

Методы и технологии разработки цифровых двойников для систем промышленного Интернета вещей

А.М. Нафиков, В.В. Стучилин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Аннотация: Технология цифрового двойника демонстрирует значительный потенциал в преобразовании различных отраслей промышленности благодаря тому, что дает возможность моделировать, анализировать и оптимизировать сложные системы в реальном времени. Интеграция цифрового двойника с промышленным Интернетом вещей открывает новые возможности для инноваций и эффективности. В связи с этим статья посвящена описанию методов и технологий, которые могут использоваться для разработки цифровых двойников в приложениях и системах промышленного Интернета вещей. Отдельное внимание уделено таким методам как: мультифизическое и многомасштабное моделирование, метод жизненного цикла системы, моделирование на основе данных. Также описаны некоторые технологии и архитектуры, которые могут использоваться на трех уровнях создания цифрового двойника для систем промышленного Интернета вещей. **Ключевые слова:** цифровой двойник, модель, система, данные, архитектура, промышленный Интернет вещей, связь, сеть, анализ, датчики.

Введение. Промышленный Интернет вещей (Industrial Internet of Things, IIoT – IIoT) является повсеместным явлением для предприятий, работающих в сфере Индустрии 4.0. Благодаря интеграции передовой аналитики и технологий аддитивного производства, IIoT обеспечивает цифровую трансформацию для создания «умных» продуктов, заводов и услуг [1]. В сочетании с технологиями пятого поколения мобильной связи ценность данных в режиме реального времени, которые используются для мониторинга производительности оборудования или предиктивного обслуживания, на сегодняшний день уже не вызывает сомнений.

Эта гиперподключенная сеть закладывает основу для «умного» производства, но она также может изменить работу дизайнеров, инженеров и конструкторов. Когда датчики и устройства фиксируют данные, проектировщики имеют возможность анализировать их в виртуальном аналоге продукта или процесса, иначе называемом цифровым двойником. Такая связь помогает понять производительность физических активов, а также то, каким образом можно перепроектировать производственный процесс или

оборудование, чтобы получить максимальный эффект [2]. Что касается сложных промышленных систем, то цифровой двойник в синергии с IIoT дает возможность интегрировать изолированные источники данных и на основании их разрабатывать предложения по повышению устойчивости операций. В данном контексте следует отметить, что одной из основных целей IIoT является использование цифрового двойника для получения удовлетворительных характеристик или производительности с целью модернизации системы. Это, в свою очередь, требует новой архитектуры, которая непосредственно позиционирует цифрового двойника с точки зрения улучшения характеристик производственных систем.

С другой стороны, цифровой двойник можно рассматривать как инструмент придания структуры IIoT. IIoT сам по себе полезен, но огромное количество данных может быть непомерно большим, а их обработка традиционными способами невозможна. В данном случае цифровые двойники разбивают информацию на понятные категории - люди, продукты, места, процессы, - которые становятся более четкими и доступными. Однако, несмотря на то, что исследования, связанные с цифровым двойником, в последнее время вызывают особый интерес, все еще существует пробел в предоставлении детальной архитектуры и подходов к разработке цифрового двойника для IIoT, учитывая его сложную природу и комплексные характеристики, которые необходимо принимать во внимание. В связи с этим выбранная тема статьи представляется актуальной, теоретически и практически значимой.

Анализ публикаций по теме исследования. Над разработкой целостной промышленной сети для Индустрии 4.0 на основе цифрового двойника, которая должна обеспечить управление сетью IIoT по замкнутому циклу и расширить функциональные возможности при проектировании и обслуживании оборудования, трудятся Yue Hu, Ning Cao [3], Jeyalakshmi S. [4],

Болдырев П.А. [5].

Особенности методов систематического проектирования для создания цифрового двойника в системах промышленного Интернета вещей, которые упрощают противоречие между виртуальной моделью и сложным поведением физических объектов, обеспечивают функциональную совместимость, взаимозаменяемость и расширяемость, нашли отражение в публикациях Филатова В.В. [6], Prabhat Kiran Thakuri, Lauri Alkki [7], Сахаповой Т.С., Исмагилова Т.Ш., Тихонова В.А. [7].

Способы интеграции данных IIoT с помощью машинного обучения для разработки цифрового двойника, обеспечивающего виртуальное представление больших данных промышленных машин, рассматривают Сахапова Т.С., Исмагилов Т.Ш., Тихонов В.А. [8], Тушавин В., Фролова Е., Чабаненко А.В. [9].

