



Journal of Advanced Research  
Available online 24 November 2023  
In Press, Journal Pre-proof What's this? 7



Digital Twins for Building Industrial

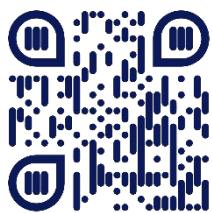
Lv Z., Fridenfalk M. Digital Twins for Building Industrial Metaverse  
Journal of Advanced Research. – 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.019>

Статья опубликована: 24 ноября 2023 г.

Относится к специальному выпуску «Управление инновациями в организациях в цифровую эпоху»

Тема статьи:

# Цифровые двойники для создания промышленной метавселенной



Сигнальный перевод подготовлен экспертом рабочей группы:  
Куприяновский В.П. [v.kupriyanovsky@rut.digital](mailto:v.kupriyanovsky@rut.digital) 2023 г.



Рабочая группа по сквозным цифровым технологиям  
Совета по финансово-промышленной и инвестиционной политике  
Торгово-промышленной палаты Российской Федерации

При поддержке:



## **Абстракт**

Концепция метавселенной — виртуального мира, в котором пользователи могут взаимодействовать с компьютерной средой, — в последнее время привлекла значительное внимание. Данное исследование направлено на изучение применения и фундаментальных технологий цифровых двойников (DT) при разработке промышленной метавселенной для повышения эффективности заводского производства. В исследовании используется подход обзора литературы для изучения архитектуры и ключевых технологий промышленной метавселенной, включая DT, облачный рендеринг, виртуально-реальное взаимодействие, визуализацию больших данных и Интернет вещей. Во-первых, в этом исследовании анализируется архитектура и ключевые технологии промышленной метавселенной, которые охватывают DT, облачный рендеринг, взаимодействие в виртуальной реальности, визуализацию больших данных и Интернет вещей (IoT). Эти технологии являются важными компонентами, обеспечивающими переход от традиционных производственных парадигм к интеллектуальному производству в промышленной метавселенной. Во-вторых, в данном исследовании исследуются ключевые технологические аспекты, поддерживающие DT в промышленной метавселенной. В нем подчеркивается решающая роль, которую играет DT в содействии развитию и реализации интеллектуального производства. Исследование показало, что DT играет решающую роль в промышленной метавселенной, позволяя создавать виртуальные копии физических активов, которые можно отслеживать и анализировать в режиме реального времени. Развитие промышленной метавселенной обладает значительным потенциалом для промышленного сектора, предоставляя платформу для оптимизации и улучшения производственных процессов.

## **Ключевые слова**

*Цифровые двойники, промышленная метавселенная, интернет вещей, блокчейн, виртуальная реальность*

## Знакомство

Промышленная метавселенная — важнейшее звено с большим потенциалом в экономике метавселенной. Она формирует новую производственную модель, основанную на человеческом сотрудничестве, виртуальном и реальном взаимном контроле, цифровой интеграции путем глобального восприятия, двойниковом моделировании и углубленном моделировании сложных промышленных сценариев [1], [2], [3]. В частности, промышленная метавселенная опирается на сенсорные технологии, интерактивные технологии расширенной реальности (XR), трехмерное (3D) моделирование, технологию рендеринга в реальном времени для игр и технологию восприятия данных в Интернете вещей (IoT). Взаимодействие восприятия человека, машины и объекта и центральный замкнутый цикл слияния проектирования, производства, эксплуатации и оптимизации (DMOO) в настоящее время являются важными вопросами для промышленной метавселенной. В промышленной метавселенной на основе цифровых фабрик создано несколько примеров сценариев применения в различных отраслях промышленности. Кроме того, государственные гранты активно стимулируют бизнес участвовать в цифровой трансформации, добиваясь эффекта маяка за счет создания образцовых демонстрационных проектов, разрывая центральный замкнутый цикл DMOO [4], [5]. Одним из многочисленных преимуществ промышленной метавселенной является возможность создания DT.

Тяги и Сринат (2021) [6] предположили, что промышленная метавселенная — это расширение концепций и технологий, таких как цифровые двойники (DT) и киберфизические системы в мире метавселенной. Технология DT позволяет объединять данные из различных измерений реальности, включая физические объекты, человеческое общество и экономическое поведение, для создания диверсифицированной цифровой среды. Этот метод может дать пользователям яркий, богатый и интерактивный виртуальный опыт с высокой степенью свободы в виртуальном пространстве. Технология метавселенной DT имеет различные сценарии применения, включая игры, образование, здравоохранение, финансы и промышленность, которые могут реализовать цифровую трансформацию и инновации интеграции виртуального и реального [7], [8], [9]. Промышленная метавселенная чрезвычайного масштаба и сложности может быть достигнута путем создания DT целых систем на заводах, в аэропортах, грузовых терминалах или городах, а не только DT отдельных машин или устройств. По мнению Chen et al. (2022) [10], достижения и применение технологии DT будут способствовать ее расширению в новое измерение, обеспечивать интеллектуальную интеграцию и сотрудничество виртуального и реального миров, а также продвигать человеческую цивилизацию. ABI Research прогнозирует, что к 22 году рынок промышленного DT, моделирования и XR вырастет до более чем 2025 миллиардов долларов США, поскольку все больше компаний используют технологии Индустрии 4.0, такие как искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение, периферийные вычисления и XR, для ускорения своей цифровой трансформации [11].

Технология DT открывает возможности для оптимизации и совершенствования производственных процессов. Создание моделей и симуляций производственных линий позволяет прогнозировать эффективность производства, качество продукции и использование ресурсов, облегчая необходимые корректировки оптимизации. Например, General Electric использует технологию DT для моделирования ветряных турбин для повышения производительности и снижения затрат на техническое обслуживание. Аналогичным образом, проверка проекта, обнаружение коллизий и оптимизация строительства могут быть выполнены путем построения цифровых моделей зданий в виртуальной среде. Кроме того, технология DT находит применение в управлении объектами,

включая мониторинг и оптимизацию использования энергии, технического обслуживания оборудования и эксплуатационных расходов в зданиях. Моделирование энергетических сетей, оборудования для выработки электроэнергии и факторов окружающей среды позволяет оптимизировать производство и распределение энергии, тем самым повышая энергоэффективность.

Если взять в качестве примера Индустрию 4.0, в которой был реализован DT, то наиболее знакомой для широкой публики ситуацией является промышленная визуализация на большом экране. Предыдущая визуализация на большом экране использовалась для наблюдения за ситуацией на производственной линии, такой как производство, подготовка материала, запасы, затраты и другие данные. Сегодня визуализация на большом экране, включающая DT, может предоставлять предупреждения или прогнозы на основе анализа и расчетов. Эти подсказки позволяют менеджерам быстро изучить состояние производственной линии и любые потенциальные опасности, а также разработать своевременные целевые планы оптимизации. Промышленная метавселенная является основной темой данного исследования. После краткого обзора общей структуры и основных технологий в этом исследовании исследуется технология DT и ее роль в построении промышленной метавселенной. Ожидается, что это исследование обеспечит зрелую систему исследований и разработок (R&D) для ученых в области метавселенной. Новаторство этого исследования заключается в акценте, сделанном на синхронизацию в режиме реального времени, высокому моделированию и интерактивной поддержке принятия решений, а также в изучении потенциала применения DT в различных отраслях. Подчеркивая эти аспекты, данное исследование призвано внести свой вклад в понимание того, как DT может эффективно поддерживать различные отрасли.

Технология DT играет ключевую роль в оптимизации и совершенствовании производственных процессов. Моделирование и симуляция производственных линий позволяют прогнозировать эффективность производства, качество продукции и использование ресурсов, облегчая необходимые корректировки оптимизации. Примечательно, что General Electric использует технологию DT для моделирования ветряных турбин для повышения производительности и снижения затрат на техническое обслуживание. Аналогичным образом, создание цифровых моделей зданий в виртуальной среде позволяет проверять проект, обнаруживать коллизии и оптимизировать строительство. Кроме того, технология DT расширяет свое применение в управлении объектами, охватывая мониторинг и оптимизацию использования энергии, обслуживания оборудования и эксплуатационных расходов. Используя методы моделирования и симуляции энергетических сетей, оборудования для выработки электроэнергии и факторов окружающей среды, можно оптимизировать производство и распределение энергии, тем самым повышая общую энергоэффективность.

