как один из компонентов для моделирования системы в виртуальном пространстве. На текущий момент и имитационные модели, и цифровые двойники активно реализуются и внедряются в цифровой ландшафт предприятий, но из-за неточности определений в области цифрового двойника часто происходит подмена этих двух понятий – реализованная имитационная модель чаще всего не является полноценным цифровым двойником из-за отсутствия других необходимых компонентов.

Так в исследовании «Digital Twin: Generalization, characterization and implementation» по итогу анализа различных определений цифрового двойника формируется обобщающее определение ЦД: «виртуальное представление физической системы и связанного с ней окружения и процессов, которое обновляется за счет передачи информации между физической и виртуальной системами» [14]. Авторы отделяют концепцию ЦД от других систем (цифровая модель, имитационная модель, суррогатные модели, другие) за счет выделения различий между ними – при реализации цифрового двойника создается виртуальное представление одного экземпляра физической системы, информация из которого при этом используется для регулярного обновления состояния виртуального представления.

Таким образом, ключевым отличием цифрового двойника от систем мониторинга, сбора и обработки данных заключается в наличии *двусторонней обратной связи между виртуальным компонентом системы и реальным объектом*. Это также является и основным отличием ЦД от цифровой модели, которая предоставляет только возможности симуляции поведения реального объекта или системы без прямого влияния на моделируемый объект или систему. Кроме этого, в системе цифрового двойника модель должна детально описывать изменяющиеся состояния реального объекта на всем его жизненном цикле, то есть являться не только виртуальной цифровой моделью, но и динамической имитационной моделью развивающегося во времени процесса, с описанием изменяющихся свойств и состояний объекта.

Концепцию цифрового двойника часто связывают с Индустрией 4.0, поэтому если рассмотреть отраслевые стандарты, то можно также найти различающиеся определения и понятия цифрового двойника, приведенных в: NASA [15], Международный совет по системной инженерии в своем стандарте Книга знаний по системной инженерии (Systems Engineering Book of Knowledge, SEBoK) [16], CIRP

Энциклопедия производственной инженерии [17] и др.. В целом ряде источников на тему цифровых двойников [8, 14, 18], по итогам изучения множества определений ЦД, выражается общий вывод о наличии значительных различий между определениями в научных работах и прикладных проектах, что усложняет координацию исследований и вводит различия в итоговых моделях ЦД. Таким образом, на текущий момент из-за большого разнообразия определений в научных работах и стандартах, видно, что в отрасли еще не сложилось единое понятие для цифрового двойника, не определены базовые свойства и компоненты ЦД.

В силу исторического происхождения, большинство приведенных понятий ЦД рассматривает в качестве реальной системы жизненный цикл продукта, однако ряд исследователей [19] подчеркивают необходимость рассматривать и определять *свойства, состояние и поведение реального объекта*.

Понятие «жизненного цикла» объекта является исключительно важным в понимании назначения цифрового двойника, но требует более широкой интерпретации в контексте *рассмотрения поведения реальной системы на всем цикле его существования* (в зависимости от специфики физической системы) в процессе развития и трансформации, а значит предполагает анализ множества (не только текущих) состояний физической системы как изменяющегося во времени процесса.

В качестве реальной системы может выступать не только проектируемое изделие, но и процессы и системы любой сложности (производство, предприятие в целом, сетевые формы организаций и т.п.). Весьма условная типология цифровых двойников, приведенная в научной литературе, показывает, что цифровой двойник может быть моделью некоторого компонента, системой компонентов или системой систем.

Цифровой двойник определяется не только данными, как его пытаются определить ряд исследователей. Большинство исследователей, делает акцент на обработке данных, поступающих с физической системы в виртуальное пространство, что фактически обобщает понятие цифрового двойника с современными системами мониторинга и слежения [8]. Кроме того, обогащение цифровой модели данными с реальной системы является важной составляющей, но не учитывает *двунаправленный характер информационного обмена между физической системой и ее модельным аналогом*.