Нерешенные части общей проблемы. В то же время, несмотря на большое количество публикаций по данной тематике, некоторые ключевые моменты требуют более детальной проработки. Так, отдельного внимания заслуживают возможности интеграции различных комплексных технологий создания цифрового двойника, таких, как многодоменное моделирование, оценка состояния, для решения задач, возникающих в сфере промышленного оборудования. Кроме того, нерешенной остается проблема с расширяемостью и возможностью повторного использования решений по разработке цифрового двойника в различных сценариях и в различных местах производственной экосистемы.

Таким образом, **цель статьи** заключается в изучении методов и технологий разработки цифровых двойников для систем промышленного Интернета вещей.

Результаты. Прежде всего, представляется целесообразным формализовать архитектуру цифрового двойника для систем

ПоТ. Это позволит определить и понять совокупность способов и методов создания цифрового двойника в зависимости от особенностей и назначения каждого слоя. Используя результаты проведенного автором анализа научно-экспертной литературы можно сделать вывод, что эталонная архитектура включает в себя «три слоя + четыре атрибута», как показано на рис. 1. В этой архитектуре три уровня относятся к физическому уровню, уровню цифрового двойника и уровню сетей, образуемых цифровым двойником и ПоТ, которые демонстрируют иерархическую структуру по вертикали. В тоже время, четыре атрибута относятся к атрибуту конфиденциальности, атрибуту безопасности, атрибуту осведомленности и атрибуту реального времени, что позволяет определить компоненты, характеристики и перспективные решения в горизонтальной плоскости для поддержки многоуровневой архитектуры.

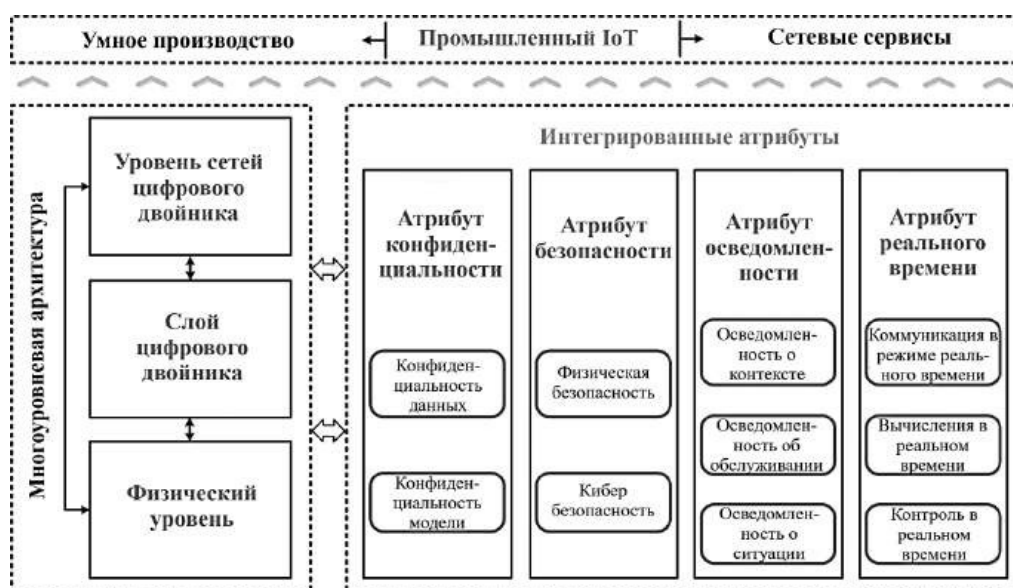


Рис. 1. - Эталонная архитектура цифрового двойника, поддерживающая ПоТ (составлено автором)

Очевидным является тот факт, что эффективная разработка цифрового двойника для систем ПоТ подразумевает применение передовых методов проектирования, моделирования, верификации, валидации, развертывания и сопровождения решений.

Рассмотрим некоторые из наиболее эффективных на сегодняшний день

методов и подходов.

Мультифизическое и многомасштабное моделирование

Моделирование является основной частью цифрового двойника и требует глубокого понимания физических свойств оборудования, процессов и активов, а также их взаимодействий. Поэтому многофизическое поле и многомасштабное моделирование важны для высокоточного создания цифрового двойника в системе IoT [10]. Учитывая тот факт, что практически невозможно избежать расхождений между виртуальной моделью и сложным поведением физических объектов, функционирующих в контуре IoT, одним из компромиссов является использование модульного подхода для достижения гибкости моделирования. Заслуживает внимания предложение ученых, относительно включения модуля «черного ящика» в основную имитационную модель [5, 7]. Различные поведенческие модели цифрового двойника активируются только при необходимости и взаимодействуют с основной имитационной моделью через стандартный интерфейс.