## **Значение и ключевые технологии промышленной метавселенной**

### **Суть метавселенной**

Lv (2023) [12] постулировал, что метавселенная соединяет реальный и виртуальный миры и несет в себе цифровое выживание и миграцию человека. Профессор медиа и информации в Университете штата Мичиган Рабиндра Ратан выделил три отличительные характеристики метавселенной: реализм, функциональная совместимость и стандартизация. Метавселенная объединяет различные дисциплины и технологии, включая виртуальную

реальность (VR), дополненную реальность (AR), смешанную реальность, DT, IoT, облачные вычисления, искусственный интеллект и беспроводное новое радио пятого поколения (5G-NR). Технология DT использует данные для создания практически идентичных копий объектов реального мира с использованием данных. AR и VR могут проецировать реальный мир в виртуальный. Интернет вещей реализует тесную взаимосвязь между людьми, вещами и между людьми и вещами. Облачные вычисления — это инициатива, направленная на централизацию глобально рассредоточенных вычислительных ресурсов и противодействие компьютерному пиратству. Искусственный интеллект призван расширить возможности машин к обучению и воспринимать когнитивные способности. Стандарт 5G-NR направлен на своевременную, эффективную и высокую пропускную способность передачи данных. Эти технологии могут быть использованы для создания базового прототипа метавселенной. На рисунке 1 представлена технологическая основа метавселенной.

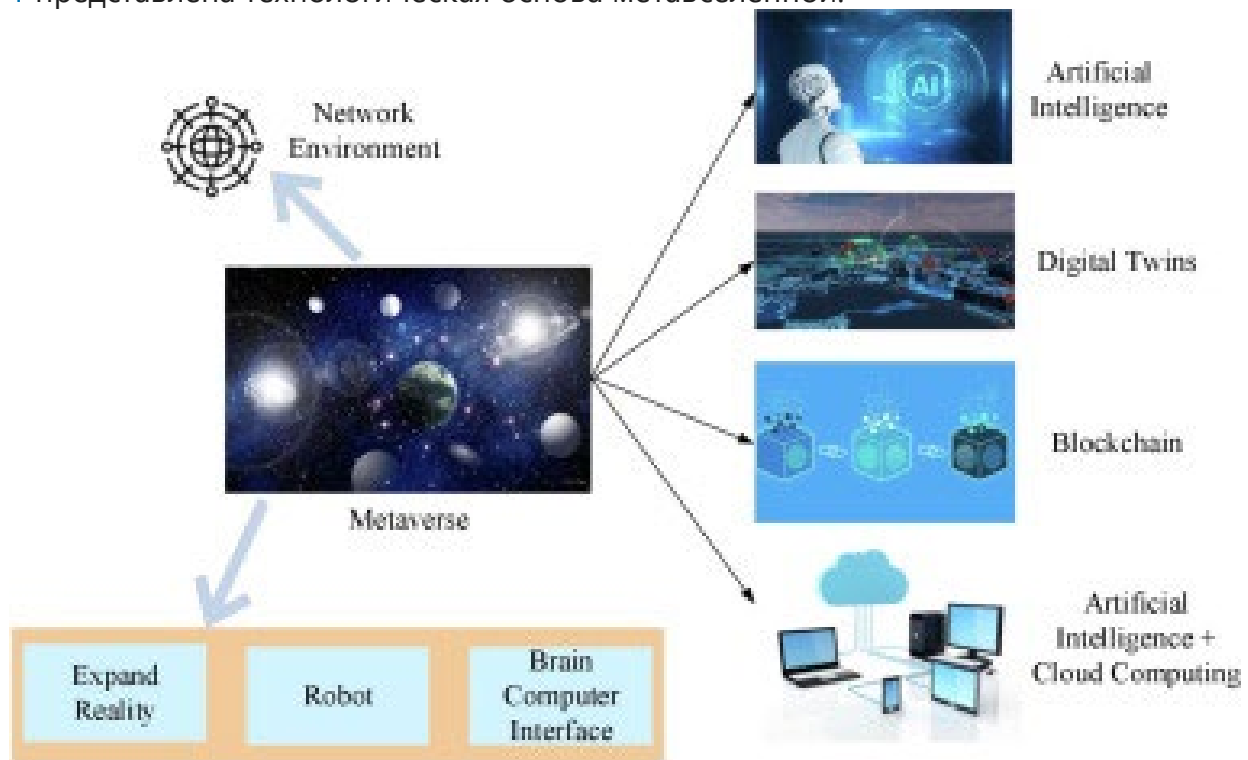


Рисунок 1. Техническая поддержка метавселенной

Он (2022) [13] заявил, что метавселенная по сути является процессом виртуализации и оцифровки реального мира, который требует обширных преобразований производства контента, экономических систем, пользовательского опыта и контента физического мира. Однако развитие метавселенной происходит постепенно; Она поддерживается общей инфраструктурой, стандартами и протоколами и в конечном итоге формируется в результате непрерывной конвергенции и эволюции многих инструментов и платформ. Обширное интерактивное и иммерсивное ощущение метавселенной в реальном времени требует виртуального места, которое может вместить десятки тысяч, если не сотни миллионов пользователей, общающихся одновременно, что отличается от обычных онлайн-игр и конференций.

### Архитектура промышленной метавселенной

В целом, промышленная метавселенная все еще находится в зачаточном состоянии, и сценарии отраслевого применения постепенно реализуются. Она частично или полностью реализована в производстве, градостроительстве, транспорте, автомобилестроении,

строительстве, энергетике [14]. Khalaj et al. (2022) [15] сообщили, что промышленная метавселенная позволила полностью реконструировать промышленную систему в рамках VR, поскольку она всесторонне и системно показала сложную структуру отрасли. Эта реорганизация устраняет барьеры между коммерческими секторами, обеспечивая технологическую промышленную интеграцию и высокую производительность. Javaid et al. (2022) [16] отметили, что промышленная метавселенная сочетает в себе несколько технологий, и ее преодоление требует сложных инструментов и сотрудничества между людьми. Открытый исходный код имеет решающее значение для достижения этой цели. Программное обеспечение с открытым исходным кодом позволяет программистам создавать и распространять фрагмент кода, чтобы другие программы могли использовать его для выполнения определенной задачи. Программное обеспечение как услуга (SaaS) поможет большому количеству компаний получить доступ к промышленной метавселенной. Уровни фундамента, технологии, возможностей, приложения и терминалов компенсируют логическую структуру технической архитектурной цепочки промышленной метавселенной, как показано на рисунке 2. Базовый технологический уровень должен включать интеграцию и инновации нескольких технологических групп в платформу для достижения всестороннего расширения прав и возможностей в соответствующих областях.