Необходимо рассматривать более широко *функциональность* ЦД, которая включает не только процедуры обработки данных, передающихся как с объекта в модель, так и в обратном направлении (двунаправленные информационные потоки и методы интеллектуального анализа данных), а также *детальное описание поведения реальной системы*, и коммуникационные интерфейсы, обеспечивающие высокую степень визуализации состояния и поведения реального и моделируемого объекта.

Таким образом, важно подчеркнуть, что *взаимодействие с реальной (физической) системой должно быть двунаправленным* [20]. Собранные из физического пространства данные обновляют виртуальную модель. Физический близнец улучшает свои характеристики в режиме реального времени, используя знания, полученные из модели (виртуального прототипа).

Ряд определений цифрового двойника, представленных в научной литературе, производится через понятие цифровой модели, воспроизводящей свойства реальной системы, что не корректно – приведенный выше анализ однозначно демонстрирует, что цифровая модель является только компонентом такого сложного артефакта, которым является цифровой двойник.

Архитектура и компоненты цифрового двойника

Несмотря на различия в общих понятиях цифрового двойника во многих работах присутствуют схожие наборы компонентов ЦД, поэтому более подробное изучение ЦД возможно с позиции исследования его составляющих частей, их функций и способов взаимодействия друг с другом. Кроме этого, важно определить ключевые характеристики ЦД, которые дополняют его описание через компоненты информацией о ключевых функциях.

В исходном исследовании Майкл Гривс обобщенно выделяет 3 группы компонентов цифрового двойника: физический продукт в реальной среде, виртуальный продукт в виртуальной среде и набор соединений для обмена данными и информацией между физической и виртуальной версиями продукта [6]. При этом основной фокус в статье делается на моделировании физических свойств продукта с целью его производства или поддержки производства, а не для моделирования производственной системы или процессов, как это происходит в имитационных моделях этого домена. Более поздние научные работы, использующие технологии и концепции из областей имитационного моделирования, Интернета Вещей, Кибер-физических систем и других начинают раскрывать понятие цифрового двойника с точки зрения моделирования процессов, частей предприятия, иных сущностей и систем.

В «Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions» выделяются две группы компонентов цифрового двойника [21]: элементарные компоненты (физический объект, цифровой объект, обмен информации между физическим и цифровым объектами); императивные компоненты, которые делают цифровой двойник уникальным для определенного домена или предприятия (устройства интернета вещей, данные, системы машинного обучения, системы обеспечения безопасности данных, метрики оценки эффективности ЦД). Авторы статьи также определяют следующие ключевые характеристики цифрового двойника: *саморазвитие / эволюционирование системы – возможность обновляться в реальном времени в зависимости от поступающих данных о реальной системе*; зависимость от домена – наличие или преобладание в системе функционала, необходимого только в конкретном бизнес-домене; автономность – возможность автономно влиять на реальный объект без или с частичным контролем со стороны человека; синхронизация данных, а именно частота их сбора, сохранения и обновления. Авторами делается вывод, что при наличии всех компонентов и характеристик любая физическая сущность может иметь цифровой двойник.

В обзорном исследовании «Characterizing the Digital Twin: A systematic literature review» по итогу анализа 92 научных работ выделяются 13 характеристик цифрового двойника (физическая и виртуальная сущность/двойник, физическое и виртуальное окружение, состояние, реализация, метрология, обновление состояния двойника, частота обновления состояния двойника, подключение физического к виртуальному, подключение виртуального к физическому, физические процессы, виртуальные процессы), которые отделяют его от таких ранее появившихся технологий как информационная модель здания (BIM), компьютерно-интегрированное производство (CIM), виртуальные производственные системы (VMS), управление с прогнозирующими моделями (MBPC) и продвинутые системы контроля (ACS) [22].