Для достижения баланса инженеры должны определить, какие компоненты являются критическими для функциональности системы, и на основании этого выбрать уровень моделирования каждого компонента перед созданием модели сложной системы. В результате высокоточные модели цифрового двойника для IoT могут быть созданы на основе различных уровней моделирования.

Для модулей «черного ящика» используется стандарт интерфейса функционального макета (FMI), создающий блоки функционального макета (FMU), как показано на рисунке 2.

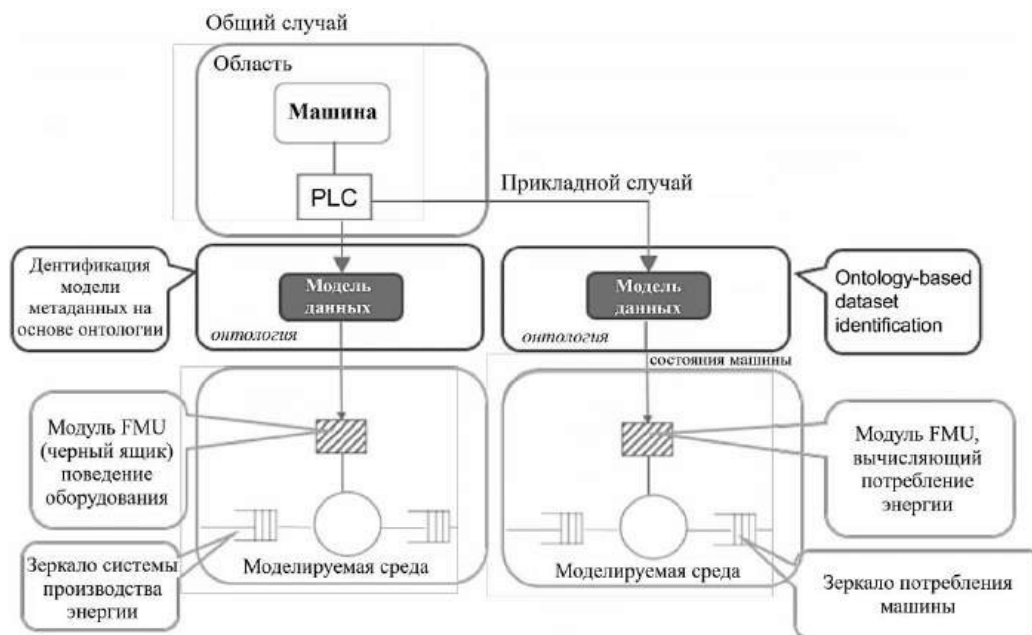


Рис. 2. - Блоки функционального макета для разработки цифрового двойника
(PLC - программируемый логический контроллер) [7]

Метод жизненного цикла разработки системы

Данный метод опирается на процесс, описывающий последовательность действий или этапов, через которые должна проходить разработка модели цифрового двойника, начиная с согласования концепции и заканчивая первоначальным развертыванием и тестированием. Как правило, метод жизненного цикла включает в себя шесть основных этапов, а именно [4]:

(1) этап планирования, который заключается в определении причин разработки цифрового двойника для достижения стратегических целей и задач предприятия;

(2) этап требований и анализа, предполагающий формализацию требований к системе и проведение анализа, определяющего функциональность, которую цифровой двойник должен обеспечить для удовлетворения требований;

(3) этап проектирования, на этом этапе результаты анализа преобразуются в концептуальную модель, которую можно реализовать;

(4) этап разработки, который заключается в реализации проекта с помощью конкретных технологий, таких, как языки программирования, и

превращении его в рабочую систему;

(5) этап тестирования предполагает, что цифровой двойник проверяется на соответствие требованиям к системе;

(6) этап развертывания, на котором система передается конечному пользователю после ее тестирования.

Моделирование на основе данных

Использование только аналитических физических моделей целевых объектов для оценки состояния сложных производственных систем не позволяет получить точные результаты. В данном случае целесообразным является использование подходов, основанных на данных. Чтобы обеспечить работу таких интеллектуальных сервисов, поддерживаемых ИИ, модель цифрового двойника должна быть тщательно проработана с учетом того, как собираются и хранятся данные, как они обрабатываются для моделирования сети в цифровом мире и как реализуются и запрашиваются сервисы для удовлетворения требований приложений.