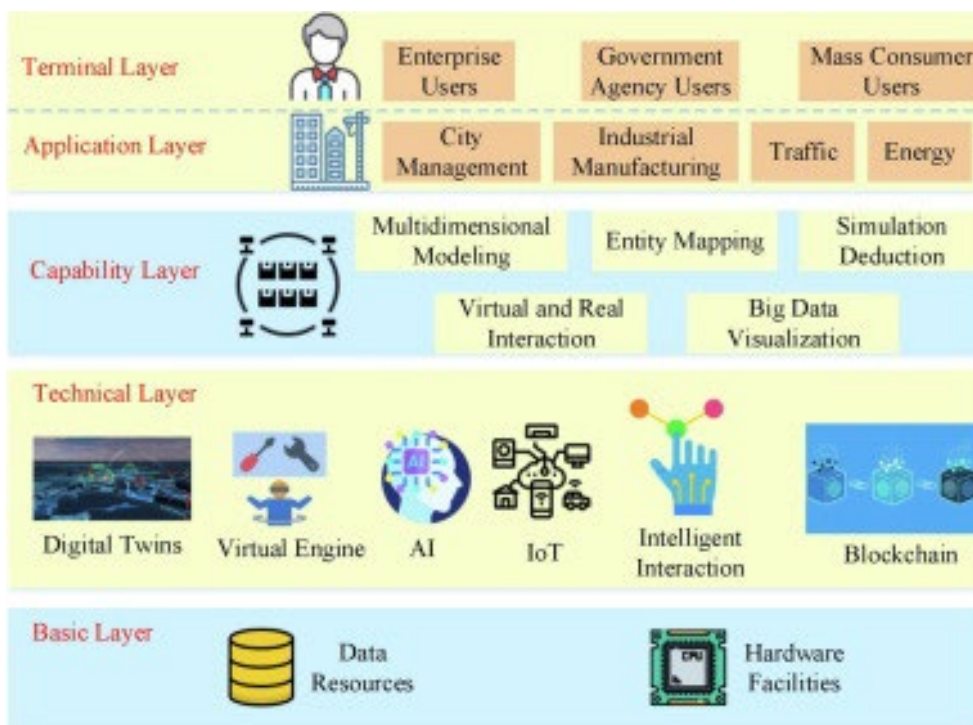


Рисунок 2. Архитектура промышленной метавселенной

Промышленная метавселенная состоит из вспомогательных модулей, приложений и программных активов. Предприятия могут использовать эти компоненты в различных конфигурациях, соединяя их между собой, разрабатывая новые решения с помощью интерфейсов прикладного программирования и устраняя узкие места и проблемы отрасли в соответствии с установленными бизнес-практиками. Решение промышленной метавселенной может быть результатом совместных усилий нескольких партнеров, таких как поставщики технологий и сетей, поставщики оборудования, поставщики облачных услуг, создатели контента и разработчики приложений. Они формируют экологию промышленных метавселенных, которая позволяет выйти на новый уровень инноваций, творчества и эффективного сотрудничества [17], [18], [19].

Kovacova et al. (2022) [20] предположили, что промышленная метавселенная представляет собой параллельный мир, состоящий из DT всех корпоративных элементов физического мира в качестве базовой единицы. Эти ОУП могут включать в себя данные в режиме реального времени о проектировании, исследованиях, разработках, производстве, распространении и продажах законных промышленных предприятий. Операторы могут наблюдать, прогнозировать и оптимизировать развитие бизнеса реальных промышленных компаний на основе DT. Технологии, опыт и лучшие практики в отрасли лежат в основе промышленной модели DT. Самый дешевый и быстрый подход к итерации моделей DT — это взаимодействие, проверка и инновации VR-моделей. Эти процедуры способствуют построению предприятиями инновационной системы открытия, реконструкции, распространения и повторного использования знаний в более широком масштабе, в более широкой области и на более глубоком уровне.

Инфраструктура, включающая DT, облачный рендеринг, взаимодействие между виртуальным и реальным, визуализацию больших данных и промышленный интернет, позволяет применять промышленную метавселенную на практике. Эти технологии, инструменты и платформы позволяют синхронизировать данные о продуктах, услугах или производственных процессах из физического мира в виртуальное пространство. Результаты этих процедур включают в себя цифровые заводские дисплеи, виртуальный пульт дистанционного управления, промышленное моделирование, мониторинг в режиме реального времени, а также эксплуатацию и техническое обслуживание.

### **Ключевые технологии для создания промышленной метавселенной**

Сочетание DT и интерактивных технологий можно рассматривать как шаг к тому, чтобы сделать промышленную метавселенную реальностью. Gallala et al. (2022) [21] выступают за развитие технологии DT путем добавления AR/VR/MR и других технологий для слияния физического и цифрового информационных пространств. Несколько известных технологий активно поддерживают быстрый рост промышленной метавселенной. Эстетика оболочки промышленной метавселенной (иммерсивный опыт) и глубина ее внутренней работы имеют решающее значение для ее успеха как платформы. Технологические краеугольные камни промышленной метавселенной включают в себя технологии Интернета вещей, соединяющие цифровой мир с реальным, технологии виртуального моделирования и различные технологии интеллектуального анализа, такие как статистика, майнинг, прогнозирование и оптимизация. Комбинация этих технологий и составляет DT. Все индустриальные системы являются искусственными системами и согласуются с механистическим редукционизмом. Например, ветряные турбины состоят из двигателей, редукторов, подшипников и другого оборудования общего назначения, а также лопастей, башен и другого фирменного специального оборудования для ветроэнергетики. Как правило, крупная промышленная система состоит из множества более мелких систем, и ее производительность является суммой производительности этих меньших систем.

#### (1) ИИ

По сути, промышленную технологию искусственного интеллекта можно определить как интеллектуальный алгоритм машинного обучения. Он служит системным подходом и правилами, которые могут быть применены к различным отраслям для разработки, различных типов валидации и развертывания в различных сценариях [22].

Многие ученые изучали применение технологий ИИ в промышленном производстве. Tuagi et al. (2021) [23] обсудили применение киберфизических систем, основанных на технологиях DT и AI, в производстве, чтобы обеспечить ориентир для построения интеллекта в производстве. Jagatheesaperumal et al. (2021) [24] представили всесторонний обзор применения ИИ и больших данных в Индустрии 4.0. Они проанализировали, как сочетание искусственного интеллекта и больших данных может помочь в различных приложениях Индустрии 4.0. Также были выделены ключевые проблемы, связанные с успешным внедрением решений на основе искусственного интеллекта и больших данных в интеллектуальные промышленные приложения, чтобы предложить основу для борьбы с вредоносными атаками и проблемами безопасности в промышленном производстве.

В промышленном производственном процессе технология ИИ формирует устойчивые и итеративно модернизируемые возможности промышленного применения путем самоанализа, сравнения, прогнозирования, оптимизации и адаптации. Эта возможность позволяет многократно, эффективно и надежно решать проблемы промышленного производства и обеспечивать многоцелевую оптимизированную работу промышленных производственных процессов с высоким качеством, эффективностью, безопасностью, надежностью и низким потреблением.

## (2) DT

DT — это основа промышленной метавселенной и фундаментальный инструмент для построения виртуальных миров. Однако эти два понятия не являются взаимозаменяемыми. Технология DT генерирует динамические эффекты и динамически воспроизводит твердотельный объект на основе физической модели онтологии, данных обратной связи от датчиков онтологии и истории эксплуатации онтологии [25]. Процесс DT может продолжаться на протяжении всего жизненного цикла продукта, от проектирования, разработки, производства, обслуживания и технического обслуживания до конца его жизненного цикла. Это обеспечивает удобство для предприятий при производстве продуктов и для пользователей в их использовании. Разработка моделей, сбор данных, анализ и прогнозирование, имитационное моделирование и другие области могут выиграть от технологии DT, увеличивая темпы цифровизации промышленности и способствуя дальнейшей конвергенции цифровой и физической экономик [26], [27]. На рисунке 3 показана пятимерная модель DT, состоящая из физического пространства, виртуального пространства, соединения, данных двойника и сервисов. Физическая сущность является основой пятимерной модели DT. Модель виртуальных сущностей включает в себя геометрические, физические, поведенческие модели и модели правил.

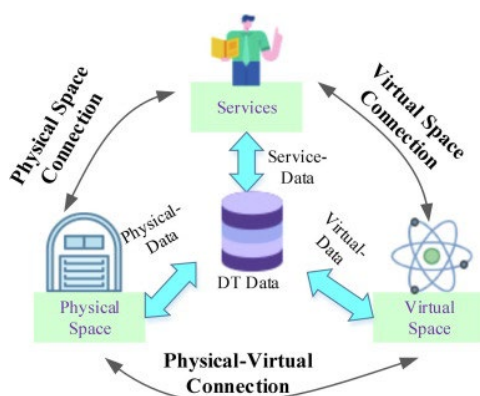


Рисунок 3. Пятимерная модель DT



### (3) Виртуальная реальность

К 2040 году метавселенная может стать неотъемлемой частью повседневной жизни многих людей. Эксперты отрасли сходятся во мнении, что многие будут тяготеть к более аутентичной обстановке. Таким образом, AR-приложения могут использоваться более широко, чем VR-приложения. Как отмечают Popescu et al. (2022) [28], отчасти привлекательность AR заключается в ее удобстве: единственным требованием для входа пользователя в этот цифровой мир является смартфон. Метавселенная, основанная на дополненной реальности, может привлечь большую пользовательскую базу, не требуя от пользователей инвестиций в дорогостоящее оборудование или программное обеспечение.

