

Анализ тенденций развития цифровых двойников нового поколения

В.А. Сухомлин, Д.Е. Намиот, Д.А. Гапанович

Аннотация—Статья посвящена анализу тенденций развития цифровых двойников нового поколения, включая интеллектуальных, умных и когнитивных цифровых двойников, ставших ведущим трендом цифровой трансформации. Приведена одна из классификаций цифровых двойников по уровням их сложности. Анализируется класс интеллектуальных (умных) цифровых двойников, их область применения, архитектурные и функциональные особенности, используемые в них методы машинного обучения. Значительное внимание уделяется рассмотрению класса когнитивных цифровых двойников. Рассматривается модель экосистемы сети когнитивных цифровых двойников. Показывается, что цифровые двойники нового поколения служат основой для создания промышленных метавселенных. В качестве примера рассматривается архитектура промышленной метавселенной для горнодобывающих предприятий, создаваемой на основе цифровых двойников рудников. Завершают статью выводы авторов о наиболее значимых тенденциях развития информационных технологий, связанных с технологиями цифровых двойников.

Ключевые слова — цифровые двойники, интеллектуальные цифровые двойники, умные цифровые двойники, когнитивные цифровые двойники, метавселенная, промышленная метавселенная.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из центральных парадигм цифровизации экономики служит концепция цифровых двойников – ЦД (Digital Twin - DT), на основе которой реализуется современный подход к созданию и эксплуатации сложных объектов (физических активов, таких, как: технические системы, производственные процессы, предприятия, цеха, машины и т.п.). Данный подход предполагает использование полномасштабных цифровых моделей физических активов, которые, во-первых, обладают высокой степенью сходства со свойствами и поведением физического актива и, во-вторых, обладают зеркальной информационной взаимосвязью в реальном времени с активом, превращающую активы в целостную кибер-физическую систему (Cyber-Physical System - CPS) с возможностью

управления ею, как на физическом, так и виртуальном уровнях [1, 2].

Отличительные признаки ЦД достаточно полно определены в работе [1]. Основным из этих признаков можно считать за определение ЦД: «ЦД – это цифровая копия конкретного физического объекта, которая отражает структуру, производительность, техническое состояние и характер рабочей миссии физического объекта, включая такие параметры, как, например, пройденные километры, возникшие неисправности, а также историю технического обслуживания и ремонта реального изделия (физического двойника)».

С помощью ЦД осуществляется сбор всей существенной информации об активах и обеспечивается отображение в реальном времени их состояния и динамических характеристик, а также, благодаря зеркальной информационной связи между двойниками и активами, предоставляется возможность манипулирования активами через их цифровые представления. Таким образом, ЦД становятся эффективным инструментом поддержки принятия решений по управлению активами.

В настоящее время технологии ЦД превратились в глобальный технический тренд, и их практическое внедрение расширяется быстрыми темпами. Большинство ведущих компаний и организаций приняли на вооружение эти технологии. Обширный обзор технологических решений в области ЦД от ведущих компаний и организаций приведен в Экспертно-аналитическом отчете Инфраструктурного центра «Техцентр» и Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» [3]. В статье авторов [4] анализировались архитектурные особенности двойников. В последнее время возникли новые классы ЦД, а именно, интеллектуальные ЦД и когнитивные ЦД, которые и будут рассмотрены в последующих разделах статьи.

II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ (УМНЫЕ) ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

В работе [5] приводится классификация ЦД по уровням их сложности или зрелости (Levels of Sophistication (or Maturity)). Введены следующие четыре класса двойников:

1) Пред-цифровой двойник (Pre-Digital Twin) - Уровень 1

Данному классу двойников соответствует традиционный виртуальный прототип проектируемой системы, создаваемый, как правило, на этапе предварительного проектирования и поддерживающий

Статья получена 1 июня 2024.

Сухомлин В.А. – МГУ имени М.В. Ломоносова; ФИЦ ИУ РАН (email: sukhomlin@mail.ru)

Намиот Д.Е. – МГУ имени М.В. Ломоносова (email: dnamiot@gmail.com)

Гапанович Д.А. – МГУ имени М.В. Ломоносова (email: dim.gapanovich@gmail.com)

принятие решений на этапах концептуального проектирования и разработки. Виртуальный прототип используется для проверки определенных ключевых решений при разработке системы и снижения технических рисков на ранних этапах процесса проектирования. Он не применяется для создания окончательной версии системы.

2) Цифровой двойник (Digital Twin) - Уровень 2

Традиционный ЦД включает, как правило, комплекс цифровых моделей, адекватно отражающих свойства целевой системы, включая данные о производительности, работоспособности и техническом обслуживании. Виртуальное представление ЦД, получает данные от физической системы, которые используются для актуализации состояния виртуального представления и для поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла системы. Так как в ЦД взаимодействие виртуального представления с физической системой является двунаправленным, у физического двойника открываются возможности использовать знания из своего виртуального окружения.

3) Адаптивный цифровой двойник (Adaptive Digital Twin) - Уровень 3

Адаптивный ЦД представляет собой традиционный ЦД, расширенный функциями адаптивного пользовательского интерфейса, чувствительного к предпочтениям и приоритетам пользователя/оператора. Ключевой особенностью адаптивного ЦД является способность изучать предпочтения и приоритеты людей-операторов в различных контекстах, что реализуется с помощью алгоритмов контролируемого машинного обучения на основе нейронной сети. Модели, используемые в этом ЦД, постоянно обновляются на основе данных, «извлекаемых» из физического двойника в режиме реального времени. ЦД этого класса может поддерживать планирование и принятие решений в режиме реального времени во время эксплуатации, обслуживания и поддержки.

4) Интеллектуальный цифровой двойник (Intelligent Digital Twin) - Уровень 4

Интеллектуальный ЦД обладает всеми возможностями ЦД уровня 3, дополненными возможностью самостоятельного машинного обучения, применяемые к потоку данных для выявления закономерностей, которые затем используются в работе системы [5]. В работе [6] такие ЦД называются умными - Smart Digital Twins (SDTs) или УЦД. В них широко применяются методы глубокого обучения (DL), которые значительно расширяют возможности умных двойников, особенно для решения таких задач, как прогнозное обслуживание, обнаружение аномалий и оптимизация. Умные двойники применяются в медицине, инженерии, образовании. Выделяется подкласс SDT, применяемых в области обработки изображений (image-based SDTs), которые используют данные изображений для наблюдения и изучения поведения систем, а также для управления их поведением. В работе [6] основное внимание уделяется различным подходам и связанным с ними проблемам при разработке умных двойников на

основе изображений посредством постоянного обучения на изображениях. Также обсуждаются проблемы, связанные с разработкой и внедрением моделей DL для УЦД, включая сбор, обработку и интерпретацию данных. Кроме того, предоставляется информация о будущих направлениях и возможностях разработки новых двойников с использованием генеративных моделей для увеличения данных, разработки мультимодальных моделей DL и изучения интеграции DL с другими технологиями, включая 5G, периферийные вычисления и Интернет вещей.

Примером приложений, которые широко используют возможности машинного обучения в УЦД, могут служить умные дома [7, 8].

Использование машинного обучения в рамках ЦД включает:

обучение с учителем (например, с использованием нейронной сети) предпочтениям и приоритетам оператора/пользователя на экспериментальном стенде [9]

обучение без учителя с использованием методов кластеризации в виртуальных и реальных средах [10, 11] обучение с подкреплением состояний системы и окружающей среды в неопределенных, частично наблюдаемых операционных средах [12, 13].

III. КОГНИТИВНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

Дальнейшее развитие технологий ЦД ведет к внедрению на их основе сервисов и инструментов, реализующих возможности, аналогичные когнитивным способностям человеческих. Такие ЦД получили название когнитивных ЦД – КЦД (Cognitive Digital Twins - CDT). КЦД представляют собой расширение существующих ЦД с дополнительными возможностями коммуникации, аналитики и интеллекта. Они используют данные, полученные в реальном времени от датчиков Интернета вещей, а также информацию из окружения для выполнения функций обучения, рассуждения и принятия решений по автоматической корректировке своего поведения для оптимизации операционных критериев. В отличие от ЦД одной из центральных компонент КЦД становится база знаний, на основе которой реализуются функции искусственного интеллекта. Наиболее распространенным способом организации базы знаний является использование графа знаний и моделей искусственного интеллекта.