В обзоре «Digital twins: An analysis framework and open issues» выделяются другие 4 группы компонентов цифрового двойника с точки зрения функциональных возможностей: цифровые подключения (состояние физической сущности, системы коммуникации, методы обработки данных о состоянии, создание двойника, протоколы и стандарты); цифровое представление (модель данных, операционное хранилище данных, временные характеристики, мастер данные, модели физических сущностей); инструментальные возможности (методы аналитики, симуляция определенного типа

модели, представление результатов); функциональный результат (интерфейс пользователя, результаты работы цифрового двойника, конфигурация и контроль) [23]. Авторы статьи предлагают использовать данную методологию разделения функциональных компонентов на 4 группы при описании конкретных реализаций цифровых двойников на предприятии, так как она позволяет описать большую часть функциональных возможностей цифрового двойника. Реализация необходимых функций цифровой модели объекта становится, по мнению авторов статьи, почти полноценным цифровым двойником объекта при добавлении возможностей по обновлению данных в реальном времени, влиянию на сам объект и недостающих компонентов. Однако, некорректность этого определения состоит в том, что цифровая модель основана на данных и фиксирует только данные и временные характеристики реальной системы, но не воспроизводит поведение и функционирование реальной системы

Большинство исследователей сходятся в понимании того, что цифровой двойник требует построения и применения достаточно точных, реалистичных и детализированных моделей реальности, однако свойства таких моделей не уточняются в большинстве источников. Авторы отдельных работ отмечают, что очень реалистичные виртуальные модели пытаются копировать физическое поведение, свойства и характеристики для моделирования поведения и текущего состояния физического пространства [24, 25]; другие авторы предлагают концепцию «живой модели» [26], концепцию «динамической модели» [27], то есть модели, которая постоянно адаптируется и изменяется в окружающей среде. Таким образом, *цифровая модель должна развиваться синхронно с реальной системой на протяжении всего ее жизненного цикла, изменяя свою конфигурацию и адаптироваться к текущей ситуации.*

Типология различных моделей, приведенная в многочисленной научной литературе (управляемые данными модели, информационные модели, динамические модели и т.п.), размывает базовую концепцию и парадигму цифрового двойника.

Приведенный выше анализ позволяет обобщить требования к *цифровой модели, детально воспроизводящей структуру, поведение, состояния и характеристики процесса функционирования реальной физической системы на всем жизненном цикле ее существования, в динамике, как развивающегося процесса, обогащающейся данными и трансформирующейся вместе с изменениями, происходящими на реальной системе, и способной проигрывать возможные сценарии по управлению изменениями на реальной системе с целью выработки в реальном времени управляющих воздействий на объект анализа и управления.* Не вызывает сомнения, что такая цифровая модель по своей природе является имитационной, т.е. воспроизводящей описание состояний системы в динамике, кроме того обладающей высокими анимационными возможностями, позволяющими визуализировать поведение и функционирование реальной системы и моделируемых сценариев; имеющей информационную природу, обеспечивающую развитый обмен входной и выходной информацией и знаниями между физической системой и ее модельным аналогом. Чтобы отвечать таким требованиям, технологии имитационного моделирования должны выйти на новый виток своего технологического развития. *Цифровая модель должна быть саморазвивающейся, легко адаптируемой на основе данных, поддерживать развитую аналитику реального времени.*

Практическое применение и создание цифровых двойников сдерживается отсутствием сложившихся подходов и фреймворков для архитектурного дизайна, так как очевидно, что такой сложнейший артефакт является результатом по созданию цифровой платформы или информационной системы большого масштаба, иногда

масштаба всего промышленного предприятия, или, например, сетевой формы организации, какими являются современные интегрированные цепи поставок в условиях цифровой трансформации и создания сетевых цепочек ценностей [1]. Для реализации прикладных решений и проектов недостаточно описания основных компонентов ЦД; как и в любой информационной системе компоненты образуют определенную архитектуру системы, которая во многом определяет процессы ее создания. Для уточнения архитектуры цифрового двойника и взаимосвязи базовых компонентов ЦД необходимо обратиться к анализу научных публикаций и стандартов в этой области.