AR, как правило, не стоит кардинально менять среду пользователей промышленной метавселенной. Он интегрирует цифровую информацию в физический мир, обеспечивая непрерывную связь между виртуальной и физической средами, улучшая пользовательскую среду и обеспечивая более дружелюбный и ориентированный на человека пользовательский опыт. Согласно предложению Козинца (2023) [29], технология дополненной реальности в метавселенной — это метод наложения сгенерированных компьютером изображений на физическую среду. AR-дисплей шлема позволяет пользователям воспринимать мир, в котором компьютерная графика и реальные объекты накладываются друг на друга.

### (4) Высокоскоростные сети и вычислительная база

Метавселенная представляет собой рассвет совершенно новой эры. Для людей шлюзом в метавселенную станет новое поколение технологий мобильной связи в лице 5G-NR и новый тип инфраструктуры для доступа к облачной вселенной. Промышленная метавселенная создала инфраструктуру быстрой сети передачи данных и вычислительную базу. В дополнение к искусственному интеллекту и обработке изображений потребуется специальное оборудование для обработки огромных объемов данных, генерируемых и передаваемых в промышленную метавселенную. Такие технологии, как технологии 5G-NR/6G-NR с низкой задержкой, широким доступом и высокой пропускной способностью, а также оптоволоконные сети, могут обеспечить передачу данных для связи. Высокопроизводительные компьютеры, периферийные вычислительные устройства и центры обработки данных будут соответствовать требованиям к обработке и хранению данных для вычислений [30], [31], [32].

Мощность подключения и вычислительная мощность имеют решающее значение для эволюции метавселенной. Благодаря периферийным вычислениям 5G-NR может приблизить облачные вычисления, возможности хранения и контент к стороне пользователя, уменьшить задержки в сети и улучшить взаимодействие с пользователем. Гарнитуры виртуальной реальности и другие устройства метавселенной выигрывают от низкой задержки и высокой пропускной способности 5G-NR, что позволяет снизить вес, потребление заряда батареи и затраты.

### (5) Блокчейн

Yang et al. (2022) [33] описывают метавселенную как новое интернет-приложение, основанное на протокольной системе Web 3.0, которое сочетает в себе иммерсивный опыт, цифровую идентификацию, экономическую систему и управление виртуальным обществом. Блокчейн обеспечивает соответствующие процессы для достижения максимального

консенсуса в метавселенной, сотрудничество с надзором и последовательность транзакций. Сертификация личности имеет решающее значение в метавселенной. Технология блокчейн может облегчить создание метавселенной с большим количеством пользователей, предоставляя децентрализованный метод идентификации личности [34]. На рисунке 4 показана базовая структура блокчейна, где блоки соединены с помощью соответствующих хэш-кодов.

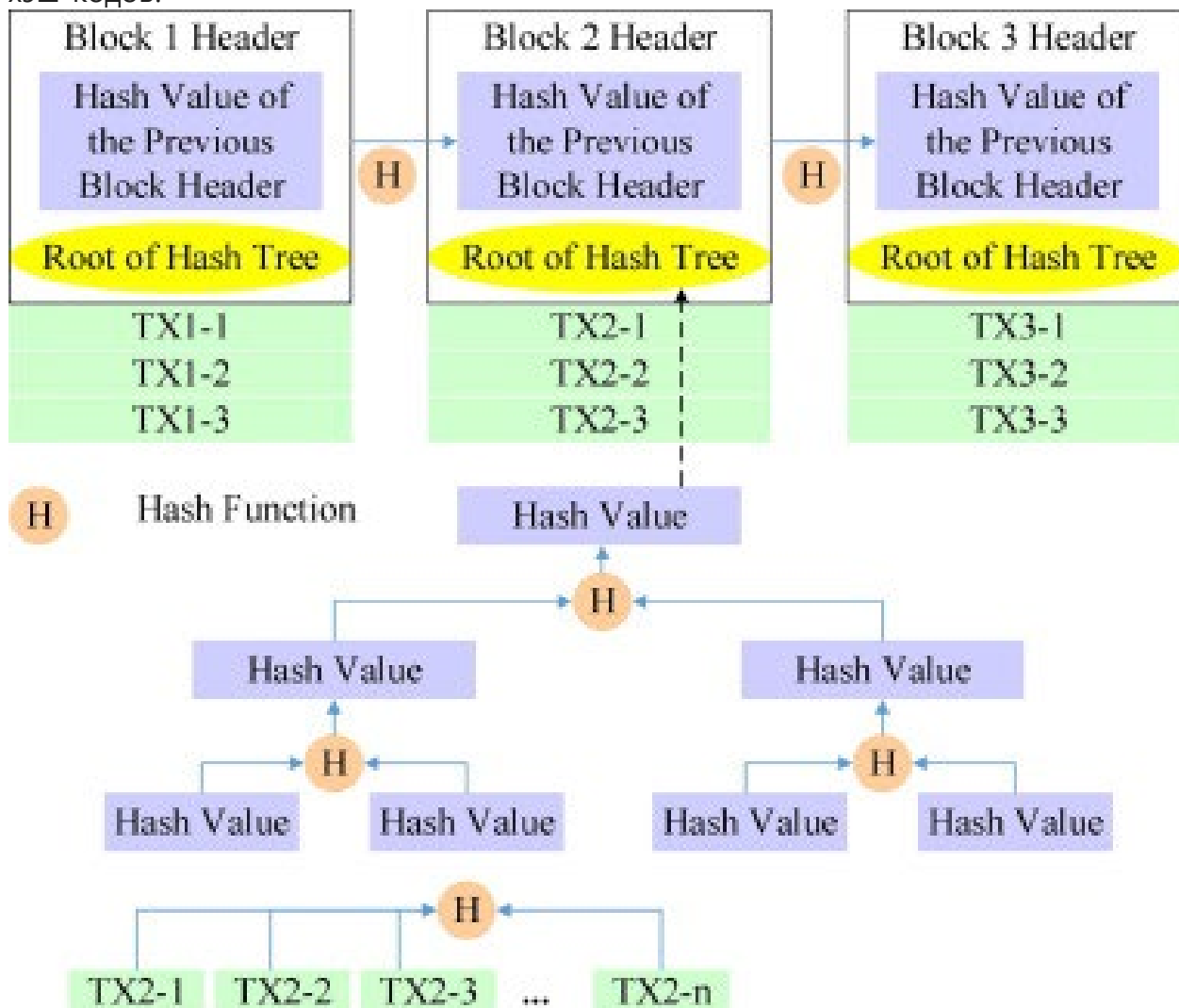


Рисунок 4. Общая структура блокчейна

Как показано на рисунке 4, каждый блок состоит из заголовка блока и списка транзакций. Заголовок блока содержит важные метаданные, включая хэш-код блока, временную метку, целевую сложность и другие соответствующие детали. Между тем, список транзакций охватывает все записанные транзакции в блоке. Хеш-функция используется для обеспечения целостности данных и установления связей между блоками. Этот алгоритм преобразует данные различной длины в строку фиксированной длины. Хэш-код блока играет решающую роль в защите целостности данных и содействии формированию цепной структуры внутри блокчейна. Неизменность блокчейна обеспечивается за счет связывания хэшей-предшественников. Любое изменение данных блока приведет к модификации его хэш-кода, что впоследствии повлияет на связь с последующими блоками.