Граф знаний обеспечивает семантические описания и контекстуализацию процессов жизненного цикла активов и поддержку процессов идентификации данных, моделирования, прогнозирования и принятия решений. В целом КЦД могут рассматриваться как следующее поколение ЦД, дополненных когнитивными возможностями [14].

КЦД создаются с целью контроля и мониторинга функционирования сложных систем для поддержки процесса принятия решений по оптимизации работы системы [15]. Использование методов оптимизации на основе когнитивного двойника является основным фактором, отличающим его от существующих в

настоящее время решений ЦД. Технологии КЦД направлены на полную виртуализацию актива и его окружения, начиная от проектирования с использованием вычислительных методов моделирования физического актива вплоть до мониторинга и контроля процесса его функционирования, позволяя постоянно корректировать поведенческую модель цифрового аналога [16]. Анализируя операционные данные физического двойника с помощью аналитики и машинного обучения, КЦД применяет методы оптимизации для улучшения процесса принятия решений. КЦД может изучать и улучшать свою способность представлять текущее состояние и условия эксплуатации физического актива в режиме реального времени, может распознавать, оценивать, делать выводы, прогнозировать и принимать решения в отношении текущей и будущей деятельности двойственной физической системы, при этом объединяя машины и людей [17], [18], [19].

КЦД характеризуется расширенными семантическими способностями для обнаружения особенностей эволюции виртуальной модели, их интерпретации, улучшения процесса принятия решений. Для реализации концепции КЦД используются следующие ключевые технологии:

- искусственный интеллект, включая: экспертные системы, нечеткую логику, машинное обучение (МО)

- алгоритмы оптимизации, семантические технологии, основными из которых являются: онтологии, онтологическая инженерия, графы знаний

- распределенные вычисления, включая: облачные, туманные, периферийные вычисления (Cloud/Fog/Edge Computing)

- технологии распределенного реестра (Distributed Ledger Technology)

- когнитивные методы (Cognitive Computing), включая: большие данные и алгоритмы аналитики больших данных, когнитивные алгоритмы и искусственный интеллект, высокоуровневые человеко-машинные интерфейсы, в том числе на естественных языках

- технологии 3D визуализации

Еще одно отличительное свойство КЦД от ЦД это способность сформировать между КЦД сеть, обеспечивающую полностью автоматизированное межмашинное взаимодействие и принятие решений, что ведет к появлению экосистем КЦД. Сети КЦД будут использовать единые графы знаний, определяющие домены деятельности узлов таких автоматических сетей.

На Рис. 1 иллюстрируется концептуальная модель экосистем КЦД в перспективе.

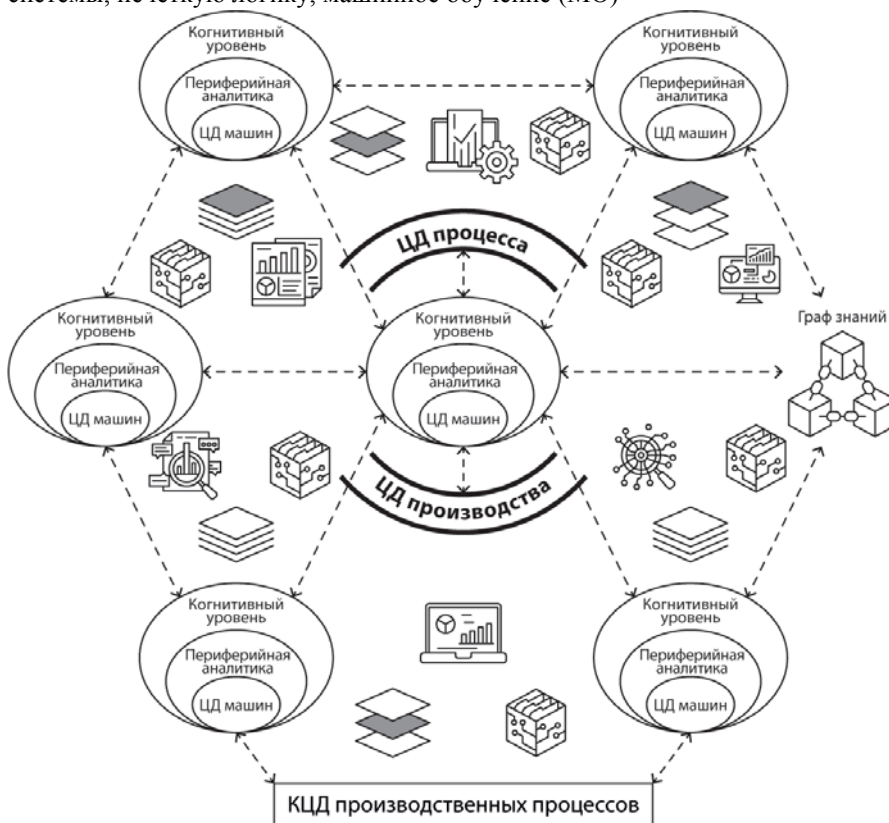


Рис. 1. Концептуальная модель экосистем КЦД [17].

В работе [19] предложен фреймворк архитектуры для КЦД, разработанный в соответствии со стандартами ISO/IEC/IEEE 42010 и ориентированный на графы знаний. Данная архитектура состоит из пяти основных компонентов, охватывающих широкий спектр областей,

включая:

- моделирование динамических процессов промышленных систем

- междоменные графы знаний на основе онтологий
- построение КЦД для динамического моделирования процессов

- анализ на основе КЦД для оптимизации процессов

и

- сервис-ориентированный интерфейс для совместимости данных

В работе [19] также предложена более подробная эталонная архитектура КЦД на основе соблюдения текущих стандартов и спецификаций, в частности RAMI4.0, для обеспечения совместимости. Три измерения предлагаемой эталонной архитектуры показаны на Рис. 2. Они включают:

- этапы полного жизненного цикла: этап НЭ (начало эксплуатации, например, проектирование, создание, тестирование), этап ИС (использование-сопровождение,

например, использование, техническое обслуживание), этап ВЭ (вывод из эксплуатации, например, разборка, переработка, повторное производство);

- уровни системной иерархии: Система систем, Системы, Подсистемы, Компоненты, Части;

- шесть функциональных уровней: Взаимодействие с пользователем, Управление ЦД, Управление услугами, Управление моделями, Подготовка/Обработка данных, Физические сущности.

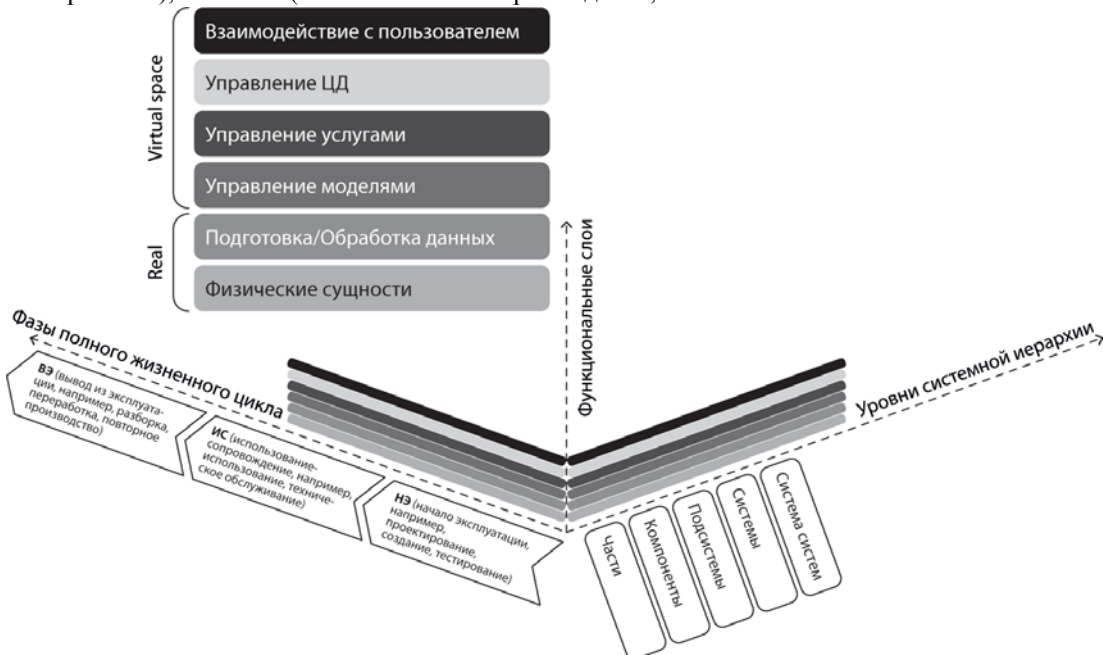


Рис. 2: Эталонная архитектура КЦД на основе RAMI4.0 [19].

