УДК: 004.62:004.94+004.8

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ОСНОВА ПАРАДИГМЫ РАЗВИТИЯ ПРИКЛАДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Бурый А.С., д-р техн. наук, директор департамента, ФГБУ «Институт стандартизации»

Предложен концептуальный подход к формированию требований к цифровым двойникам, которые рассматриваются как дальнейшее развитие киберфизических систем. Основной потенциал исследований направлен на выявление интегральных свойств при комплексировании технологий цифровых двойников с многоагентным подходом, а также на структуризацию распределенных систем разнотипных данных и развитие гипотезы относительно симбиотических явлений взаимодействующих потоков данных, циркулирующих в информационной среде цифровых двойников. Основываясь на терминологическом и концептуальном обсуждении цифровых двойников и пространств данных, утверждается необходимость применения системного подхода к построению цифровых двойников.

Методологической основой исследования являются системный подход, концептуально-логическое моделирование, методы научной прогностики.

*Целью данной статьи является исследование существующей научной и методической базы при разработке концепции когнитивных цифровых двойников, основанных на интеграции разнотипных данных, составляющих суть киберфизического пространства данных и опреде**ляющих парадигму современных прикладных информационных систем.***

Ключевые слова: информационная система, когнитивный цифровой двойник, цифровая трансформация, искусственный интеллект, симбиоз данных, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Слияние технологий искусственного интеллекта (ИИ), облачных вычислений [1], больших данных и Интернета вещей определяет в настоящее время вектор развития цифровой трансформации общества. При этом «тон задают» цифровые технологии, составляющие основу межмашинных взаимосвязей (M2M), беспроводных сенсорных сетей (WSN) и облачных вычислений, обеспечивающие соединение кибернетического мира (вычислительных ресурсов) с физическим, формируя киберфизические системы (КФС) [2–4] в масштабе предприятия [5] или, например, в масштабе отраслевых информационных технологий умного города [6, 7]. В перспективе, КФС могут найти применение в государственных информационных системах предоставления услуг (справочных, образовательных, медицинских и других) [3, 8].

Дальнейшим развитием КФС можно считать создание цифровых двойников, которые принято отождествлять с проекцией физического мира на кибернетическую или вычислительную среду [2, 9]. Цифровые двойники являются уникальным средством для достижения киберфизической интеграции, позволяющей осуществлять постоянный мониторинг, диагностику, прогнозирование и оптимизацию наблюдаемого процесса (объекта) [9]. Цифровые двойники (ЦД) являются важнейшим трендом процесса цифровизации, развития современной индустрии, а в ряде стран ЦД включены в число целевых технологий оборонного и космического направления. Фактически ЦД представляет собой платформу эмуляции программного и аппаратного обеспечения, управляемую данными, и разрабатываемую с учетом тесного информационного взаимодействия существующих технологий цифровой трансформации [10, 11].

Причиной цифрового ажиотажа является появление науки о данных, доступность дешевых вычислительных ресурсов и хранилищ данных, питательной средой для которых выступают разнотипные данные. Технология цифровых двойников позволяет объединять всю информацию об объекте и обеспечивать обмен данными между различными платформами.

Целью данной статьи является исследование существующей научной и методической базы при разработке концепции когнитивных цифровых двойников, основанных на инте-

грации разнотипных данных, составляющих суть киберфизического пространства данных и определяющих парадигму современных прикладных информационных систем.

СУЩНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Цифровой двойник (digital twins) – это виртуальное представление объекта или системы, которое охватывает весь его жизненный цикл, обновляется на основе данных в реальном времени и использует моделирование, машинное обучение и рассуждения для поддержки принятия решений.

Консалтинговая компания ***Gartner*** ежегодно исследует рынки информационных технологий, выявляет тенденции и делает прогноз на предстоящий год. Так на 2023 г. в TOP 10 таких технологий, наряду с развитием аналитики данных, отраслевых облачных платформ, устойчивых информационных технологий, включены цифровые двойники[1].