Взаимозаменяемые токены на основе стандарта ERC-20 и невзаимозаменяемые токены (NFT) на основе стандартов ERC-721 или ERC-1155 являются цифровыми активами. Технология блокчейн является сердцем метавселенной из-за ее способности поддерживать бесперебойную работу экономики. Технология позволяет людям использовать биткоин и

другие криптовалюты в качестве активов в метавселенной для покупки и продажи виртуальных товаров и услуг. Широкое использование инфраструктуры блокчейна позволяет пользователям метавселенной подключаться к широкой криптоэкономике, обменивая виртуальные товары на фиатную валюту. Метавселенная — это виртуальное 3D-пространство, в котором социальная и экономическая деятельность обычно используется так же, как и в реальном мире. В метавселенной NFT выступают в качестве посредников между сторонами и в качестве доказательства права собственности. Технология NFT позволяет осуществлять их децентрализованное распределение и хранение всеми пользователями, подключенными к сети, для подтверждения права собственности на цифровые активы.

Вэй (2022) [35] утверждает, что заинтересованным сторонам в промышленной метавселенной необходимо получать доступ к активам и хранить их в разных виртуальных мирах и использовать различные приложения. Обмен данными ограничен из-за различных контекстов, в которых конструируются эти виртуальные миры. Кроссчейн-протокол может передавать информацию из двух или более блокчейнов в отдельных виртуальных мирах. Пользователи могут легче мигрировать между этими виртуальными мирами благодаря совместимости блокчейна.

### Техническая поддержка DT в промышленной метавселенной

#### Искусственный интеллект и DT в промышленном производстве

(1) Приложения искусственного интеллекта для интеллектуальной модернизации промышленного производства

В промышленных производственных средах производственные данные в режиме реального времени собираются с помощью датчиков и устройств Интернета вещей. Эти данные охватывают различные параметры, включая состояние оборудования, температуру, влажность и давление. Эти данные могут быть легко интегрированы с платформой метавселенной, установив сетевое подключение, устраняя разрыв между виртуальной и физической производственной средой. Применение метавселенной к производственным процессам в промышленном производстве позволяет в режиме реального времени отслеживать различные этапы производственной линии и облегчает оптимизацию. Платформа метавселенной предлагает возможности анализа и визуализации данных в режиме реального времени, позволяя производителям выявлять узкие места и возможности оптимизации на производственной линии. Эта бесценная информация позволяет оптимизировать планирование производства и распределение ресурсов, что приводит к повышению эффективности производства и качества продукции. С помощью метавселенной можно выполнять виртуальное моделирование и оптимизацию производственных линий и процессов в промышленном производстве. Комбинируя данные и модели физических систем с цифровыми представлениями в метавселенной, можно проводить виртуальные эксперименты и симуляции для оптимизации производственных процессов и точной настройки параметров процессов. Такой подход минимизирует затраты на метод проб и ошибок и ускоряет циклы разработки продукта.

Промышленному ИИ предстоит пройти долгий путь, прежде чем его можно будет использовать на широкой основе. Мировые «фабрики-маяки», которые являются авангардом промышленного ИИ, продемонстрировали, что эта область произведет революцию в сфере

продуктовых услуг, производственных операций и организационных процессов, породит новые, потенциально разрушительные бизнес-модели и послужит катализатором модернизации производства [36].

Производственный ИИ был предметом обширного изучения учеными. Когда дело доходит до восприятия окружающей среды, ее моделирования, оптимизации, принятия решений, осуществления автономного интеллектуального управления, обнаружения неисправностей и анализа рисков, Qian et al. (2021) [37] обнаружили, что методы ИИ дают существенные преимущества. Используя глубокое обучение, Zhou et al. (2022) [38] представили кооперативный подход к измерению неравномерно распределенных отклонений в промышленном IoT. Было обнаружено, что подход значительно повышает точность классификации на основе коррекции смещения распределения с использованием переклассифицированных данных.

Singh et al. (2023) [39] всесторонне проанализировали методы и возможности ИИ, связанные с периферийными вычислениями или периферийным ИИ. Они также обсудили преимущества развертывания алгоритмов ИИ на периферийных устройствах и их применение в промышленном производстве, что позволяет применять технологии ИИ для информирования о позиционировании центров обработки данных и интеллектуальных инновациях в промышленном производстве.

(2) DT применяется для мониторинга промышленного производства в режиме реального времени

DT является жизненно важным ресурсом для внесения долгосрочных изменений в производственные процессы. Sepasgozar et al. (2023) [40] сообщили, что реализация концепции DT может открыть путь для использования других цифровых технологий и инноваций. Эти инновации и технологии будут поддерживать базовую структуру в постоянном состоянии совершенствования для поддержки дальнейшего расширения бизнеса. Кроме того, с помощью гипотетического анализа DT можно смоделировать различные сценарии для оптимизации производительности физического двойника. Понимание поведения отдельных машин и интеграции систем имеет решающее значение для достижения бизнес-результатов в цепочке поставок. DT может обеспечить прозрачность и прозрачность функционирования машин и взаимосвязанных систем.

Kagita et al. (2021) [41] показали, что методика DT позволяет создавать виртуальные модели крупных промышленных предприятий для повышения безопасности, производительности и эргономики за счет корректировки архитектуры рабочей зоны. Кроме того, интеллектуальное производство продемонстрировало повышенную степень автоматизации, гибкости и адаптации к изменяющимся сочетаниям материалов и ценностям, поддерживающим его деятельность. Следовательно, цифровизация имеет решающее значение во многих аспектах промышленной деятельности, таких как повышение производительности, снижение затрат и увеличение прибыли за счет новых товаров, услуг и даже целых отраслей. Wang et al. (2022) [42] использовали фреймворк DT, основанный на машинном обучении, для оптимизации производства в нефтехимической промышленности. Сочетание DT с машинным обучением, Интернетом вещей и технологиями обработки данных значительно упростило переход от традиционного к интеллектуальному производству. Эта структура может принести пользу промышленному производству, повышая степень адаптивности и автоматизации во многих процессах. Следовательно, технология DT также рассматривается как важнейшее решение для расширения функциональности взаимосвязанных устройств в цифровых системах наблюдения, адаптивных и автономных системах.

Некоторые компании рассматривают DT как важнейший инструмент для повышения эффективности. Результаты исследований показывают, что компании могут справиться с растущей сложностью процесса управления заказами и повысить свою адаптивность и прибыль, включив DT в производственные системы [43]. Эта технология также используется для улучшения непрерывного цифрового управления и активных операций машин, а также для объединения продуктов в сеть. Кроме того, внедрение DT может улучшить как вертикальную, так и горизонтальную интеграцию в производственных сетях. Эта стратегия перспективна в условиях роста цен на ресурсы и непредсказуемости потребительского спроса [16].

(3) DT применяется в промышленном производстве для прогнозирования срока службы и технического обслуживания

Технологии Индустрии 4.0 улучшают адаптивность всего производственного процесса. К таким технологиям относятся IoT, большие данные, искусственный интеллект, аддитивное производство, передовая робототехника, виртуальная реальность, облачные вычисления, моделирование и т.д., призванные повысить гибкость всей производственной системы.

Будущие действия активов и последствия сбоев можно предвидеть с помощью DT. Оставшийся срок службы физического двойника можно оценить, используя комбинацию физических моделей и аналитики на основе данных. Например, DT может предлагать целевое профилактическое обслуживание, непрерывно собирая данные из промышленного Интернета вещей. Son et al. (2022) [44] отметили, что DT может играть жизненно важную роль в раннем предупреждении, прогнозировании и оптимизации производственных процессов или услуг, создавая отражение действий физического двойника. В связи с необходимостью минимизации эксплуатационных простоев, затрат на техническое обслуживание и капиталовложений в некоторых отраслях промышленности внедряется стратегия упреждающего технического обслуживания, что делает использование моделей DT все более важным [45], [46]. Тем не менее, исследования в области технического обслуживания на основе цифровых технологий все еще находятся в зачаточном состоянии; Такие проблемы, как ограничения на хранение разнородных данных и обратная связь по результатам прогнозирования, остаются. Для решения этой проблемы Al-Zuoud et al. (2022) [47] предложили схему применения глубокого обучения к модели инструментальной системы для прогнозирования ее состояния.