В работе [20] разработан фреймворк эталонной архитектуры для ядра CDT на ранней стадии разработки, в которой описаны основные архитектурные строительные блоки CDT.

IV ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ МЕТАВСЕЛЕННОЙ

Работа [21] посвящена исследованию применения технологий ЦД для разработки промышленной метавселенной с целью повышения эффективности производства.

Промышленная метавселенная — важнейшее звено с большим потенциалом в экономике метавселенной, формирующее новую производственную модель, основанную на:

- человеческом сотрудничестве
- виртуальном и реальном взаимном контроле
- цифровой интеграции путем глобального восприятия производственной деятельности, моделировании с помощью цифровых двойниковом сложных промышленных сценариев [22, 23]

Технологическая основа метавселенной включает различные дисциплины и технологии, такие, как, цифровые двойники, виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR), смешанная реальность

(XR), Интернет вещей (IoT), облачные вычисления, искусственный интеллект и беспроводные сети пятого поколения (5G-NR). Эти технологии могут быть использованы для создания базового прототипа метавселенной.

Технология ЦД создает практически идентичные цифровые копии объектов реального мира. AR и VR могут проецировать реальный мир в виртуальный. Интернет вещей реализует тесную взаимосвязь между людьми, вещами и между людьми и вещами. Облачные вычисления направлены на централизацию глобально рассредоточенных вычислительных ресурсов и противодействие компьютерному пиратству. Искусственный интеллект призван расширить возможности машин к обучению и обладанию когнитивными способностями. Стандарт 5G-NR направлен на своевременную, эффективную и высокую пропускную способность передачи данных.

Метавселенная по сути является процессом виртуализации и оцифровки реального мира, который требует обширных преобразований производства, контента, экономических систем, пользовательского опыта, контента физического мира [24]. Развитие метавселенной происходит инкрементально и поддерживается глобальной инфраструктурой, стандартами и протоколами, и формируется в результате непрерывной конвергенции и эволюции многих

инструментов и платформ. Обширное интерактивное и иммерсивное ощущение метавселенной в реальном времени требует виртуального места, которое сможет вместить десятки тысяч, если не сотни миллионов пользователей, общающихся одновременно, что отличается от обычных онлайн-игр и конференций.

На Рис. 3 иллюстрируется многоуровневая архитектура метавселенной, включающая следующие пять уровней сущностей [21]:

- базовый слой (Basic Layer) – содержит ресурсы данных и физические активы
- технический слой (Technical Layer) – соответствует базовым технологиям метавселенной (цифровые двойники, движки виртуальной реальности, технологии ИИ, Интернета вещей, интеллектуального интерфейса,

блокчейн)

- слой возможностей (Capability Layer) – включает многомерное моделирование, всевозможные отображения сущностей, методы симуляции и дедукции, большие данные и визуализацию

- прикладной слой (Application Layer) – включает приложения управления городами, промышленным производством, транспортом, энергетическими ресурсами

- терминальный слой (Terminal Layer) – охватывает пользователей метавселенной – предприятия, правительственные учреждения, массового потребителя, пользователей

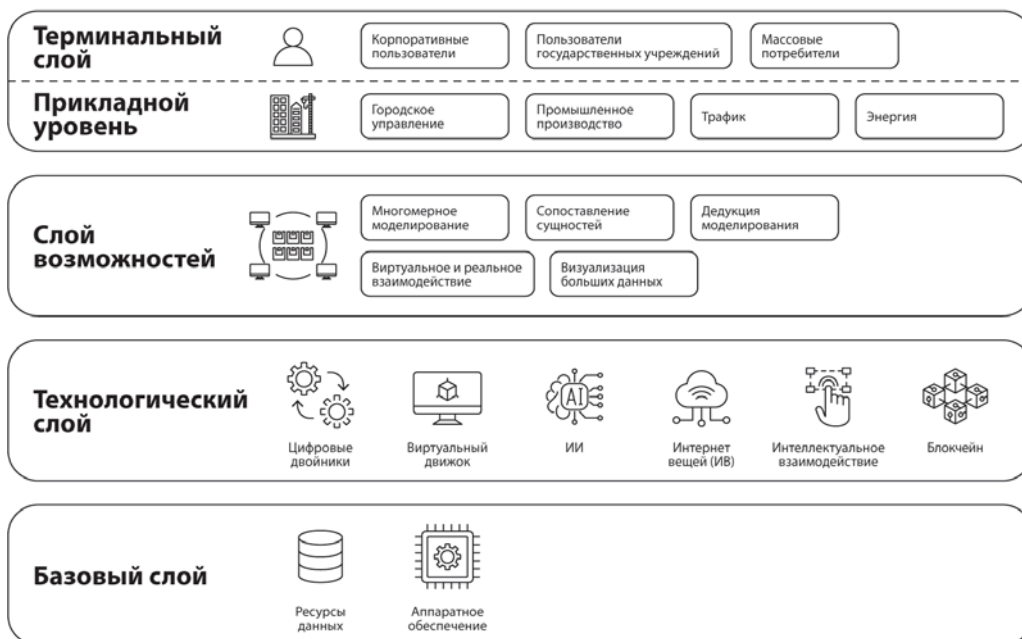


Рис. 3. Архитектура промышленной метавселенной [21].

В работе [25] отмечается, что промышленная метавселенная представляет собой параллельный мир, состоящий из ЦД всех корпоративных элементов физического мира в качестве базовых единиц. Двойники включают данные в режиме реального времени о проектировании, исследованиях, разработках, производстве, распространении и продажах промышленных активов. Они, используя облачные технологии, технологии взаимодействия между виртуальным и реальным, визуализации больших данных и промышленного интернета, когнитивные возможности, позволяют синхронизировать данные о продуктах, услугах или производственных процессах из физического мира в виртуальное пространство, формируя технологическую базу для реализации промышленной метавселенной на практике. В промышленной метавселенной на основе цифровых фабрик создан ряд сценариев применения в различных отраслях промышленности [26].

В работе [22] метавселенная рассматривается как

расширение ЦД в сферах людей и общества. В ней предлагается модель метавселенной, иллюстрируемая на Рис. 4.

На Рис. 4 показано, что каждая метавселенная строится из надежных пространственных ЦД (spatial digital twin), использующих критически важные технологии блокчейна - БлокНет (BlockNet) для безопасного хранения многомерных данных и безопасности процесса цифрового картографирования метавселенной, а также перечисленные ранее базовые технологии, включая когнитивные технологии, технологии интернета вещей и визуализации. Дополнение метавселенной компонентой, названной «Параллельным интеллектом», придает ей новое качество, названное в статье «Параллельной Метавселенной». Такая метавселенная обладает возможностями организации распределенных/параллельных экспериментов с использованием виртуальных искусственных сообществ, реализуемых на основе АСП-параллельной теории (algebra of communicating processes - ACP).