Общая и стандартная архитектура цифрового двойника была впервые построена в работе «Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication» и представляет собой *физическое пространство, виртуальное пространство и связь между ними* [6]. Использование определенного шаблона архитектуры или стандартов цифровых двойников повышает вероятность успешного внедрения системы. Базовый вариант архитектуры включает в себя компоненты и взаимосвязи между ними, а также может указывать на связи с другими системами в цифровом ландшафте предприятия. Существуют различные понимания архитектур DT среди исследователей, авторы предлагают многоуровневые архитектуры, каждый уровень которых характеризуется некоторыми компонентами DT. Так в научной работе [28] предложены 5 основных элементов архитектуры цифрового двойника: физическая сущность, виртуальная сущность, обслуживающие сервисы, данные ЦД и подключения между ними, образующие *двунаправленную связь*.

В работе «Digital twin paradigm: A systematic literature review» авторы предлагают архитектуру цифрового двойника, состоящую из 3 слоев: физический слой для сбора данных с датчиков и устройств; коммуникационный слой для соединения физического объекта с виртуальным за счет обмена данными; вычислительный слой, состоящий из виртуальных моделей, которые и формируют цифровой двойник [8].

Аналогичную модель предлагают в работе «A Four-Layer Architecture Pattern for Constructing and Managing Digital Twins» [29] с 4 слоями: слой поставщиков информации (Information Providers layer) – включает все источники исходной информации; слой поставщиков модели (Model Providers layer) – отвечает за сбор и обработку информации перед передачей в цифровые двойники; слой цифровых двойников (Digital Twin Providers layer) – набор используемых цифровых двойников в выбранной области; слой приложений (Applications layer) – различные приложения для просмотра и анализа данных или применения команд, полученных от цифровых двойников.

В более позднем исследовании «A Six-Layer Architecture for Digital Twins with Aggregation» [30] представлена модель архитектуры из 6 слоев: слой оборудования и сенсоров, слой источников данных, слой локальных хранилищ данных, слой интернета вещей, слой облачных хранилищ данных, слой визуализаций и симуляций. Кроме этого, описываются методы интеграции нескольких цифровых двойников с учетом предложенной модели архитектуры и взаимосвязи слоев архитектуры различных ЦД между собой.

Практические подходы к построению цифровых двойников с определенной архитектурой и новые модели общей архитектуры цифрового двойника также были предложены в отраслевых стандартах. Например, во втором разделе стандарта ISO 23247 «Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 2: Reference architecture» была также представлена референтная архитектура цифрового двойника [31] с некоторыми отличиями от приведенных выше архитектур в научных публикациях.

В исследовании «Application status and prospects of digital twin technology in distribution grid» создан цифровой двойник электрической распределительной с 5-уровневой моделью архитектуры цифрового двойника [32]: уровень физической сети – физические устройства и системы распределения нагрузки электрической сети; уровень сенсоров данных – сенсоры, датчики и преобразователи для сбора данных о состоянии оборудования; уровень передачи данных – проводная и беспроводная сеть по передаче данных от уровня сенсоров к виртуальной модели; виртуальный слой – виртуальные модели (мониторинг текущего статуса, диагностика неисправностей, предсказательные модели) и цифровые двойники отдельных систем в электрической сети; уровень прикладных приложений – внешние приложения и системы, используемые сотрудниками для просмотра состояния цифровых двойников и принятия решений.

В обзоре исследований о применении цифровых двойников в нефтегазовой отрасли была использована архитектура ЦД от компании Deloitte, которая включает в себя 5 компонентов (приводы, сенсоры, системы интеграции, данные, системы аналитики) и 6-шаговый процесс работы с данными (действие, создание, коммуникация, агрегация, аналитика, понимание) [33].

Таким образом, анализ публикаций по рассмотрению базовой архитектуры цифрового двойника показывает, что авторами были предприняты попытки формирования универсальной архитектуры цифрового двойника, но наблюдаются различные подходы к ее описанию и формированию.