В узком смысле ЦД – это совокупность разнородной информации, которая описывает потенциальное или фактические объекты (физического мира) различного масштаба – от микромира (атомные структуры) до макро-. Определенно это система взаимосвязей различных данных об объекте (изделии) – видео, тексты (описания, характеристики, поведение), действия (активности) и т. д. В последнее время это получило название цифровой тени (digital shadow).

Определение 1. Цифровая тень обеспечивает высокоточное представление физических процессов с целью создания картины в реальном времени на основе соответствующих данных о процессе (объекте) [12].

Цифровые тени не обладают двунаправленными каналами передачи данных и для них не свойственна (не считается обязательной) внутренняя обработка данных. К достоинствам двойников этого типа можно отнести способность предсказывать поведение реального объекта, сбор данных о котором осуществлялся с определенной целью [13].

В широком смысле цифровой двойник – это интегрированная система, которая способна моделировать, отслеживать, вычислять, регулировать или контролировать состояние или технологический процесс. Отображение виртуальной реальности строится на основе интеллектуального управления данными в ходе их сбора, передачи и анализа.

Концептуально ЦД в широком смысле является разновидностью КФС, они оба реализуют объединение виртуального и физического пространства. Однако система цифровых двойников больше фокусируется на переработке данных и сверхточных моделях, что является ее важной особенностью, определяющей перспективность развития и применения ЦД. В будущем многие из существующих систем контроля и сбора данных, например, SCADA, систем управления жизненным циклом изделия (PLM – Product Lifecycle Management), а также приложений для системного проектирования, например, на основе моделей (MBSE – ***Model Based Systems Engineering***) могут быть разработаны по новому шаблону с ЦД в качестве ядра. По сути, цифровые двойники уже сегодня можно заявлять, как новую парадигму прикладных информационных систем ближайшего будущего.

Различные подходы к осмыслению формулировок термина «цифровой двойник» с учетом данных международной организации по стандартизации (ISO) представлены в табл. 1[2]. Объединяющим фактором представленных определений выступают данные, под которыми принято понимать «интерпретируемое формализованным способом представление информации, пригодное для передачи, интерпретации или обработки» (см. ГОСТ Р 56692–2015, п. 3.3). Данные о состоянии наблюдаемых объектов физического пространства собираются, транслируются, а потом перерабатываются и анализируются в вычислительной среде (виртуальное пространство), где осуществляется машинное моделирование наблюдаемого объекта и подготовка к принятию решений, по результатам которого формируются новые данные для управления, представления, регистрации и т. д. в соответствии с заданной технологией. Именно данные фигурируют в определениях 4–6 и 8 (см. табл. 1) и выступают центральным элементом в представлении понятия цифровой двойник.

Общее в большинстве определений это интеграция различных источников данных, которая позволяет получить цифровое представление о физическом объекте путем сбора, моделирования и анализа данных, а за тем – подготовки принятия решений.

Таблица 1

Дефиниции цифрового двойника

№	СУЩНОСТЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА (ЦД)	ИСТОЧНИКИ
1	Это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями	ГОСТ Р 57700.37–2021[3], п. 3.24

[1] Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends of 2023 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sourcefuse.com/blog/gartners-top-10-strategic-technology-trends-of-2023/ (дата обращения: 29.11.2022).

[2] Читатели могут самостоятельно ознакомится с принятыми определениями «цифровых двойников» в ИСО на онлайн-платформе по ссылке: https://www.iso.org/obp/ui#search

[3] ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. (Введ. с 2021-01-01).