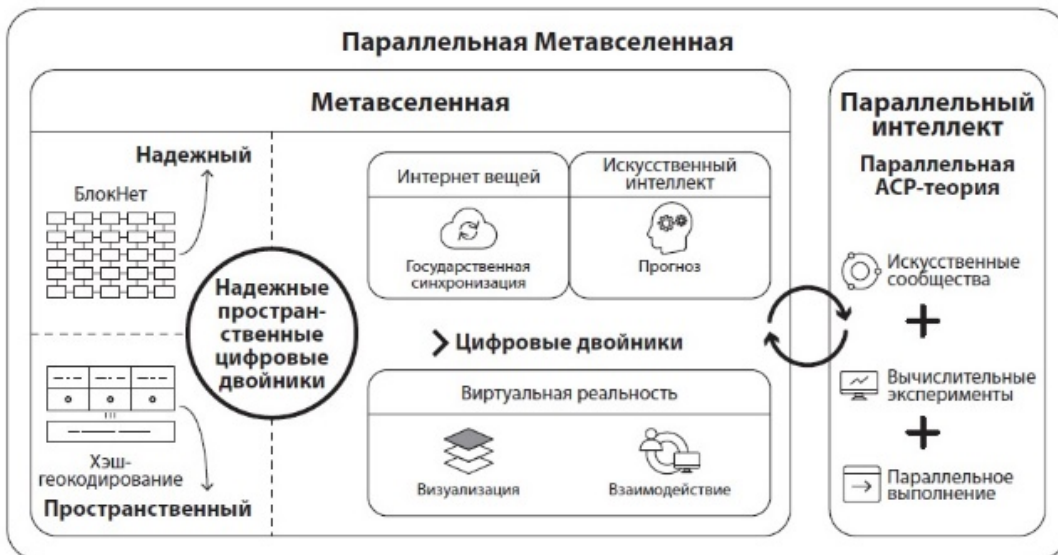


Рис. 4. От надежных пространственных ЦД к параллельной метавселенной [22].

Таким образом, ЦД нового поколения — это основа промышленной метавселенной и фундаментальный инструмент для построения виртуальных миров.

Примером создания на основе ЦД промышленной метавселенной может служить рассматриваемый в работе [27] подход к созданию на основе ЦД рудников промышленной метавселенной для горнодобывающих предприятий (данный пример выбран в связи с профессиональным интересом автором к этой отрасли). Под такой вселенной понимается массово масштабируемая и совместимая сеть виртуальных 3D-миров, визуализированных в реальном времени, которые могут быть синхронно и постоянно испытаны практически неограниченным количеством пользователей с индивидуальным ощущением присутствия и с непрерывностью данных.

Следуя [28], такую метавселенную можно представить в виде семи уровневой структуры. Начиная с седьмого уровня по первый, сверху вниз, этими уровнями являются:

- опыт (Experience) – 7 уровень
- открытия (Discovery) – 6 уровень
- совместная реализация (Collaborative realisation) – 5 уровень
- пространственные вычисления (Spatial computing) – 4 уровень
- децентрализация (Decentralisation) – 3 уровень
- человеческий интерфейс (Human interface devices) – 2 уровень
- инфраструктура (Infrastructure and communications [Wifi, 5G, Wifi 6, Cloud, 7 and 14 nm CPUs, Micro-Electro-Me) – 1 уровень

В работе [27] к определенным выше уровням добавляется еще одна компонента, а именно, Управление, так как для глобальной технологии с большим количеством заинтересованных сторон

важность управления, этики и протоколов в форме стандартов и процедур очевидна (Governance, ethics, regulation, moderation). Такая компонента необходима для создания устойчивой метавселенной горнодобывающей промышленности. Она должна включать в себя управление, этику, регулирование и модерацию через высшие органы, отражающие потребности горнодобывающей деятельности.

В результате получилась восьмиуровневая модель устойчивой метавселенной, рассмотренная в Таб. 1.

Таблица 1

Уровень	Виды деятельности
8	Опыт [Углубленный опыт работы на руднике, эмпатия, улучшение взаимодействия с заинтересованными сторонами, повышение устойчивости рудника]
7	Открытия [Серьезные игры, симуляции, визуализации, тимбилдинги, кейсы]
6	Совместная реализация [Сети, социальное взаимодействие между операциями и объектами, курирование знаний и активов, консенсус, рейтинги, деколонизация, агенты, репозитории]
5	Пространственные вычисления [3D-игровые движки, VR/AR/MR, многозадачный пользовательский интерфейс, геопространственное картографирование]
4	Децентрализация [Граничные вычисления, искусственный интеллект, микросервисы, блокчейн]
3	Устройства с человеческим интерфейсом [мобильные телефоны, головные дисплеи, голограммы, компьютерные сенсорные экраны, иммерсивные визуальные театры, нейронные, носимые устройства, тактильные ощущения, жесты, голос]
2	Инфраструктура и коммуникации [Wi-Fi, 5G, Wi-Fi 6, облачные технологии, процессоры 7 и 14 нм, микроэлектромеханические системы, графические процессоры, материалы для погружения]
1	Управление, этика, регулирование, модерация

[Высшие органы – Международная организация по стандартизации, Стандарты Австралии и т.п.]

Из представленной архитектуры промышленной метавселенной следует, что, в первую очередь, для ее создания требуются такие инструменты как: 3D-движки, искусственный интеллект, технологии визуализации, симуляции, платежные системы, базы знаний и кибербезопасность. Также для взаимодействия с Метавселенной требуются человеко-компьютерные интерфейсы, такие как: мобильные телефоны, головные дисплеи, персональные компьютеры, иммерсивные среды с большим экраном, игровые консоли, голограммы и, возможно, нейронные имплантаты. Далее в работе [27] рассматривается пример применения представленной архитектуры к метавселенной для горнорудной промышленности, в которой шахты с различными уровнями развития и возможностей могут сотрудничать с коллегами для улучшения своих знаний, возможностей и устойчивости. Следует заметить, что к пионерским работам по теме виртуальных шахт можно отнести работу [29], в которой продемонстрировано, как надо использовать иммерсивные технологии и Интернет для отображения разнообразных данных о рудниках.

В работах [30, 31] обсуждаются применение расширенного моделирования смешанной реальности к стратегическим операционным задачам рудника, что обещает более устойчивую эксплуатацию рудника. В частности, рассматривается возможность совместной работы с коллегами на площадке и удаленно с помощью передовой системы информационного моделирования горных работ (MIMS), подключенной к метавселенной горнодобывающей промышленности, что обеспечивает возможность персоналу общаться и участвовать в принятии решений на площадке виртуально, как если бы они находились на площадке и были частью сплоченной команды.

В работе [32] подробно описывается разработка экспериментального операционно-ориентированного ЦД с возможностью мониторинга и управления в режиме реального времени шаровой мельницы в лабораторном масштабе. В работе представлен подход к созданию ЦД на основе интеграции имеющейся системы управления с методами визуализации, передвижения и взаимодействия VR в виртуальном 3D-пространстве на базе Unity — бесплатного современного графического движка реального времени, широко используемого для серьезных игр и разработки современных XR-приложений [33] (Unity Technologies, 2023). Созданный двойник устройства и модель окружения устройства по существу образовали пример метавселенной, решающую конкретную задачу, и показавший перспективу разработки промышленной метавселенной для горнодобывающей промышленности.

V БОЛЬШИЕ РЕАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Бурное и успешное развитие генеративного ИИ, в частности, языковых моделей, не обошло своим вниманием и проблематику цифровых двойников. Идея достаточно прозрачна. Цифровой двойник начинается с потока реальных данных. Что если вместо традиционной модели у нас появляется большая языковая модель (LLM) или большая мультимодальная модель (LMM), которая будет заниматься ровно тем, для чего она и создавалась – интерпретацией поступившего ввода. Подсказка (промпт) для такой LLM – это очередной набор данных из реального мира. Ну а вывод модели – это то, что мы хотим узнать (предсказать) из накопленных с момента начала эксплуатации (начала сеанса) данных.