Представленная на рис. 3 архитектура основана на существующем SDN-решении для беспроводных сенсорных сетей (WSN). Сбор данных из сети ИИ обеспечивается с помощью SDN-контроллера, который получает пакеты, содержащие общую информацию об узлах, и расшифровывает их для построения графа, описывающего топологию сети. Эти пакеты называются отчетами и отправляются периодически, чтобы топология сети всегда обновлялась в SDN-контроллере.

На рисунке 3 представлена подробная архитектура цифрового двойника, который построен с использованием программно-определяемых сетей.

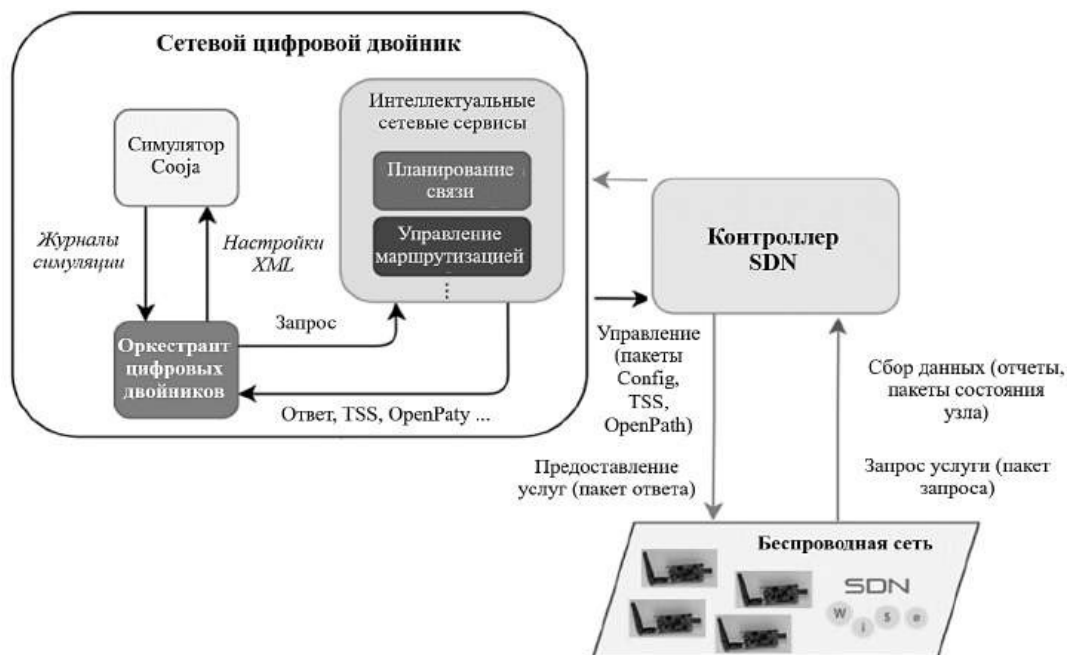


Рис. 3. - Архитектура цифрового двойника, построенного с использованием программно-определяемых сетей (составлено автором)

Физическая сеть взаимодействует с SDN-контроллером для обмена соответствующими данными, такими как общая информация об узлах (например, адрес, зона радиопомех, список прямых соседей и т.д.) или данные, представляющие состояние узла (например, уровень энергии, качество связи, количество отправленных пакетов, количество полученных пакетов и т. д.) и др. SDN-контроллер интерпретирует полученные данные для построения глобальной топологии и сохраняет информацию о состоянии узла, а также построенную топологию. Кроме того, SDN-контроллер выступает в качестве интерфейса между цифровым двойником и физическим аналогом, интерпретируя запросы на обслуживание из реальной сети и переводя их так, чтобы цифровой двойник мог их понять и предоставить запрашиваемый сервис.

В таблице 1 представлено описание некоторых технологий и системных архитектур, которые могут быть использованы на трех уровнях создания цифрового двойника для систем промышленного Интернета вещей.