#### Атаки на систему безопасности и решения для DT Systems

Безопасность новых технологий имеет первостепенное значение. В частности, использование преступниками все более изощренных методов, таких как искусственный интеллект и программы-вымогатели, вызвало всплеск кибератак в последние годы. По этой причине промышленная метавселенная уделяет больше внимания технологиям кибербезопасности. Любое минимальное нарушение работы промышленных данных может иметь далеко идущие последствия для предприятия. Защита конфиденциальности пользователей и их общих данных в промышленной метавселенной для виртуального сотрудничества также будет иметь решающее значение.

#### (1) Угрозы атак на системы DT в промышленном производстве

Потенциальные угрозы безопасности DT подробно описаны ниже. 1. Доступ к системе: Если хакеры получают доступ к DT и извлекут данные или захватят контроль над

реплицированными физическими активами, система может выйти из-под контроля [48], [49], [50]. 2. Кража интеллектуальной собственности: технология DT является образцом интеллектуальной собственности. Хакеры могут реконструировать и реконструировать интеллектуальную собственность, проводя собственные исследования и разработки. Целостность информации: клиентские терминалы, производственные терминалы и серверы проектирования могут играть определенную роль в распространении больших объемов данных, создаваемых в результате функционирования системы DT. Риски для безопасности данных могут возникнуть из-за уязвимостей в любом устройстве из-за постоянно развивающегося характера современных методов сетевых атак. Данные могут потерять свою целостность, когда кто-то получает к ним доступ и вносит несанкционированные изменения. Пользователи должны записывать точную информацию, правильно интерпретировать ее и использовать меры аутентификации и безопасности для защиты данных от подделки.

Некоторые ученые изучали угрозы атак на системы DT промышленного производства. Gerodimos et al. (2023) [51] рассмотрели основы архитектуры IoT, представили протоколы связи, разработанные для технологии IoT, а также исследовали риски безопасности и общие проблемы внедрения в системы IoT для промышленного производства. Наконец, они наметили необходимые действия для расширения и поддержки систем IoT в промышленном производстве в безопасной среде. Khan et al. (2022) [52] предположили, что целью DT является не воссоздание системы (в симуляции или эмуляции), а скорее обеспечение экономически эффективного способа тестирования физической системы. Поверхность атаки, однако, удваивается, когда DT изображен точно. Когда базовые системы организации труднодоступны извне, DT может раскрыть ранее неизвестную информацию. Например, электрооборудование в центре обработки данных ранее могло быть доступно только техническим специалистам, расположенным рядом с терминалом управления. Эта форма инфраструктуры DT может позволить людям удаленно контролировать оборудование, но она также предоставляет хакерам доступ к тому же оборудованию. В режиме копирования события могут быть записаны в реальной системе, а затем воспроизведены при моделировании поведения системы. Двойники и связанные с ними сущности должны быть синхронизированы с помощью показаний датчиков, сетевого трафика или файлов журналов.

## (2) Решения для атак на системы DT в промышленном производстве

Feng et al. (2021) [53] разработали стратегию локализации источника помех на основе мобильного трекера в процессе связи промышленного IoT для решения проблем безопасности, преследующих нынешнюю интеллектуальную промышленную производственную систему биосети DT. Система усовершенствовала шифрование на основе атрибутов в соответствии с потребностями сетевой связи DT в области безопасности и накладных расходов. Между тем, политика контроля доступа может быть использована для шифрования случайных ключей. Кроме того, для сокрытия ключей была использована симметричная схема шифрования, обеспечивающая существенную ценность для безопасной связи систем DT в промышленном IoT. Kandasamy et al. (2022) [54] отметили, что DT может быть использован для моделирования кибератак и разработки планов действий. Технические специалисты могут использовать смоделированные ситуации для оценки и улучшения способности операторов распознавать потенциальные угрозы для системы и принимать корректирующие меры. Традиционные атаки в реальном времени и вредоносное ПО с отличительными характеристиками (например, трояны удаленного доступа, криптографические блокировщики и трояны типа «отказ в обслуживании») могут быть разработаны в DT, в то время как продвинутые скрытые атаки, такие как криптоджекинг, Expert, Mirai и Stuxnet, не могут.

Атаки на безопасность и соответствующие решения системы DT сведены в [таблицу 1](#). DT может воспроизводить различные компрометации систем управления с быстрым реагированием [55], [56]. Операторы узнают, как использовать диагностические инструменты для оценки рисков, поддержания надежности и готовности систем безопасности, а также принятия корректирующих мер в случае сбоя управления. Они могут использовать DT для отслеживания и анализа уязвимостей безопасности, расчета расхождений между текущими и планируемыми стандартами безопасности, определения конкретных целей безопасности и приоритизации киберрисков на основе их влияния на повседневные операции.

Таблица 1. Атаки на безопасность и решения в системах DT

Атака на систему безопасности	Решения
Хакеры получают доступ к системам	Моделируйте кибератаки в DT и разрабатывайте стратегии реагирования.
Кража собственности	Встраивайте водяные знаки или цифровые подписи в данные DT для отслеживания.
Нарушение целостности данных	Используйте алгоритм хеширования для проверки данных и цифровые подписи на подлинность.

### Перспективы применения промышленной метавселенной

Целью промышленной метавселенной должна быть интеграция большого объема данных, обширные экологические партнеры, профессиональный промышленный метасимбиоз, точные/недорогие алгоритмы, отличное DT, точное производство по требованию, низкая цена продукта/услуги, специальные/индивидуальные услуги продукта, высококачественный пользовательский опыт, устойчивая лояльность пользователей, хорошая экологическая репутация и высокие преимущества симбионтов [57].

По данным Skalidis et al. (2022) [58], промышленная метавселенная сияет в производственном секторе, где на первый план выходят такие сценарии, как проектирование цифровых продуктов, управление процессами и обширное управление оборудованием. В городском управлении промышленная метавселенная облегчает весь спектр действий, связанных с существованием города, включая концепцию, проектирование, строительство, администрирование и оптимизацию. Транспортная и автомобильная промышленность используют промышленную метавселенную для проектирования и разработки функциональных транспортных средств, имитационных испытаний, автономного вождения, обнаружения дефектов и обслуживания оборудования. Промышленная метавселенная облегчает пять ключевых процессов строительной отрасли: подготовку к строительству, проектирование, строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание. Промышленную метавселенную можно использовать для различных целей в энергетическом секторе, включая генерацию, распределение, передачу, хранение, управление и потребление. Большинство кейсов в промышленной метавселенной на данном этапе ближе к применению технологии DT. Будущие сценарии применения промышленной метавселенной будут охватывать весь

жизненный цикл продукта, от исследований и разработок до послепродажной поддержки, направляя и стимулируя оптимизацию и повышение эффективности промышленных процессов. Ниже рассматриваются потенциальные сценарии применения промышленной метавселенной, начиная с проектирования НИОКР, оптимизации производства, эксплуатации и обслуживания оборудования, тестирования продуктов и обучения навыкам. На рисунке 5 показаны предполагаемые промышленные сценарии, реализованные в будущей промышленной метавселенной.



Рисунок 5. Перспективы промышленных сценариев на основе промышленной метавселенной

В промышленных производственных средах производственные данные в режиме реального времени собираются с помощью таких технологий, как датчики и устройства Интернета вещей. Эти данные охватывают различные параметры, включая состояние оборудования, температуру, влажность и давление. Сетевое подключение соединяет эти источники данных с платформой метавселенной, устанавливая бесшовное соединение между виртуальной и физической производственной средой. Мониторинг различных этапов производственной линии в режиме реального времени становится возможным благодаря применению метавселенной к производственным процессам в промышленном производстве, что позволяет постоянно оптимизировать усилия. Платформа метавселенной предоставляет возможности анализа и визуализации данных в режиме реального времени, помогая производителям выявлять узкие места и возможности оптимизации на производственной линии. Это, в свою очередь, способствует оптимизации планирования производства и распределения ресурсов, что в конечном итоге повышает эффективность производства и качество продукции. В метавселенной производственные линии и процессы в промышленном производстве могут подвергаться виртуальному моделированию и оптимизации. Интегрируя данные и модели из физических систем с цифровыми моделями в метавселенной, можно проводить виртуальные эксперименты и симуляции для оптимизации производственных процессов и точной настройки параметров процессов. Такой подход значительно снижает



затраты на метод проб и ошибок и ускоряет циклы разработки продукции, что приводит к повышению производительности и внедрению инноваций в промышленном производстве.