Например, в работе [46] представлена следующая архитектура (рис. 5)

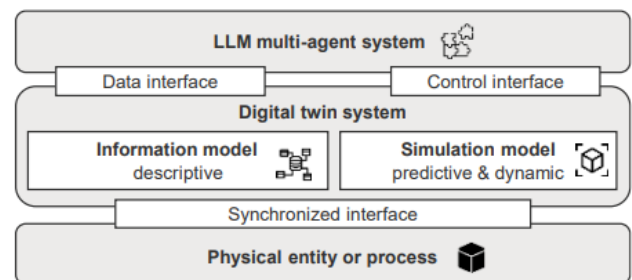


Рис.5. LLM & Digital Twin [46].

Цифровой двойник здесь выступает как в роли информационной системы (анализ данных реального мира), так и в роли системы моделирования (аугментации реальных данных).

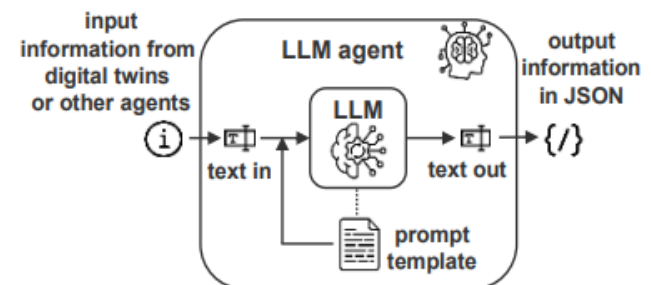


Рис.6. LLM как информационный процессор [46].

Задача на взаимодействие с LLM (LMM) возложена на программных агентов (рис. 6), что полностью укладывается в основную промышленную модель использования LLM.

В работе [47] LLM используется для моделирования “человеческих” оценок работы климатической техники. В работе [48] авторы предлагают новый метод представления последовательностей данных, ориентированный на LLM общего назначения. Эти последовательности и есть измерения в ЦД. Авторы работы добились интеграции разнообразной информации из измерений, данных документов и знаний предметной области через LLM. Цифровой двойник в такой трактовке – это совокупность интеллектуальных агентов.

В итоге, одним из производителей подобного рода систем [49] была предложена следующая формула:

Digital Twin + LLM = Large Reality Model

VI ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение подведем итоги сделанному выше краткому анализу тенденций развития цифровых двойников нового поколения.

1) В настоящее время ЦД стали одной из основных концепций и технологией цифровизации промышленности, что вызвало значительное внимание к этой теме научной сферы. В частности, в последние годы, наблюдался экспоненциальный рост общего числа публикаций о «цифровых двойниках» в Web of Science [33]. Анализ таких работ показал тенденцию развития ЦД от полнофункциональных цифровых моделей физических активов до интеллектуальных систем, оснащенных продвинутыми технологиями искусственного интеллекта, определяющими тем самым такие классы ЦД, как адаптивные, умные, когнитивные и т.п., основные цели создания которых направлены на достижение способности двойников к автономной оптимизации функционирования и высокоуровневого человеко-машинного интерфейса, естественного для человека.

2) Очевидной тенденцией развития ЦД является также их интеграция с производственными мета-вселенными, представляющими собой цифровые экосистемы, в которых физические и виртуальные миры сливаются вместе [34]. Промышленные метавселенные включают в себя цифровые двойники, виртуальные и дополненные реальности, облачные вычисления, интернет вещей, технологии распределенного реестра и искусственного интеллекта для создания интеллектуальных и высокоавтоматизированных систем. В метавселенных цифровым двойникам отводится роль содержательной основы, предоставляющей виртуальные модели объектов и процессов, которые помогают управлять реальными системами в промышленности и оптимизировать их работу.

3) Еще одной тенденцией развития ЦД, обусловленной потребностью формирования интегрированных распределенных отраслевых ресурсов, является создание сетей из ЦД, обеспечивающих автоматизированные межмашинное взаимодействие и принятие решений. По существу сети ЦД становятся экосистемами когнитивных цифровых двойников, представляющими собой комплексные среды, объединяющие цифровые двойники с другими технологиями и ресурсами для решения таких задач, как: интеграция данных из различных источников, включая IoT-устройства, датчики, системы мониторинга физических систем и т.д.; аналитика для извлечения знаний из данных, прогнозирования и оптимизации процессов и систем; автоматизация управленческих процессов и принятия решений на основе данных; создание виртуальных моделей для тестирования систем и процессов до их физической реализации; оптимизация производственных процессов и др.

4) Эффективность функционирования сетей ЦД определяется в первую очередь семантической и функциональной совместимостью используемых ими знаний, данных, ресурсов, что выдвигает в число актуальнейших задач применение технологий онтологического инжиниринга для стандартизации и организации доменных знаний в компьютерной среде [35], графов знаний для создания интегрированных доменных баз знаний и интеллектуального анализа данных для получения новых знаний [36], управления открытыми данными FAIR [37, 38, 39] для обеспечения представления данных в стандартизированном и легко доступном формате, машиночитаемости данных, максимально эффективного использования данных, как людьми, так и компьютерами.

5) Инкрементальный характер создания и развития ЦД, завоевание двойниками ведущей роли в жизненном цикле создаваемых инженерных систем, особенно доминирующей роли двойников в процессе эксплуатации систем (мониторинг, прогнозирование, оптимизация функционирования) – все это привносит новый импульс в развитие методов, инструментов и стандартов модельно-ориентированной системной инженерии (MBSE) [40], методологической и технологической основы современного инженерного дела. Примером таких инноваций в MBSE могут служить технологии цифровой нити [41], включая двухнитевую структуру [42], обеспечивающей беспрепятственную циркуляцию генерируемой и хранимой в DT информации через все стадии жизненного цикла системы от изобретения до утилизации.

6) Требования к высокой степени интеграции виртуальных и физических ресурсов, высокого уровня их интероперабельности ведут к новому взрывному процессу стандартизации в области информационных технологий и их приложений, существенно более масштабному по сравнению с процессом стандартизации в конце прошлого века, вызванным разработкой концепций открытых систем и глобальной информационной инфраструктуры. В настоящее время развернута интенсивная стандартизация в области ЦД [43] и других затронутых в статье направлений. Однако масштаб требуемых стандартизованных решений в сфере цифровизации столь велик, что традиционная сложившаяся международная система стандартизации нуждается в принципиально новой технологии разработки, внедрения и сопровождения стандартов. Такой технологией обещает стать «умная» или SMART стандартизация, в которой SMART-стандарт становится цифровым машиночитаемым и машинопонимаемым документом, который является объектом информационной системы документов по стандартизации и представляется в виде контейнера неструктурированных и структурированных данных [44, 45]. При этом такие стандарты могут выступать и в роли продуктов, создаваемых прикладными специалистами и составляющими собственный сектор рынка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.П. Куприяновского за ценные советы и информационную поддержку. Отметим, что именно с работ В.П. Куприяновского и его многочисленных соавторов, в журнале INJOIT началась серия публикаций о цифровой трансформации [50-52].

Тематике цифровых двойников было посвящено несколько публикаций журнала. Например, работы [53-55].