В рассмотренных фреймворках архитектуры DT всегда выделяется виртуальный слой для представления цифровой модели объекта или системы, роль которой чаще всего и выполняет имитационная модель. Как правило, цифровой двойник системы включает и использует различные данные, источниками которых могут быть: данные о пользователях из CRM, платформы электронной коммерции, сетевых платформ, чтобы понять предпочтения и поведение клиентов; данные о продуктах из компьютерных систем предприятия (CAD/CAM, CAE, PDM); данные управления из производственных информационных систем (MES, SCM, ERP и т.д.); данные производственного оборудования, оснащенных датчиками, исполнительными механизмами, системами слежения, сенсорными сетями RFID и многими другими компонентами, принадлежащие физическому уровню.

Эти данные передаются в реальном времени для синхронизации виртуального двойника с соответствующим физическим двойником с возможностью обнаружения аномалий, предсказания, выдачи предписаний и оптимизации. Очевидно, что имитационная модель реальной физической системы должна быть основана на постоянном обновлении данных, чтобы наглядно демонстрировать поведение реальной системы. Имитационная модель, таким образом, встраивается в ландшафт цифровой системы, объединяясь с системами мониторинга состояния объекта, сбора и анализа данных, поступающими в реальном времени в модель во время ее обновления с применением развитых средств аналитики данных.

Для анализа такого объема данных требуется аналитика больших данных и интеллектуальные методы анализа данных (которые достаточно хорошо представлены в соответствующей научной литературе и не являются темой настоящей статьи). В целом это говорит о развитии направлений, связанных с интеллектуализацией технологии цифровых двойников. Перспективным является объединение технологий цифровых двойников и мультиагентных систем, которые предоставляют аналитику реального времени и позволяют совершенствовать процедуры выработки сложных управленческих решений в сетевых формах организаций [2].

Выводы

В данной статье был представлен анализ научной литературы и рассмотрены концепция, архитектура, компоненты и базовые характеристики цифрового двойника. По результатам исследования выявлены существующие различия в теоретических подходах к определению ЦД, описанию его архитектуры и компонентов. Проведенный анализ позволил уточнить понятие ЦД, роль, назначение и базовые свойства наиболее существенной компоненты цифрового двойника - динамической имитационной модели объекта, процесса или системы.

Преодоленные несоответствия в определении, содержании концепции и анализе компонентов архитектуры цифрового двойника, уточнении свойств цифровой модели помогут преодолевать разрыв между теорией и практикой внедрения цифровых двойников в различных отраслевых сегментах и проектах цифровой трансформации предприятий. Проведенный анализ позволяет обобщить требования к цифровой модели, как центрального элемента архитектуры цифрового двойника, детально воспроизводящей структуру, поведение, состояния и характеристики процесса функционирования реальной физической системы на всем жизненном цикле ее существования, в динамике, как развивающегося процесса, обогащающейся данными и трансформирующейся вместе с изменениями, происходящими на реальной системе, и способной проигрывать возможные сценарии по управлению изменениями на реальной системе с целью выработки в реальном времени управляющих воздействий на объект анализа и управления. Цифровая модель по своей природе является имитационной, т.е. воспроизводящей описание состояний системы в динамике, кроме того обладающей высокими анимационными возможностями, позволяющими визуализировать поведение и функционирование реальной системы и моделируемых сценариев; имеющей информационную природу, обеспечивающую развитый обмен входной и выходной информацией и знаниями между физической системой и ее модельным аналогом. Чтобы отвечать таким требованиям, технологии имитационного моделирования должны выйти на новый виток своего технологического развития. Цифровая модель должна быть саморазвивающейся, легко адаптируемой на основе данных, поддерживать развитую аналитику реального времени.