Промышленность предлагает идеальную среду для развития метавселенной до тех пор, пока она может определить востребованные сценарии применения [59], [60]. Проектные работы на высшем уровне имеют решающее значение для роста промышленной метавселенной, поскольку здесь отражены масштабы Интернета, масштаб ценности больших данных и глубина экономики впечатлений. Кроме того, важное значение имеет совершенствование современных цифровых технологий, а также координация и поддержка между дисциплинами. Постоянное совершенствование и широкое внедрение связанных с ними технологий и решений для промышленной метавселенной будет поддерживать рост рынка и экономию за счет масштаба. Рост рынка и эффекты масштаба в промышленной метавселенной представляют собой возможность для промышленных предприятий, особенно тех, кто заинтересован в цифровой трансформации и повышении эффективности за счет использования новых технологий и организационных структур [61]. Предприятия должны воспользоваться окном исследований технологий промышленных метавселенных и изобретения сцены, объединить свое положение и рынок, выбрать сцены, подходящие для метавселенных, исследовать и внедрять инновации, а также как можно скорее захватить технологическую высоту.

## **Заключение**

Это исследование в первую очередь сосредоточено на концепции промышленной метавселенной, охватывающей ее фундаментальную структуру и ключевые технологии. Кроме того, в этом исследовании проводится углубленный анализ технологии DT и изучается ее значение в развитии промышленной метавселенной. Пользователи платформы промышленной метавселенной могут улучшить производственный процесс и осуществлять интеллектуальное планирование производства более естественно и удобно, напрямую взаимодействуя с оборудованием и производственными линиями в рамках умного виртуального завода. Технология DT прокладывает путь к различным практическим промышленным приложениям, включая проектирование и моделирование планировки завода, моделирование рабочих станций, интеграцию данных, дистанционное управление и управление визуальными платами. Эти функции обеспечивают поуровневую видимость заводского цеха, производственной линии и оборудования, обеспечивая визуальное управление всем процессом и бережливым производством, значительно повышая производительность и эффективность совместной работы предприятий. Основным вкладом этого исследования является в том, что он представляет всестороннее рассмотрение ключевых технологий, необходимых для построения промышленной метавселенной. В частности, основное внимание уделяется детальному изучению технологии DT. DT обеспечивает точное сопоставление между физическими и виртуальными доменами, тем самым значительно повышая эффективность производства в заводских условиях. Ожидается, что идеи и выводы, полученные в ходе этого исследования, будут стимулировать дальнейшие исследования и способствовать развитию промышленной метавселенной.

## **Декларация о конкурирующих интересах**

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

## References

1. [1]

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 PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

2. [2]

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

[View article](#)

[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

3. [3]

S. Ashraf

A proactive role of IoT devices in building smart cities[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 1 (2021), pp. 8-13

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

4. [4]

Z. Lv, S. Xie, Y. Li, et al.

Building the Metaverse by Digital Twins at All Scales, State, Relation[J]

Virtual Reality & Intelligent Hardware, 4 (6) (2022), pp. 459-470

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

5. [5]

S.B. Far, A.I. Rad

Applying digital twins in metaverse: User interface, security and privacy challenges[J]

Journal of Metaverse, 2 (1) (2022), pp. 8-16

[Google Scholar](#)

6. [6]

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

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

7. [7]

Z. Lv, W.L. Shang, M. Guizani

Impact of Digital Twins and Metaverse on Cities: History, Current Situation, and Application Perspectives[J]

Applied Sciences, 12 (24) (2022), p. 12820

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

8. [8]

L.C. Magalhães, L.C. Magalhães, J.B. Ramos, et al.

Conceiving a Digital Twin for a Flexible Manufacturing System[J]

Applied Sciences, 12 (19) (2022), p. 9864

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

9. [9]

B. Yang, S. Yang, Z. Lv, et al.

Application of Digital Twins and Metaverse in the Field of Fluid Machinery Pumps and Fans: A Review[J]

Sensors, 22 (23) (2022), p. 9294

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

10. [10]

R. Chen, H. Shen, Y. Lai

A metaheuristic optimization algorithm for energy efficiency in digital twins[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2 (2022), pp. 159-169

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

11. [11]

J. Zhang, M. Zong, W. Li

A truthful mechanism for multibase station resource allocation in metaverse digital twin framework[J]

Processes, 10 (12) (2022), p. 2601

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

12. [12]

Lv Z. Metaverse from philosophy[J]. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2023.

[Google Scholar](#)

13. [13]

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

[View article](#)

[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

14. [14]

J. Lee, P. Kundu

Integrated cyber-physical systems and industrial metaverse for remote manufacturing[J]

Manufacturing Letters, 34 (2022), pp. 12-15

[View PDF](#)[View article](#)[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

15. [15]

O. Khalaj, M. Jamshidi, P. Hassas, et al.

Metaverse and AI Digital Twinning of 42SiCr Steel Alloys[J]

Mathematics, 11 (1) (2022), p. 4

[View article](#)

[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

16. [16]

M. Javaid, A. Haleem, R.P. Singh, et al.

Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2 (2022), pp. 49-62

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

17. [17]

Y. Song, S. Hong

Build a secure smart city by using blockchain and digital twin[J]

Int. J. Adv. Sci. Converg, 3 (2021), pp. 9-13

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

18. [18]

S.K. Jagatheesaperumal, M. Rahouti

Building Digital Twins of Cyber Physical Systems With Metaverse for Industry 5.0 and Beyond[J], 24 (2022), pp. 34-40

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

19. [19]

H. Hassani, X. Huang, S. MacFeely

Impactful Digital Twin in the Healthcare Revolution[J]

Big Data and Cognitive Computing, 6 (3) (2022), p. 83

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

20. [20]

M. Kovacova, J. Oláh, G.H. Popescu

Digital 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. 9-24

[Google Scholar](#)

21. [21]

A. Gallala, A.A. Kumar, B. Hichri, et al.

Digital Twin for human–robot interactions by means of Industry 4.0 Enabling Technologies[J]

Sensors, 22 (13) (2022), p. 4950

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

22. [22]

M. Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, A. Keivani, R.C. Moehler, et al.

Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry

A Review, Bibliometric, and Network Analysis[J]., 12 (10) (2022), p. 1503

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

23. [23]

A.K. Tyagi, N. Sreenath

Cyber Physical Systems: Analyses, challenges and possible solutions[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 1 (2021), pp. 22-33

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

24. [\[24\]](#)

S.K. Jagatheesaperumal, M. Rahouti, K. Ahmad, et al.

The duo of artificial intelligence and big data for industry 4.0: Applications, techniques, challenges, and future research directions[J]

IEEE Internet of Things Journal, 9 (15) (2021), pp. 12861-12885

[Google Scholar](#)

25. [\[25\]](#)

X. Wang, J. Yang, J. Han, et al.

Metaverses and DeMetaverses: From digital twins in CPS to parallel intelligence in CPSS[J]

IEEE Intelligent Systems, 37 (4) (2022), pp. 97-102

[Google Scholar](#)

26. [\[26\]](#)

M. Ebadpour, M. Jamshidi, J. Talla, et al.

Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF[J]

Sensors, 23 (4) (2023), p. 2006

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

27. [\[27\]](#)

T. Kaarlela, P. Padrao, T. Pitkäaho, et al.

Digital Twins Utilizing XR-Technology as Robotic Training Tools[J]

Machines, 11 (1) (2022), p. 13

[View article](#)

[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

28. [\[28\]](#)

G.H. Popescu, K. Valaskova, J. Horak

Augmented reality shopping experiences, retail business analytics, and machine vision algorithms in the virtual economy of the metaverse[J]

Journal of Self-Governance and Management Economics, 10 (2) (2022), pp. 67-81

[Google Scholar](#)

29. [\[29\]](#)

R.V. Kozinets

Immersive netnography: a novel method for service experience research in virtual reality, augmented reality and metaverse contexts[J]

Journal of Service Management, 34 (1) (2023), pp. 100-125

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

30. [30]