REFERENCES

- [1] Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.
- [2] ПНСТ 429-2020. Умное производство. ДВОЙНИКИ ЦИФРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВА. Часть 1. Общие положения. Издание официальное. Москва. Стандартинформ. 2020.
- [3] Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности экспертно-аналитический доклад. Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ. 2019. <https://technet-nti.ru/article/ekspertno-analiticheskij-doklad-cifrovye-dvojniki-v-vysokotehnologichnoj-promyshlennosti>.
- [4] Д.А. Гапанович, В.А. Тарасова, В.А. Сухомлин, В.П. Куприяновский. Анализ подходов архитектурного проектирования цифровых двойников. International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 10, no. 4, 2022.
- [5] Azad M. Madni, Carla C. Madni and Scott D. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. Systems 2019, 7, 7; doi:10.3390/systems7010007
- [6] Islam M. R., Subramaniam M., Huang P. C. Image-based Deep Learning for Smart Digital Twins: a Review //arXiv preprint arXiv:2401.02523. –2024.<https://arxiv.org/html/2401.02523v1>. 2024.
- [7] Cityzenith. What are Digital Twins? What the Building and Real Estate Industries Need to Know. Cityzenith, 9 October 2018.
- [8] Scholten, A. Smart Buildings and Their Digital Twins. Realcomm20 Advis. Newslett. 2017, 17. Available online: <https://www.realcomm.com/advisory/827/2/smart-buildings-and-their-digital-twins>.
- [9] Madni, A.M.; Samet, M.G.; Freedy, A. A Trainable On-Line Model of the Human Operator in Information Acquisition Tasks. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1982, 12, 504–511.
- [10] Madni, A.M.; Sievers, M.; Erwin, D.; Madni, A.; Ordoukhanian, E.; Pouya, P. Formal Modeling of Complex Resilient Networked Systems. In Proceedings of the AIAA Science and Technology Forum, San Diego, CA, USA, 7–11 January 2019.
- [11] Madni, A.M.; Sievers, M.; Ordoukhanian, E.; Pouya, P.; Madni, A. Extending Formal Modeling for Resilient Systems. In Proceedings of the 2018 INCOSE International Symposium, Washington, DC, USA, 7–12 July 2018.
- [12] Madni, A.M. Next Generation Adaptive Cyber-Physical Systems. In Proceedings of the 21st Annual Systems Engineering Conference, Tampa, FL, USA, 22–24 October 2018.
- [13] Madni, A.M.; Madni, C.C.; Sievers, M. Adaptive Cyber-Physical-Human Systems. In Proceedings of the 2018 INCOSE International Symposium, Washington, DC, USA, 7–12 July 2018.
- [14] Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim Yitmen Department of Construction Engineering & Lighting Science Jönköping University, Jönköping, Sweden. © 2023 Ibrahim Yitmen CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC. P. 240.
- [15] Ibrahim Yitmen, and Sepehr Alizadehsalehi. Enabling Technologies for Cognitive Digital Twins Towards Construction 4.0. Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim Yitmen Department of Construction Engineering & Lighting Science Jönköping University, Jönköping, Sweden. © 2023 Ibrahim Yitmen CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC. P. 240. P. 1-19.
- [16] JM Rozanec•2020, et/ al. Towards Actionable Cognitive Digital Twins for Manufacturing. [Электронный ресурс] - <https://ceur-ws.org/Vol-2615/paper5.pdf>
- [17] Ali, M.I., Patel, P., Breslin, J.G., Harik, R. and Sheth, A. 2021. Cognitive Digital Twins for smart manufacturing. IEEE Intelligent Systems, 36(2): 96–100
- [18] Ibrahim Yitmen, and Sepehr Alizadehsalehi. Synopsis of Construction 4.0-based Digital Twins to Cognitive Digital Twins. Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim Yitmen Department of Construction Engineering & Lighting Science Jönköping University, Jönköping, Sweden. © 2023 Ibrahim Yitmen CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC. P. 240. P.20-38
- [19] Zheng, X., Lu, J. and Kiritsis, D. 2021. The emergence of cognitive digital twin: Vision, challenges and opportunities. International Journal of Production Research, 1–23.
- [20] Adl, A.E. 2016. The Cognitive Digital Twins: Vision, Architecture Framework and Categories. Agrawal, A., Singh, V., Thiel, R., Pillsbury, M., Knoll, H., Puckett, J. and Fischer, M. 2022. Digital twin in practice: Emergent insights from an ethnographic-action research study. Construction Research Congress, 2022: 1253–1260.
- [21] Lv Z., Fridenfolk M. Digital Twins for Building Industrial Metaverse //Journal of Advanced Research. 2023 - <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.019>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123223003594?via%3Dihub>
- [22] Z. Lv, L. Qiao, Y. Li, et al. Blocknet: Beyond reliable spatial digital twins to parallel metaverse[J] Patterns, 3 (5) (2022), Article 100468 View PDFView articleView in Scopus Google Scholar .
- [23] Y. Han, D. Niyato, C. Leung, et al. A dynamic hierarchical framework for iot-assisted digital twin synchronization in the metaverse[J] IEEE Internet of Things Journal, 10 (1) (2022), pp. 268–284 .
- [24] X. He. The Innovative Development of Chinese Vocational Education from the Perspective of the Metaverse [J] Journal of Education and Educational Research, 1 (2) (2022), pp. 8-12.
- [25] M. Kovacova, J. Oláh, G.H. Popescu Dital twin simulation and modeling tools, deep learning object detection technology, and visual perception and sensor fusion algorithms in the metaverse commerce[J] Economics, Management and Financial Markets, 17 (3) (2022), pp. 9-
- [26] A.K. Tyagi, N. Sreenath. Cyber Physical Systems: Analyzes, challenges and possible solutions[J]. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 1 (2021), pp. 22-33.
- [27] Stothard P. Mining Metaverse—a future collaborative tool for best practice mining //Mining Technology. 2023. T. 132. №. 3. C. 165-178. <https://doi.org/10.1080/25726668.2023.2235155>.
- [28] Metamandrill. 2022. The Metaverse guide - The internet's evolution. Netherlands. <https://metamandrill.com/wp-content/uploads/2022/07/Metamandrill.com-The-Metaverse-Guide-The-Internets-Evolution-version-1.6.pdf>.
- [29] Guy LeBlanc Smith, Con Caris, Gil Carter Virtual Mine Technology. CSIRO - Exploration and Mining, 2643 Moggill Road, Pinjarra Hills, Brisbane, Queensland 4069. Conference Paper October 2000 DOI: 10.13140/RG.2.1.4989.6083 .
- [30] Stothard et al. (2019) Stothard P, Squelch A, Stone R, Wyk Ev. 2019. Towards sustainable mixed reality simulation for the mining industry. Min Technol.
- [31] Stothard P. Mining Metaverse—a future collaborative tool for best practice mining //Mining Technology. 2023. T. 132. №. 3. C. 165-178. <https://doi.org/10.1080/25726668.2023.2235155> .
- [32] Qu J. et al. Developing a digital twin for a laboratory ball mill operation—a step towards mining metaverse //Mining Technology. 2024. - [25726668231222990](https://doi.org/10.1177/25726668231222990).<https://doi.org/10.1177/25726668231222990> .
- [33] Adeagbo M. O., Wang S. M., Ni Y. Q. Revamping structural health monitoring of advanced rail transit systems: A paradigmatic shift from digital shadows to digital twins //Advanced Engineering Informatics. – 2024. T. 61. C. 102450.<https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102450>.
- [34] M. Zawishet al., "AI and 6G Into the Metaverse: Fundamentals, Challenges and Future Research Trends," inIEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 5, pp. 730-778, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3349465.
- [35] Yann Le Franc1. OntoCommons D3.2 - Report on existing domain ontologies in identified domains. OntoCommons - Ontology-driven