№	СУЩНОСТЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА (ЦД)	ИСТОЧНИКИ
2	Это цифровая копия физических активов, процессов и систем, которые могут использоваться для различных целей, или подходящее по назначению цифровое представление чего-либо вне его собственного контекста с подключениями к данным, которые обеспечивают конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью синхронизации	ISO 23704–1: 2022, п. 3.1.14
3	Это технология, процесс проектирования, в основе которого лежит разработка и применение семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных с высоким уровнем адекватности	А.Н. Прохоров, М.Н. Лысачев [9]
4	Это виртуальное представление объекта или системы, которое охватывает весь его жизненный цикл, обновляется на основе данных в реальном времени и использует моделирование, машинное обучение и рассуждения для помощи в принятии решений	Сайт: IBM.com
5	Это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними	F.Tao и др. [14]
6	Это виртуальный прототип реального городского объекта или процесса, суть которого заключается в непрерывном сборе данных, стандартизации данных и отношений элементов, их визуализации и комплексном анализе	Приказ Минстроя России[4] от 25.12.2020 № 866/пр
7	Это программно-аппаратный комплекс, реализующий комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы	ПНСТ 429–2020[5], п. 3.2.3
8	Пространство ЦД – пространственная / логическая / функциональная область, которая предоставляет функции управления ЦД, включая визуализацию, презентацию, синхронизацию, архивирование исторических данных, аналитику данных, моделирование и оптимизацию	ISO 23247–2: 2021, п. 3.4

Приведенные в табл. 1 определения показывают множественность частных взглядов на ЦД, основываясь на которые сформулируем следующее: Определение *2*. Цифровой двойник – информационно-кибернетический объект виртуальной архитектуры, соответствующий физическому объекту и объединяющий цифровые потоки данных о состоянии физического объекта для их синхронизации, хранения, обработки, анализа, а также выработки управления объектом в процессе всего жизненного цикла.

Концепция цифрового двойника позволяет использовать данные, описывающие конфигурацию, поведение, состояние и исправность изделия, включая традиционные данные (спецификации изделий, материалов, чертежи), а также новые типы данных: значения состояний объектов наблюдений, генерируемые датчиками, пакеты данных, генерируемые беспроводными устройствами. Этот новый тип информации называется инсайтом. Сбор данных может осуществляться на стадии проектирования, а затем использоваться в процессе всего жизненного цикла изделия, тем самым создавая условия для возможной корректировки моделей будущей продукции.

Таким образом, ЦД является не только моделью физических активов (объектов, процессов, систем), но и может автономно развиваться с помощью моделирования, чтобы понимать окружающий мир, обучаться, рассуждать и отвечать на вопросы «что, если?».

Именно для этого, дальнейшим развитием цифровых двойников стала концепция когнитивных цифровых двойников (КЦД) [9], которые дополнены семантическими возможностями для отслеживания динамики эволюции виртуальной модели, для выявления взаимосвязей между виртуальными моделями и для улучшения процесса принятия решений [15], основываясь на модели знаний и возможности когнитивного моделирования. Это могут быть, например, интеллектуальное управление обслуживанием объектов, динамическое распознавание сложного и непредсказуемого поведения, оптимизация производительности, а также ряд решаемых оперативных задач: выборочный мониторинг, устранение внезапных отказов и возникающих критических ситуаций.

[4] Приказ Минстроя России от 25.12.2020 № 866/пр «Об утверждении Концепции проекта цифровизации городского хозяйства «Умный город».

[5] ПНСТ 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения (срок дейст. с 2021-01-01 до 2024-01-01).

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Активизация имитационного моделирования пришлась на 70–80-е годы, в период которых были разработаны и активно использовались десятки языков имитационного моделирования (ИМ), например, GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT, исследователи получили возможность изучать большой набор динамических процессов, генерировать недостающие исходные данные, используя вероятностные модели потоков событий, характерных для процессов функционирования и обслуживания технических объектов[6], сценариев поведения, достаточно точно воспроизводящих реальную обстановку [16].

Что сближает ИМ и цифровые двойники? Это то, что в основе тех и других – используются цифровые модели для воспроизведения различных системных процессов. Однако цифровой двойник на самом деле представляет собой виртуальную среду, что значительно повышает ее потенциал. Разница между цифровым двойником и ИМ в основном заключается в масштабе исследований, числе контролируемых процессов и объектов. Имитационная модель обычно изучает один конкретный процесс, а цифровой двойник может сам запускать любое количество полезных ИМ, включая подобные цифровые двойники, для изучения нескольких процессов.

Если ИМ обычно не выигрывают от наличия данных в реальном времени, то ЦД созданы для двусторонних потоков данных: от датчиков объекта к системному процессору и в обратном направлении, когда управляющие воздействия передаются исходному объекту-источнику данных.