W. Xu, Z. Yang, D.W.K. Ng, et al.

Edge learning for B5G networks with distributed signal processing: Semantic communication, edge computing, and wireless sensing[J]

IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 17 (1) (2023), pp. 9-39

[View article](#)

[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

31. [31]

L. Chang, Z. Zhang, P. Li, et al.

6G-enabled edge AI for Metaverse: Challenges, methods, and future research directions[J]

Journal of Communications and Information Networks, 7 (2) (2022), pp. 107-121

[View article](#)

[CrossRef](#)[Google Scholar](#)

32. [32]

D. Van Huynh, S.R. Khosravirad, A. Masaracchia, et al.

Edge intelligence-based ultra-reliable and low-latency communications for digital twin-enabled metaverse[J]

IEEE Wireless Communications Letters, 11 (8) (2022), pp. 1733-1737

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

33. [33]

Q. Yang, Y. Zhao, H. Huang, et al.

Fusing blockchain and AI with metaverse: A survey[J]

IEEE Open Journal of the Computer Society, 3 (2022), pp. 122-136

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

34. [34]

S. Mackenzie

Criminology towards the metaverse: Cryptocurrency scams, gray economy and the technosocial[J]

The British Journal of Criminology, 62 (6) (2022), pp. 1537-1552

[View PDF](#)

This article is free to access.

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

35. [35]

D. Wei

Gemiverse: The blockchain-based professional certification and tourism platform with its own ecosystem in the metaverse[J]

International Journal of Geoheritage and Parks, 10 (2) (2022), pp. 322-336

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

36. [36]

L. Cao

Decentralized ai: Edge intelligence and smart blockchain, metaverse, web3, and descii[J]

IEEE Intelligent Systems, 37 (3) (2022), pp. 6-19

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

37. [37]

F. Qian, Y. Jin, S.J. Qin, et al.

Guest editorial special issue on deep integration of artificial intelligence and data science for process manufacturing[J]

IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 32 (8) (2021), pp. 3294-3295

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

38. [38]

X. Zhou, Y. Hu, J. Wu, et al.

Distribution bias aware collaborative generative adversarial network for imbalanced deep learning in industrial IoT[J]

IEEE Transactions on Industrial Informatics, 19 (1) (2022), pp. 570-580

[Google Scholar](#)

39. [39]

R. Singh, S.S. Gill

Edge AI: A survey[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 3 (2023), pp. 71-92

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

40. [40]

S.M.E. Sepasgozar, A.A. Khan, K. Smith, et al.

BIM and Digital Twin for Developing Convergence Technologies as Future of Digital Construction[J]

Buildings, 13 (2) (2023), p. 441

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

41. [41]

M.K. Kagita, G.R. Bojja, M. Kaosar



A framework for intelligent IoT firmware compliance testing[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 1 (2021), pp. 1-7

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

42. [42]

Y. Wang, Y. Tian, J. Wang, et al.

Integrated inspection of QoM, QoP, and QoS for AOI industries in Metaverses[J]

IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 9 (12) (2022), pp. 2071-2078

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

43. [43]

R.S. Ravi, A. Jolfaei, D. Tripathy, et al.

Secured energy ecosystems under Distributed Energy Resources penetration[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2 (2022), pp. 194-202

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

44. [44]

Y.H. Son, G.Y. Kim, H.C. Kim, et al.

Past, present, and future research of digital twin for smart manufacturing[J]

Journal of Computational Design and Engineering, 9 (1) (2022), pp. 1-23

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

45. [45]

M. Kim, D. Hwang, D. Park

Analysis of Maintenance Techniques for a Three-Dimensional Digital Twin-Based Railway Facility with Tunnels[J]

Platforms, 1 (1) (2023), pp. 5-17

[Google Scholar](#)

46. [46]

A.A. Franco, Loup - Escande E, Loiseaux G, et al.

From Battery Manufacturing to Smart Grids: Towards a Metaverse for the Energy Sciences[J]

Batteries & Supercaps, 6 (1) (2023), p. e202200369

[View PDF](#)

This article is free to access.

[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

47. [47]

I. Al-Zyoud, F. Laamarti, X. Ma, et al.

Towards a Machine Learning-Based Digital Twin for Non-Invasive Human Bio-Signal Fusion[J]

Sensors, 22 (24) (2022), p. 9747

[View article](#)

[CrossRefView in ScopusGoogle Scholar](#)

48. [\[48\]](#)

C. Gehrman, M. Gunnarsson

A digital twin based industrial automation and control system security architecture[J]

IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16 (1) (2019), pp. 669-680

[Google Scholar](#)

49. [\[49\]](#)

S. Almeaibed, S. Al-Rubaye, A. Tsourdos, et al.

Digital twin analysis to promote safety and security in autonomous vehicles[J]

IEEE Communications Standards Magazine, 5 (1) (2021), pp. 40-46

[View article](#)

[CrossRefView in ScopusGoogle Scholar](#)

50. [\[50\]](#)

A. Saad, S. Faddel, T. Youssef, et al.

On the implementation of IoT-based digital twin for networked microgrids resiliency against cyber attacks[J]

IEEE transactions on smart grid, 11 (6) (2020), pp. 5138-5150

[View article](#)

[CrossRefView in ScopusGoogle Scholar](#)

51. [\[51\]](#)

A. Gerodimos, L. Maglaras, M.A. Ferrag, et al.

IOT: Communication protocols and security threats[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 3 (2023), pp. 1-13

[View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar](#)

52. [\[52\]](#)

L.U. Khan, W. Saad, D. Niyato, et al.

Digital-twin-enabled 6G: Vision, architectural trends, and future directions[J]

IEEE Communications Magazine, 60 (1) (2022), pp. 74-80

[View article](#)

[CrossRefView in ScopusGoogle Scholar](#)

53. [\[53\]](#)

H. Feng, D. Chen, H. Lv

Sensible and secure IoT communication for digital twins, cyber twins, web twins[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 1 (2021), pp. 34-44

[View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar](#)

54. [\[54\]](#)

N.K. Kandasamy, S. Venugopalan, T.K. Wong, et al.

An electric power digital twin for cyber security testing, research and education[J]

Computers and Electrical Engineering, 101 (2022), Article 108061

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

55. [\[55\]](#)

M. Eckhart, A. Ekelhart

Digital twins for cyber-physical systems security: State of the art and outlook[J]. Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering: With Forewords by Robert M

Lee and Tom Gilb (2019:), pp. 383-412

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

56. [\[56\]](#)

C. Qian, X. Liu, C. Ripley, et al.

Digital twin—Cyber replica of physical things: Architecture, applications and future research directions[J]

Future Internet, 14 (2) (2022), p. 64

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

57. [\[57\]](#)

J.N. Njoku, C.I. Nwakanma, G.C. Amaizu, et al.

Prospects and challenges of Metaverse application in data - driven intelligent transportation systems[J]

IET Intelligent Transport Systems, 17 (1) (2023), pp. 1-21

[View article](#)

[CrossRef](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

58. [\[58\]](#)

I. Skalidis, O. Muller, S. Fournier

The metaverse in cardiovascular medicine: applications, challenges, and the role of non-fungible tokens[J]

Canadian Journal of Cardiology, 38 (9) (2022), pp. 1467-1468

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

59. [\[59\]](#)

D. Chen, N.A. AlNajem, M. Shorfuzzaman

Digital twins to fight against COVID-19 pandemic[J]

Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2 (2022), pp. 70-81

[View PDF](#)[View article](#)[View in Scopus](#)[Google Scholar](#)

60. [\[60\]](#)

H. Wang, D. Chen, Q. Deng

The formation, development and research prospect of educational metaverse[J]

Educ. J, 11 (5) (2022), pp. 260-266

[Google Scholar](#)

61. [\[61\]](#)

M.J. Hsu, H. Ting, T.W. Lui, et al.

Guest editorial: Challenges and prospects of AIoT application in hospitality and tourism marketing[J]

Journal of Hospitality and Tourism Technology, 13 (3) (2022), pp. 349-355

[View article](#)

[CrossRefView in Scopus](#)[Google Scholar](#)