- data document ation for Industry Commons, has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement no. 958371. <https://zenodo.org/record/6504553#.Y3TI9r1ByM8>.
- [36] Ibrahim Yitmen, Sepehr Alizadehsalehi, Ilknur Akiner and Muhammed Ernur Akiner. Knowledge Graph-based Approach for Adopting Cognitive Digital Twins in Shop-floor of Modular Production. *Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices*. Editor Ibrahim. CRC Press. 4 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4RN. © 2023. p.p. 79-100.
- [37] Papadopoulou, E., Bardi, A., Kakalettris, G. et al. Data management plans as linked open data: exploiting ARGOS FAIR and machine actionable outputs in the OpenAIRE research graph. *J Biomed Semant* 14, 17 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13326-023-00297-5>
- [38] 'FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship' - <https://www.go-fair.org/fair-principles/>.
- [39] The U.S. Government's Open Data, [Электронный ресурс] - <https://www.data.gov/>.
- [40] *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, Fourth Edition, INCOSE, 2015.
- [41] Pang, T.Y.; Pelaez Restrepo, J.D.; Cheng, C.T.; Yasin, A.; Lim, H.; Miletic, M. Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1097. <https://doi.org/10.3390/app11031097>.
- [42] Azad M. Madni, Carla C. Madni and Scott D. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems* 2019, 7, 7; doi:10.3390/systems7010007.
- [43] Michael Jacoby and Thomas Usländer, Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape, *Appl. Sci.* 2020, 10(18), 6519; <https://doi.org/10.3390/app10186519>, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6519/htm>.
- [44] ПНСТ 864-2023. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ УМНЫЕ (SMART) СТАНДАРТЫ. Общие положения.
- [45] Светлана ДМИТРИЕВА. Умные (SMART) стандарты: первые итоги. Бизнес, технологии, управление. *CONNECT* № 3–4, 2024, с.120-121 | https://www.connect-wit.ru/wp-content/uploads/2024/04/BTU_Dmitrieva.pdf.
- [46] Xia, Yuchen, et al. "LLM experiments with simulation: Large Language Model Multi-Agent System for Process Simulation Parametrization in Digital Twins." arXiv preprint arXiv:2405.18092 (2024).
- [47] Yang, Hanqing, Marie Siew, and Carlee Joe-Wong. "An LLM-Based Digital Twin for Optimizing Human-in-the Loop Systems." arXiv preprint arXiv:2403.16809 (2024).
- [48] Sun, Yicheng, et al. "Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning." *Journal of Manufacturing Systems* 74 (2024): 83-99.
- [49] Digital Twin + LLM = Large Reality Model? <https://www.linkedin.com/pulse/digital-twin-llm-large-reality-model-janne-hietala-mm4f/> Retrieved: 08тб 2024
- [50] Розничная торговля в цифровой экономике / В. П. Куприяновский, С. А. Сиянгов, Д. Е. Намиот [и др.] // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4, № 7. – С. 1-12. – EDN WCM1WN.
- [51] Волков, А. А. О задачах создания эффективной инфраструктуры среды обитания / А. А. Волков, Д. Е. Намиот, М. А. Шнепс-Шнеппе // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2013. – Т. 1, № 7. – С. 1-10. – EDN ROMIZX.
- [52] Искусственный интеллект как стратегический инструмент экономического развития страны и совершенствования ее государственного управления. Часть 2. Перспективы применения искусственного интеллекта в России для государственного управления / И. А. Соколов, В. И. Дрожжинов, А. Н. Райков [и др.] // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2017. – Т. 5, № 9. – С. 76-101. – EDN ZEQDMT.
- [53] Namiot, Dmitry, et al. "Digital twins and discrete-event simulation systems." *International Journal of Open Information Technologies* 9.2 (2021): 70-75.
- [54] Kurganova, Nadezhda, et al. "Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization." *International Journal of Open Information Technologies* 7.5 (2019): 105-115.
- [55] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "The ontologies of cyber-physical systems of the national digital twin of Great Britain and BIM on the examples of smart cities, railways, and other projects." *International Journal of Open Information Technologies* 9.3 (2021): 91-130.

Analysis of development trends of new generation digital twins

V.A. Sukhomlin, D.E. Namiot, D.A. Gapanovich

Abstract—The article is devoted to the analysis of development trends of new generation digital twins, including intelligent, intelligent and cognitive digital twins, which have become the leading trend in digital transformation. A classification of digital twins is given, the class of intelligent (smart) digital twins, their scope of application, architectural and functional features, and the machine learning methods used are analyzed. Next, we consider the class of cognitive digital twins. Their features and scope of application are discussed. Finally, the use of cognitive digital twins for creating industrial metaverses is considered, in particular, the approach and architecture of an industrial metaverse for mining enterprises created on the basis of digital twins of mines is considered. In conclusion, the article presents conclusions on current scientific areas of digitalization, which, in the opinion of the authors, deserve special attention.

Keywords— digital twins, intelligent digital twins, smart digital twins, cognitive digital twins, metaverse, industrial metaverse.

REFERENCES

- [1] Prohorov A., Lysachev M. Nauchnyj redaktor professor Borovkov A. Cifrovoy dvojniki. Analiz, trendy, mirovoj opyt. Izdanie pervoe, ispravlennoe i dopolnennoe. – M.: OOO «Al'jansPrint», 2020. – 401 str., il.
- [2] PNST 429-2020. Umnoe proizvodstvo. DVOJNIKI CIFROVYE PROIZVODSTVA. Chast' 1. Obshhie polozhenija. Izdanie oficial'noe. Moskva. Standartinform. 2020.
- [3] Cifrovye dvojniki v vysokotekhnologichnoj promyshlennosti jekspertno-analiticheskij doklad. Infrastrukturnyj centr «Tehnet» SPbPU. 2019. <https://technet-nti.ru/article/ekspertno-analiticheskij-doklad-cifrovye-dvojniki-v-vysokotekhnologichnoj-promyshlennosti>.
- [4] D.A. Gapanovich, V.A. Tarasova, V.A. Suhomlin, V.P. Kuprijanovskij. Analiz podhodov arhitekturnogo proektirovanija cifrovyh dvojnikov. International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 10, no. 4, 2022.
- [5] Azad M. Madni, Carla C. Madni and Scott D. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. Systems 2019, 7, 7; doi:10.3390/systems7010007
- [6] Islam M. R., Subramaniam M., Huang P. C. Image-based Deep Learning for Smart Digital Twins: a Review //arXiv preprint arXiv:2401.02523. –2024. <https://arxiv.org/html/2401.02523v1>. 2024.
- [7] Cityzenith. What are Digital Twins? What the Building and Real Estate Industries Need to Know. Cityzenith, 9 October 2018.
- [8] Scholten, A. Smart Buildings and Their Digital Twins. Realcomm20 Advis. Newslett. 2017, 17. Available online: <https://www.realcomm.com/advisory/827/2/smart-buildings-and-their-digital-twins>.
- [9] Madni, A.M.; Samet, M.G.; Freedy, A. A Trainable On-Line Model of the Human Operator in Information Acquisition Tasks. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1982, 12, 504–511.
- [10] Madni, A.M.; Sievers, M.; Erwin, D.; Madni, A.; Ordoukhanian, E.; Pouya, P. Formal Modeling of Complex Resilient Networked Systems. In Proceedings of the AIAA Science and Technology Forum, San Diego, CA, USA, 7–11 January 2019.
- [11] Madni, A.M.; Sievers, M.; Ordoukhanian, E.; Pouya, P.; Madni, A. Extending Formal Modeling for Resilient Systems. In Proceedings of the 2018 INCOSE International Symposium, Washington, DC, USA, 7–12 July 2018.
- [12] Madni, A.M. Next Generation Adaptive Cyber-Physical Systems. In Proceedings of the 21st Annual Systems Engineering Conference, Tampa, FL, USA, 22–24 October 2018.
- [13] Madni, A.M.; Madni, C.C.; Sievers, M. Adaptive Cyber-Physical-Human Systems. In Proceedings of the 2018 INCOSE International Symposium, Washington, DC, USA, 7–12 July 2018.
- [14] Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim Yitmen Department of Construction Engineering & Lighting Science Jönköping University, Jönköping, Sweden. © 2023 Ibrahim Yitmen CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC. P. 240.
- [15] Ibrahim Yitmen, and Sepehr Alizadehsalehi. Enabling Technologies for Cognitive Digital Twins Towards Construction 4.0. Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim Yitmen Department of Construction Engineering & Lighting Science Jönköping University, Jönköping, Sweden. © 2023 Ibrahim Yitmen CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC. P. 240. P. 1-19.
- [16] JM Rozanec•2020, et/ al. Towards Actionable Cognitive Digital Twins for Manufacturing. [Jelektronnyj resurs] - <https://ceur-ws.org/Vol-2615/paper5.pdf>
- [17] Ali, M.L., Patel, P., Breslin, J.G., Harik, R. and Sheth, A. 2021. Cognitive Digital Twins for smart manufacturing. IEEE Intelligent Systems, 36(2): 96–100
- [18] Ibrahim Yitmen, and Sepehr Alizadehsalehi. Synopsis of Construction 4.0-based Digital Twins to Cognitive Digital Twins. Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim Yitmen Department of Construction Engineering & Lighting Science Jönköping University, Jönköping, Sweden. © 2023 Ibrahim Yitmen CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC. P. 240. P.20-38
- [19] Zheng, X., Lu, J. and Kiritsis, D. 2021. The emergence of cognitive digital twin: Vision, challenges and opportunities. International Journal of Production Research, 1–23.
- [20] Adl, A.E. 2016. The Cognitive Digital Twins: Vision, Architecture Framework and Categories. Agrawal, A., Singh, V., Thiel, R., Pillsbury, M., Knoll, H., Puckett, J. and Fischer, M. 2022. Digital twin in practice: Emergent insights from an ethnographic-action research study. Construction Research Congress, 2022: 1253–1260.
- [21] Lv Z., Fridenfolk M. Digital Twins for Building Industrial Metaverse //Journal of Advanced Research. 2023 - <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.019>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123223003594?via%3Dihub>
- [22] Z. Lv, L. Qiao, Y. Li, et al. Blocknet: Beyond reliable spatial digital twins to parallel metaverse[J] Patterns, 3 (5) (2022), Article 100468 View PDFView articleView in Scopus Google Scholar .
- [23] Y. Han, D. Niyato, C. Leung, et al. A dynamic hierarchical framework for iot-assisted digital twin synchronization in the metaverse[J] IEEE Internet of Things Journal, 10 (1) (2022), pp. 268-284 .
- [24] X. He. The Innovative Development of Chinese Vocational Education from the Perspective of the Metaverse [J] Journal of Education and Educational Research, 1 (2) (2022), pp. 8-12.
- [25] M. Kovacova, J. Oláh, G.H. Popescu Diital twin simulation and modeling tools, deep learning object detection technology, and visual perception and sensor fusion algorithms in the metaverse commerce[J] Economics, Management and Financial Markets, 17 (3) (2022), pp. 9-
- [26] A.K. Tyagi, N. Sreenath. Cyber Physical Systems: Analyzes, challenges and possible solutions[J]. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 1 (2021), pp. 22-33.