Литература

1. Дыбская В.В., Сергеев В.И., Лычкина и др. Цифровые технологии в логистике и управлении цепями поставок / под общ. ред.: В.И. Сергеев; М.: Издательский дом НИУ ВШЭ, 2020. 190 с.
2. Лычкина Н.Н. Применение методов и технологий искусственного интеллекта в цифровых цепях поставок // Логистика и управление цепями поставок. 2020. №. 4. С. 23–29.
3. Panetto H. et al. Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future // Annual Reviews in Control. 2019. Т. 47. С. 200–213.
4. Dassisti M. et al. An approach to support Industry 4.0 adoption in SMEs using a core-metamodel // Annual Reviews in control. 2019. Т. 47. С. 266–274.
5. Saaksvuori A., Immonen A. Product lifecycle management. Springer Science & Business Media, 2008.
6. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. Т. 1, №2014. С. 1–7.
7. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches. 2017. С. 85–113.
8. Semeraro C. et al. Digital twin paradigm: A systematic literature review // Computers in Industry. 2021. Т. 130. С. 103469.

9. Greif T., Stein N., Flath C.M. Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics // *Computers in Industry*. 2020. Т. 121. С. 103264.
10. Purcell W., Neubauer T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review // *Smart Agricultural Technology*. 2022. С. 100094.
11. Trauer J. et al. What is a digital twin? – definitions and insights from an industrial case study in technical product development // *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. Cambridge University Press, 2020. Т. 1. С. 757–766.
12. Van Der Valk H. et al. Supply Chains in the Era of Digital Twins: a Review // *Procedia Computer Science*. 2022. Т. 204. С. 156–163.
13. Melesse T.Y., Di Pasquale V., Riemma S. Digital twin models in industrial operations: A systematic literature review // *Procedia Manufacturing*. 2020. Т. 42. С. 267–272.
14. VanDerHorn E., Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation // *Decision support systems*. 2021. Т. 145. С. 113524.
15. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles // *53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2012. С. 1–14.
16. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). URL: <https://sebokwiki.org/wiki/> (Дата обращения: 02.10.2023).
17. Stark R. et al. CIRP Encyclopedia of Production Engineering // *The International Academy for Production Engineering*. 2019. С. 1–8.
18. Juarez M.G., Botti V.J., Giret A.S. Digital twins: Review and challenges // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2021. Т. 21. №3.
19. Haag S., Anderl R. Digital twin–Proof of concept // *Manufacturing letters*. 2018. Т. 15. С. 64–66.
20. Leng J. et al. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop // *Journal of ambient intelligence and humanized computing*. 2019. Т. 10. С. 1155–1166.
21. Sharma A. et al. Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions // *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. С. 100383.
22. Jones D. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Т. 29. С. 36–52.
23. Boyes H., Watson T. Digital twins: An analysis framework and open issues // *Computers in Industry*. 2022. Т. 143. С. 103763.
24. Rosen R. et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // *Ifac-papersonline*. 2015. Т. 48, №3. С. 567–572.
25. Bao J. et al. The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing // *Enterprise Information Systems*. 2019. Т. 13, №4. С. 534–556.
26. Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin // *AIP conference proceedings*. AIP Publishing, 2018. Т. 1949, №1.
27. Zhuang C., Liu J., Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor // *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2018. Т. 96. С. 1149–1163.
28. Tao F. et al. Digital twin in industry: State-of-the-art // *IEEE Transactions on industrial informatics*. 2018. Т. 15, №4. С. 2405–2415.
29. Malakuti S. et al. A four-layer architecture pattern for constructing and managing digital twins // *Software Architecture: 13th European Conference, ECSA 2019, Paris, France, September 9–13, 2019, Proceedings 13*. Springer International Publishing, 2019. С. 231–246.
30. Redelinghuys A.J.H., Kruger K., Basson A. A six-layer architecture for digital twins with aggregation // *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems*

for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA 2019 9. Springer International Publishing, 2020. С. 171–182.

31. ISO 23247-2:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 2: Reference architecture. URL: <https://www.iso.org/standard/78743.html> (Дата обращения: 02.10.23)

32. Zhaoyun Z., Linjun L. Application status and prospects of digital twin technology in distribution grid // Energy Reports. 2022. Т. 8. С. 14170–14182.

33. Wanasinghe T.R. et al. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges // IEEE access. 2020. Т. 8. С. 104175–104197.