Таблица № 1

Примеры технологий и системных архитектур для моделирования цифрового двойника на разных уровнях (составлено автором)

1		2		3
Уровень сбора данных		Слой передачи данных		Слой цифрового моделирования
Сбор данных	Набор данных	Сеть и связь	Передача	Виртуальное (3D) моделирование
Датчики температуры, преобразователи перемещения и тензодатчики	Данные механических датчиков	Гибрид проводной и WSN (беспроводной сенсорной сети)	Брокер сообщений MQTT («Транспорт телеметрии очереди сообщений»)	3D FEM (модель конечных элементов). Программное обеспечение Midas Gen
Камеры	Данные видеопотока	LAN (локальная сеть), Интернет	MQTT	BIM-модель. Autodesk Revit, Three.js и Draco
Датчики температуры, датчики движения, дверные датчики, термостаты, интеллектуальные контакты	Данные датчиков окружающей среды	WiFi Raspberry Pi, установленный openHAB		3D-модель
UWB, RFID-метки	Данные позиционирования	Умный мобильный шлюз		3D-модель
Датчики ускорения, датчики скорости. Кинематическая глобальная навигационная спутниковая система в реальном времени (RTK -	Данные механических датчиков, данные позиционирования	Bluetooth		IFC BIM-модель, преобразованная в 3D-модели в веб-браузере (виртуальные активы) в



GNSS) антенна				программе Three.js
1		2		3
Restful API поверх обычной системы BMS с жестко подключенными датчиками: К-сенсоры NTC-12 для температуры, PTH-3202-DR для давления, TTH-6040-0 для наружной температуры и термочувствительные датчики расхода воздуха IVL10	Данные датчиков окружающей среды	Интернет и BACnet (Building Automation and Control Networks) для обмена данными между различным оборудованием, устройствами и датчиками	Универсаль- ный локатор ресурсов через API	BIM-модель. Autodesk Revit
UWB-метки, RFID-метки и промышленные носимые устройства	Данные позициониров ания, данные управления	Операционная система мобильного шлюза (MGOS) легкое промежу- точное програм- мное обеспечение, беспроводная сеть	MQTT	3D- моделирование. Solidworks и 3D Max
Датчики DHT11 для измерения температуры и относительной влажности воздуха и современные датчики ветра Rev. P (категория MD0555) для измерения скорости движения воздуха. IoT-узел для тепловизионного модуля FLIR Lepton. Модуль на базе VR для пользовательского ввода	Данные датчиков окружающей среды, погодные данные, данные тепло- визионного изображения	Wi-Fi	HTTP	BIM-модель. Autodesk Revit



Датчик тока SCT-013-000, датчик напряжения EU:77DE-06-09, датчики температуры DS18B20 и PT100 для вентиляторного доводчика. Датчики DHT22 для температуры окружающей среды, влажности и светозависимого резистора	Механические и экологические данные	WiFi, Raspberry Pi (RPi) 3В выступает в роли маршрутизатора, используя программное обеспечение DNSmasq	MQTT	3D-моделирование. Autodesk Revit
1		2		3
Высококачественные датчики для камер Bullet Pro	Данные изображений	Виртуальная локальная сеть (VLAN) и использование статических IP-адресов	Данные, хранящиеся в базе онлайн и загружаемые в виде файлов CSV	Онлайн-платформа SophyAI.
Беспроводные датчики Monnit для измерения параметров окружающей среды, таких как температура и влажность, сеть датчиков BMS и QR-коды	Данные датчиков окружающей среды, данные о компонентах	Ethernet-шлюзы в беспроводной сети связи	HTTP (протокол передачи гипертекста)	3D модель. Autodesk Revit и AECOsim.
Системы автоматизации зданий (BAS), системы мониторинга энергопотребления, системы мониторинга безопасности, сенсорные сети	Данные датчиков окружающей среды, данные об энергопотреблении, видеоданные	Сети связи систем зданий	HTTP	Лазерное сканирование и приложение Mixed Reality
Базовые станции позиционирования, наклейки позиционирования для рабочих, устройства позиционирования подъемников, ультразвуковые датчики позиционирования, лазерные дальномеры и 3D-гироскоп	Данные позиционирования, данные метки местоположения	Bluetooth и Wi-Fi	Протокол HTTP и сокет	3D модель
Беспроводные датчики Monnit для измерения температуры и	Данные экологических датчиков	Bluetooth и Wi-Fi	HTTP	3D модель

влажности, данные с датчиков BMS				
----------------------------------	--	--	--	--

Заключение. Подводя итоги, отметим, что разработка цифровых двойников для систем промышленного Интернета вещей в настоящее время является нетривиальной задачей, учитывая сложность сетей и требования к их проектированию. В статье описана эталонная архитектура цифрового двойника, поддерживающая ПоТ, которая позволяет понять специфику моделей и необходимые технологии для его проектирования.