- [27] Stothard P. Mining Metaverse—a future collaborative tool for best practice mining //Mining Technology. 2023. T. 132. #. 3. S. 165-178. <https://doi.org/10.1080/25726668.2023.2235155>.
- [28] Metamandrill. 2022. The Metaverse guide - The internet's evolution. Netherlands. <https://metamandrill.com/wp-content/uploads/2022/07/Metamandrill.com-The-Metaverse-Guide-The-Internets-Evolution-version-1.6.pdf>.
- [29] Guy LeBlanc Smith, Con Caris, Gil Carter Virtual Mine Technology. CSIRO - Exploration and Mining, 2643 Moggill Road, Pinjarra Hills, Brisbane, Queensland 4069. Conference Paper October 2000 DOI: 10.13140/RG.2.1.4989.6083.
- [30] Stothard et al. (2019) Stothard P, Squelch A, Stone R, Wyk Ev. 2019. Towards sustainable mixed reality simulation for the mining industry. *Min Technol*.
- [31] Stothard P. Mining Metaverse—a future collaborative tool for best practice mining //Mining Technology. 2023. T. 132. #. 3. S. 165-178. <https://doi.org/10.1080/25726668.2023.2235155>.
- [32] Qu J. et al. Developing a digital twin for a laboratory ball mill operation—a step towards mining metaverse //Mining Technology. 2024. S. - 25726668231222990. <https://doi.org/10.1177/25726668231222990>.
- [33] Adeagbo M. O., Wang S. M., Ni Y. Q. Revamping structural health monitoring of advanced rail transit systems: A paradigmatic shift from digital shadows to digital twins //Advanced Engineering Informatics. – 2024. T. 61. S. 102450. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102450>.
- [34] M. Zawishet et al., "AI and 6G Into the Metaverse: Fundamentals, Challenges and Future Research Trends," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 730-778, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3349465.
- [35] Yann Le Franc1. OntoCommons D3.2 - Report on existing domain ontologies in identified domains. OntoCommons - Ontology-driven data document ation for Industry Commons, has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement no. 958371. <https://zenodo.org/record/6504553#.Y3T19r1ByM8>.
- [36] Ibrahim Yitmen, Sepehr Alizadehsalehi, Ilknur Akiner and Muhammed Ernur Akiner. Knowledge Graph-based Approach for Adopting Cognitive Digital Twins in Shop-floor of Modular Production. Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure Challenges, Opportunities and Practices. Editor Ibrahim. CRC Press. 4 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4RN. © 2023. p.p. 79-100.
- [37] Papadopoulou, E., Bardi, A., Kakalettris, G. et al. Data management plans as linked open data: exploiting ARGOS FAIR and machine actionable outputs in the OpenAIRE research graph. *J Biomed Semant* 14, 17 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13326-023-00297-5>
- [38] 'FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship' - <https://www.go-fair.org/fair-principles/>.
- [39] The U.S. Government's Open Data, [Jelektronnyj resurs] - <https://www.data.gov/>.
- [40] Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, Fourth Edition, INCOSE, 2015.
- [41] Pang, T.Y.; Pelaez Restrepo, J.D.; Cheng, C.T.; Yasin, A.; Lim, H.; Miletic, M. Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1097. <https://doi.org/10.3390/app11031097>.
- [42] Azad M. Madni, Carla C. Madni and Scott D. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems* 2019, 7, 7; doi:10.3390/systems7010007.
- [43] Michael Jacoby and Thomas Usländer, Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape, *Appl. Sci.* 2020, 10(18), 6519; <https://doi.org/10.3390/app10186519>, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6519/htm>.
- [44] PNST 864-2023. PREDVARITEL'NYJ NACIONAL'NYJ STANDART ROSSIJSKOJ FEDERACII UMNJE (SMART) STANDARTY. Obshhie polozhenija.
- [45] Svetlana DMITRIEVA. Umnye (SMART) standarty: pervye itogi. Biznes, tehnologii, upravlenie. *CONNECT* # 3-4, 2024, s.120-121 | - https://www.connect-wit.ru/wp-content/uploads/2024/04/BTU_Dmitrieva.pdf.
- [46] Xia, Yuchen, et al. "LLM experiments with simulation: Large Language Model Multi-Agent System for Process Simulation Parametrization in Digital Twins." *arXiv preprint arXiv:2405.18092* (2024).
- [47] Yang, Hanqing, Marie Siew, and Carlee Joe-Wong. "An LLM-Based Digital Twin for Optimizing Human-in-the Loop Systems." *arXiv preprint arXiv:2403.16809* (2024).
- [48] Sun, Yicheng, et al. "Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning." *Journal of Manufacturing Systems* 74 (2024): 83-99.
- [49] Digital Twin + LLM = Large Reality Model? <https://www.linkedin.com/pulse/digital-twin-llm-large-reality-model-janne-hietala-mm4f/> Retrieved: Ogtb 2024
- [50] Roznichnaja trgovlja v cifrovoj jekonomike / V. P. Kuprijanovskij, S. A. Sinjagov, D. E. Namiot [i dr.] // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – T. 4, # 7. – S. 1-12. – EDN WCMIWN.
- [51] Volkov, A. A. O zadachah sozdaniya jeffektivnoj infrastruktury sredy obitanija / A. A. Volkov, D. E. Namiot, M. A. Shneps-Shneppe // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2013. – T. 1, # 7. – S. 1-10. – EDN ROMIZX.
- [52] Iskusstvennyj intellekt kak strategicheskij instrument jekonomicheskogo razvitiya strany i sovershenstvovaniya ee gosudarstvennogo upravlenija. Chast' 2. Perspektivy primeneniya iskusstvennogo intelekta v Rossii dlja gosudarstvennogo upravlenija / I. A. Sokolov, V. I. Drozhzhinov, A. N. Rajkov [i dr.] // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2017. – T. 5, # 9. – S. 76-101. – EDN ZEQDMT.
- [53] Namiot, Dmitry, et al. "Digital twins and discrete-event simulation systems." *International Journal of Open Information Technologies* 9.2 (2021): 70-75.
- [54] Kurganova, Nadezhda, et al. "Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization." *International Journal of Open Information Technologies* 7.5 (2019): 105-115.
- [55] Kupriyanovsky, Vasily, et al. "The ontologies of cyber-physical systems of the national digital twin of Great Britain and BIM on the examples of smart cities, railways, and other projects." *International Journal of Open Information Technologies* 9.3 (2021): 91-130.