К типам физических объектов (систем), управление которыми действительно выигрывает от использования цифровых моделей, можно отнести:

- сложные инженерные сооружения (здания, мосты и другие);
- сложные объекты (проекты) машиностроения – реактивные турбины, автомобили, авиационные и космические аппараты, цифровые двойники которых нацелены на повышение эффективности сложных механизмов;
- энергетическое оборудование, объекты и сооружения, связанные с производством и передачей энергии;
- производственные процессы и технологии, цифровые двойники которых позволяют оптимизировать эффективность процессов, воссоздавая условия совместного функционирования машин и систем.

Таким образом, отрасли, которые достигают наибольшего успеха с ЦД, связаны с крупномасштабными продуктами или проектами. Это в первую очередь:

- инженерные сооружения;
- автомобилестроение;
- самолетостроение;
- многоэтажное строительство зданий;
- производство;
- энергетика.

Для структурирования собранных данных и идентификации объектов может применяться семантическое моделирование цифровых двойников [17], когда, например, для ЦД транспортного средства одновременно с данными об автомобиле (техническое состояние его систем) используется информация о состоянии дороги, погодных условиях, трафике, ремонтных работах и другая.

По существу, концепция организации моделирования в информационных системах на основе цифровых двойников составляет первое направление рассматриваемой парадигмы ЦД. Моделирование рассматривается как основной процесс сопровождения всего жизненного цикла изделия от проектирования, производства, применения по назначению, обслуживания и, наконец, до утилизации.

Рассматривая данное направление парадигмы ЦД с позиции формальной логики системного подхода, основными направлениями развития ЦД следует считать:

1. Способность к рациональной переработке разнотипной (по форматам, назначению и т. д.) информации, включая ее комплексирование, интерпретацию и анализ.
2. Сочетание методов декомпозиции и агрегирования при формировании структуры ЦД.
3. Реализация свойств устойчивости, адаптации и безопасности при разработке аппаратных и программных средств в составе ЦД.
4. Разработка и применение современных платформ интеграции данных, включая консолидацию, виртуализацию, репликацию.

Следующее – ***второе*** направление парадигмы цифрового двойника – это полная ориентация на данные, качество и разнообразие которых определяет эффективность ЦД. Модели на основе данных составляют суть ЦД, особенно операционного и предиктивного типа [10].

С точки зрения науки о данных, цифровой двойник можно рассматривать как систему фильтрации и интеграции информации. С одной стороны, функции ЦД позволяют фильтровать огромное количество данных в направлении от объекта, которая может быть непосредственно запрошена для операций проектирования, диагностирования или управления. С другой стороны, функции ЦД позволяют интегрировать

[6] Бурый А.С. Введение в теорию синтеза отказоустойчивых многозвенных систем переработки навигационно-баллистической информации. – М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 1999. (С. 275).

различные типы данных для обнаружения скрытых закономерностей и перекрестной проверки результатов анализа.

На рисунке показан пример концептуального проектирования целевых функций цифрового двойника на основе многоагентных моделей в среде ЦД. Для этого выбираются наиболее существенные свойства когнитивных агентов и распределяются функции, выполнение которых будет обеспечено на счет указанных качеств (свойств) [3, 18].

Применительно к физическому пространству выделяются свойства данных (см. рисунок) и функции, выполняемые ЦД по переработке данных. При этом намечаются функции, которые являются трудноразрешимыми для каждой из сторон в отдельности. Это моделирование и прогнозирование альтернативных сценариев по управлению, обслуживанию объектом; многофакторная оптимизация и координация и другие задачи, решение которых и оптимальная эффективность может быть обеспечена за счет синергетики рассматриваемых сторон.

Предположим агент «проводит анализ – что, если…», выбирает метод обработки, требуемый данные, намечает сценарий действий для достижения поставленной цели. После этого в работу включается ЦД, его цифровая модель и обеспечивается выработка управляющих команд для объекта управления, по итогам которых снова контролируется состояние объекта. При этом варианты управляющих воздействий целесообразно также проверять на модели для достижения заданного уровня эффективности.