В процессе исследования рассмотрены отдельные методы разработки цифрового двойника, которые включают в себя мультифизическое и многомасштабное моделирование, метод жизненного цикла системы, моделирование на основе данных. Также описаны некоторые технологии и системные архитектуры, которые могут быть использованы на трех уровнях создания цифрового двойника для систем промышленного Интернета вещей.

Литература

1. Ковалев В.А. Методы интеграции цифровых технологий в системы управления операционной эффективностью организаций // Финансовые рынки и банки. 2024. № 10. С. 37-39.
2. Глинянов С.В., Глинянов М.В., Капитонова Ю.С. Интернет вещей и цифровые двойники в пищевой промышленности: преимущества и вызовы для потребителей и производителей // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 4-1. С. 843-852.
3. Hu Y., Cao N. Multi-dimensional resource management with deep deterministic policy gradient for digital twin-enabled Industrial Internet of Things in 6 generation // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2024. Volume 35, Issue 4. pp. 76-82.
4. Jeyalakshmi S. Digital Twins in Flexible Industrial Production and Smart Manufacturing: Case Study on Intelligent Logistics and Supply Chain

Management // Digital Twins in Industrial Production and Smart Manufacturing. 2024. № 56. P. 99-107.

5. Болдырев П.А. Особенности разработки проекта информационной системы цифрового двойника буровой установки на основе технологии больших данных, машинного обучения и Интернета вещей // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 9. С. 162-170.

6. Филатов В.В. Ключевые технологии цифровизации интегрированных систем в сфере высокотехнологичных отраслей промышленности // Экономика и управление в машиностроении. 2023. № 5. С. 4-7.

7. Thakuri P. K., Alkki L. Digital Technologies Enabling Component Reuse in Circular Value Chains: Using Digital Twin, Internet of Things and Robots in Construction and Manufacturing Sectors // R&D Management. 2024. № 67. pp. 14-19.

8. Сахапова Т.С., Исмагилов Т.Ш., Тихонов В.А. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия // Горная промышленность. 2023. № 2. С. 62-68.

9. Тушавин В.А., Фролова Е.А., Чабаненко А.В. Квалиметрическая оценка качества цифровых двойников аддитивного производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 6 (116). С. 84-91.

References

1. Kovalev V.A. Finansovye rynki i banki. 2024. № 10. pp. 37-39.
2. Glinjanov S.V., Glinjanov M.V., Kapitonova Ju.S. Jekonomika: vchera, segodnja, zavtra. 2023. Т. 13. № 4-1. pp. 843-852.
3. Hu Y., Cao N. Multi-dimensional resource management with deep deterministic policy gradient for digital twin-enabled Industrial Internet of Things in 6 generation. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2024.

Volume 35, Issue 4. pp. 76-82.

4. Jeyalakshmi S. Digital Twins in Flexible Industrial Production and Smart Manufacturing: Case Study on Intelligent Logistics and Supply Chain Management. Digital Twins in Industrial Production and Smart Manufacturing. 2024. № 56. pp. 99-107.

5. Boldyrev P.A. International Journal of Open Information Technologies. 2024. T. 12. № 9. pp. 162-170.

6. Filatov V.V. Jekonomika i upravlenie v mashinostroenii. 2023. № 5. pp. 4-7.

7. Thakuri P. K., Alkki L. Digital Technologies Enabling Component Reuse in Circular Value Chains: Using Digital Twin, Internet of Things and Robots in Construction and Manufacturing Sectors. R&D Management. 2024. № 67. pp. 14-19.

8. Sahapova T.S., Ismagilov T.SH., Tihonov V.A. Gornaya promyshlennost'. 2023. № 2. pp. 62-68.

9. Tushavin V.A., Frolova E.A., CHabanenko A.V. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2023. T. 25. № 6 (116). pp. 84-91.



8. Sahapova T.S., Ismagilov T.Sh., Tihonov V.A. Cifrovoy dvojn timer proizvodstva kak jetap novoj cifrovoy biznes-modeli promyshlennogo predpriyatija. Gornaja promyshlennost'. 2023. № 2. pp. 62-68.
9. Tushavin V.A., Frolova E.A., Chabanenko A.V. Kvalimetricheskaja ocenka kachestva cifrovyh dvojnikov additivnogo proizvodstva. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2023. T. 25. № 6 (116). pp. 84-91.
10. Yue Hu, Ning Cao Multi-dimensional resource management with deep deterministic policy gradient for digital twin-enabled Industrial Internet of Things in 6 generation // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2024. Volume 35, Issue 4. P. 76-82.

Дата поступления: 14.05.2025

Дата публикации: 26.08.2025