ЭФФЕКТЫ СИМБИОЗА ДАННЫХ

Развитие симбиотического взаимодействия в контексте понимания процессов обмена знаниями между участниками промышленного производства уже давно приобрели устойчивый характер и направлены на получение экономических, экологических и других эффектов, связанных с задачами устойчивого развития экономики [5].

Желание добиться от разрабатываемого изделия многофункциональности в большинстве случаев, когда логика проектирования основывается на комплексировании различного функционала, строится на аддитивном принципе. При этом не учитываются возможные синергетические эффекты.

Проведенный анализ задач, решаемых на основе цифровых двойников, показал многообразие данных, привлекаемых технологий и цифровых приложений и необходимость в большинстве задач использовать практически полный спектр технологических возможностей, развивающихся в рамках цифровой трансформации (ЦТ) общества.

Следует отметить, что основным методом всестороннего исследования любой технологической предметной области является системный подход, позволяющий выявлять закономерности и взаимосвязи проектируемых объектов, базируясь на иерархии построения, структурности связей, множественности модельного представления и других факторов с целью повышения эффективности функционирования (целевого применения) [2, 3, 6].

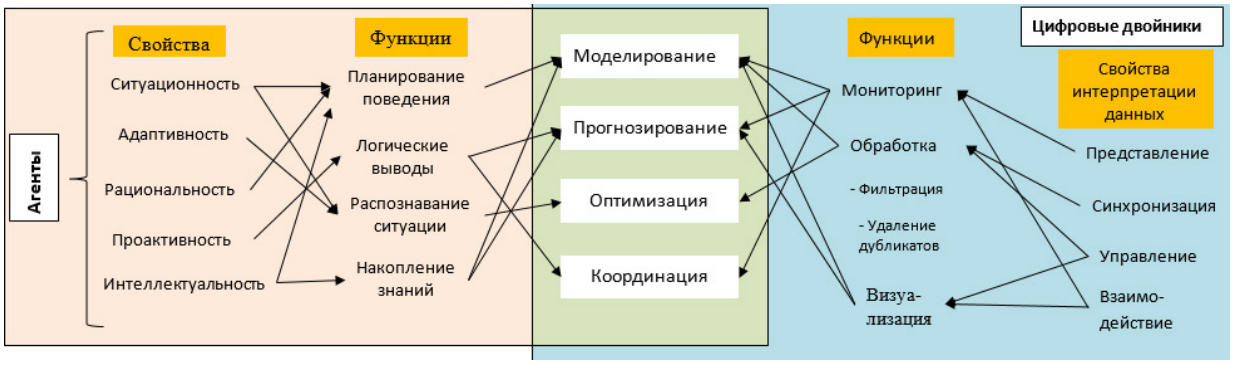

Рисунок. Синергетическое использование агентов и возможностей ЦД:
Источник: составлено с учетом [18].

В ходе проектирования ЦД, за счет практически уникальности каждой информационной системы, в состав которой вводится ЦД, предстоит получить ответ на следующие вопросы [10, 16, 19]:

- Какая концепция моделирования может быть реализована (это метамодель или встроенная числовая модель на уровне управляемого объекта)?
- Какой уровень детализации, точности и синхронизации, безопасности в отношении свойств управляемого физического объекта (актива) должен обеспечивать ЦД?
- Как повлияют на эффективности информационной системы в целом система цифровых двойников?

Ключевые технологии трансформации данных в составе цифровых двойников с учетом [20], а также методы и технологии, обеспечения и поддержки ключевых технологий представлены в табл. 2. В последней графе табл. 2 приведены основные технологии, составляющие основу ТЦ.

В табл. 2 выделено автономное моделирование (МА), включающее простые цифровые расчетные модели, а также высокоточное фундаментальное моделирование с возможностями реализации в облачных приложениях (М/ОС).

При всем том, что данные являются основным драйвером для ЦД, определяющим в формировании структуры цифровых двойников, в выборе моделей и методов решения конкретных технических задач выступает системный подход [3, 6]. В частности, представление прикладных информационных систем в виде декомпозированного контура управления [3, 5] с возможностями фрактального расширения функционала для решения целевых задач конкретным проектируемым цифровым двойником, позволяет придать универсальный характер данному подходу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая долгую историю обсуждения концепции цифрового двойника и различные интересы вовлеченных организаций, кажется очевидным, что до сих пор не существует единого определения и понимания концепции цифрового двойника, что, вероятно, будет иметь место и в будущем. Однако активная метафоризация в этой области – появление устойчивых выражений, как «цифровые нити» (для передачи данных), «цифровые тени» (см. выше), «зеркало данных» и многие другие еще раз подтверждают мысль М. Блэка, что «возможно любая наука должна начинаться с метафоры и заканчиваться алгеброй … и, возможно, без метафоры не было бы алгебры»[7].

[7] Black M. Models and Metaphors: Studies in Language and Philosophy. Cornell University Press. 1962. (P. 242).

Таблица 2

Ключевые технологии цифровых двойников

ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСФОРМАЦИИ ДАННЫХ	МЕТОДЫ (ТЕХНОЛОГИИ) ПЕРЕРАБОТКИ ДАННЫХ	ЦТ
Сбор данных	Опрос датчиков, включая загрузки онлайн-источников и технической документации	ИВ
Хранение данных	унифицированное моделирование данных; управление базами данных; расширение пространства данных; интеграция данных; безопасность данных	МА ОС
Генерация данных	многомерное моделирование; проверка данных моделирования; высокоэффективное моделирование; модели управления	М/ОС МА
Ассоциация данных	пространственно-временное выравнивание данных; интеллектуальный анализ данных; обоснование знаний и представление знаний	ИАД ДР МО
Взаимодействие с данными	сбор данных о структуре и связях; уменьшение размерности; технологии промежуточной обработки данных; оценка согласованности данных	ИВ ВП
Обслуживание данных	инкапсуляция ресурсов; многоцелевая комбинированная оптимизация; визуализация данных на основе виртуальной и дополненной реальности и т. д.	М/ОС БД ДР МО
Эволюция данных	сложное сетевое моделирование; измерение информации; моделирование динамики распространения; технология извлечения правил	М/ОС МА БД ИАД
Интеграция разнородных данных	обнаружение аномалий; преобразование и детализация; объединение разнородных данных; механизмы отказоустойчивости; алгоритмы для объединения данных	М/ОС ИАД БД МА

Условные обозначения: ИВ – Интернет вещей; ОС – облачные сервисы; М – моделирование; МА – моделирование автономное; МО – машинное обучение;
ИАД – интеллектуальный анализ данных;
ВП – встроенные процессоры и накопители;
БД – большие данные; ДР – дополненная реальность

Ожидается, что цифровой двойник будет играть важную роль в проектировании, разработке и эксплуатации всех отраслей промышленности в будущем, предоставляя новые возможности, которые намного превосходят сегодняшний уровень управления жизненным циклом изделий. Представленные ключевые технологии цифрового двойника призваны ускорить цифровую трансформацию.

Направлениями дальнейшего развития концепции и технологии цифрового двойника должны быть связаны системным подходом, с развитием терминосистемы ЦД, для чего необходима активная разработка и применение системы стандартов для цифровых двойников, как основной гарантии качества производства и продвижения услуг.

Список использованных источников и литературы

1. Бурый А.С. Тенденции развития распределенных информационных систем на основе облачных технологий // Транспортное дело России. 2013. № 6. С. 160–162.
2. Балюк А.А., Финько О.А. Многоагентная аутентификация цифровых двойников в киберфизических системах // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 5(51). С. 100–113. https://doi.org/10.21681/2311-3456-2022-5-100-113
3. Бурый А.С., Ловцов Д.А. Информационные структуры умного города на основе киберфизических систем // Правовая информатика. 2022. № 4. С. 15–26. https://doi.org/ 10.21681/1994-1404-2022-4-15-26
4. Щекочихин О.В. Современные тенденции управления киберфизическими системами на основе цифровых двойников // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 5 (63). С. 33–37.
5. Аронов И.З., Бурый А.С., Рыбакова А.М. Умная экономика замкнутого цикла: основа цифровых стратегий производственных компаний. Часть 1. Технологическая синергия индустрии 4.0 // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 4(68). С. 54–63.
6. Бурый А.С., Ловцов Д.А. Перспективы стандартизации информационного пространства умного города // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 2(66). С. 4–11.
7. Евгеньев Р.А. Создание цифровых моделей устойчивых поселений // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 4(62). С. 45–51.
8. Бурый А. С. Совершенствование государственных информационных систем как тренд цифрового общества // Правовая информатика. 2020. № 3. С. 19–28. https://doi.org/10.21681/1994-1404-2020-3-19-28
9. Прохоров А.Н., Лысачев М.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с. ISBN 978-5-98094-008-9
10. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 2. Ключевые технологии цифровых двойников. Типы моделирования физического объекта // Автоматизация в промышленности. 2020. № 11. С. 3–10. https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.11.01
11. Semeraro C. et al. Digital twin paradigm: A systematic literature review // Computers in Industry. 2021. Т. 130. С. 103469.
12. van der Valk H., Haße H., Möller F., Otto B. Archetypes of digital twins // Business & Information Systems Engineering. 2021. С. 1–17. https://doi.org/10.1007/s12599- 021-00727-7
13. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An application framework of digital twin and its case study // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2019. Т. 10. № 3. С. 1141–1153.
14. Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2019. Т. 57. № 12. С. 3935–3953.
15. Jinzhi L. et al. Exploring the concept of Cognitive Digital Twin from model-based systems engineering perspective // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Т. 121. № 9–10. С. 5835–5854.
16. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Суррогатное моделирование распределенных информационных систем по большим данным // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2019. № 5 (51). С. 43–50.
17. Nwogu C. et al. Towards a Requirement-driven Digital Twin Architecture // Procedia CIRP. 2022. Т. 107. С. 758–763.
18. Mariani S., Picone M., Ricci A. About Digital Twins, agents, and multiagent systems: a cross-fertilisation journey //Autonomous Agents and Multiagent Systems. Best and Visionary Papers: AAMAS 2022 Workshops, Virtual Event, May 9–13, 2022. Revised Selected Papers. – Cham: Springer International Publishing. 2022. С. 114–129.
19. Usländer T. et al. Symbiotic Evolution of Digital Twin Systems and Dataspaces // Automation. 2022. Т. 3. № 3. С. 378–399.
20. Zhang M., Tao F., Huang B., et al. Digital twin data: methods and key technologies // Digitaltwin. 2021. Vol. 1. № 2.

DIGITAL TWINS AS THE BASIS OF THE DEVELOPMENT OF APPLIED INFORMATION SYSTEMS PARADIGM

Buryi A.S., Dr. Sc. (Technology), Department Director at the FSBI «RSI»

A conceptual approach to the formation of requirements for digital twins, which are considered as a further development of cyber-physical systems, is proposed. The main potential of the research is aimed at identifying integral properties in the integration of digital twins technologies with a multi-agent approach, as well as structuring distributed systems of different types of data and developing a hypothesis regarding symbiotic phenomena of interacting data flows that occur in the information environment of digital twins.

Based on the terminological and conceptual discussion of digital doubles and data spaces, the necessity of applying a systematic approach to the construction of digital doubles is argued.

The methodological basis of the research is a systematic approach, methods of scientific prognostics, conceptual and logical modeling.

The purpose of this article is to study the existing scientific and methodological basis for the development of the concept of cognitive digital twins based on the integration of different types of data that make up the essence of the cyber-physical data space and define the paradigm of modern applied information systems.

Keywords: information system, cognitive digital twin, digital transformation, artificial intelligence, data symbiosis, simulation modeling.

References

1. Buryj A.S. Tendencii razvitiya raspredelennyh informacionnyh sistem na osnove oblachnyh tekhnologij. Transportnoe delo Rossii, 2013, no. 6, pp. 160–162. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Balyuk A.A., Fin'ko O.A. Mnogoagentnaya autentifikaciya cifrovyh dvojnikov v ki-berfizicheskih sistemah. Voprosy kiber-bezopasnosti, 2022, no. 5(51), pp. 100–113. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.21681/2311-3456-2022-5-100-113
3. Buryi A.S., Lovtsov D.A. Informacionnye struktury umnogo goroda na osnove kiberfizicheskih system. Pravovaya informa-tika, 2022, no. 4, pp. 15–26. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.21681/1994-1404-2022-4-15-26
4. Shchekochihin O.V. Sovremennye tendencii upravleniya kiberfizicheskimi sistemami na osnove cifrovyh dvojnikov. In-formacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya, 2021, no. 5(63), pp. 33–37. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Aronov I.Z., Buryi A.S., Rybakova A.M. Umnaya ekonomika zamknutogo cikla: osnova cifrovyh strategij proizvodstvennyh kompanij. CHast' 1. Tekhnologicheskaya sinergiya industrii 4.0. Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya, 2022, no. 4(68), pp. 54–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Buryi A.S., Lovtsov D.A. Perspektivy standartizacii informacionnogo prostranstva umnogo goroda. Informacionno-eko-nomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya, 2022, no. 2(66), pp. 4–11. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Evgen'ev R.A. Sozdanie cifrovyh modelej ustojchivyh poselenij. Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya. 2021, no. 4(62), pp. 45–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Buryi A.S. Sovershenstvovanie gosudarstvennyh informacionnyh sistem kak trend cifrovogo obshchestva. Pravovaya in-formatika, 2020, no. 3, pp. 19–28. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.21681/1994-1404-2020-3-19-28
9. Prohorov A.N., Lysachev M.N. Cifrovoj dvojnik. Analiz, trendy, mirovoj opyt. Moscow: OOO «Al'yansPrint», 2020. 401 p. (In Russ.).
10. Dozortsev V.M. Cifrovye dvojniki v promyshlennosti: genezis, sostav, terminologiya, tekhnologii, platformy, perspektivy. CHast' 2. Klyuchevye tekhnologii cifrovyh dvojnikov. Tipy modelirovaniya fizicheskogo ob"ekta. Avtomatizaciya v pro-myshlennosti, 2020, no. 11, pp. 3–10. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.11.01

11. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: A systematic literature review. Computers in Industry, 2021, vol. 130, P. 103469.
12. Van der Valk H., Haße H., Möller F., Otto B. Archetypes of digital twins. Business & Information Systems Engineering, 2021, pp. 1–17. https://doi.org/10.1007/s12599- 021-00727-7
13. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An application framework of digital twin and its case study. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019. vol. 10, no. 3, pp. 1141–1153.
14. Tao F., et al. Digital twin-driven product design framework. International Journal of Production Research, 2019, vol. 57, no. 12, pp. 3935–3953.
15. Jinzhi L., et al. Exploring the concept of Cognitive Digital Twin from model-based systems engineering perspective. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, vol. 121, no. 9–10, pp. 5835–5854.
16. Buryi A.S., Shevkunov M.A. Surrogatnoe modelirovanie raspredelennyh informa-cionnyh sistem po bol'shim dannym. Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya, 2019, no. 5(51), pp. 43–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Nwogu C., Lugaresi G., Anagnostou A., Matta A., Taylor S.J. Towards a Requirement-driven Digital Twin Architecture. Procedia CIRP, 2022, 107, pp. 758–763.
18. Mariani S., Picone M., Ricci A. About Digital Twins, agents, and multiagent systems: a cross-fertilisation journey. In Autonomous Agents and Multiagent Systems. Best and Visionary Papers: AAMAS 2022. Workshops, Virtual Event, May 9–13, 2022, Revised Selected Papers (pp. 114–129). Cham: Springer International Publishing.
19. Usländer T., Baumann M., Boschert S., et al. Symbiotic Evolution of Digital Twin Systems and Dataspaces. Automation, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 378–399.
20. Zhang M., Tao F., Huang B., et al. Digital twin data: methods and key technologies. Digitaltwin, 2021, 1:2.