

Исследование применения цифровых двойников для управления ресурсами предприятия

A Study on the Application of Digital Twins for Enterprise Resource Management

DOI: 10.12737/2306-627X-2024-13-3-4-8

Получено: 11 июня 2024 г. / Одобрено: 17 июня 2024 г. / Опубликовано: 25 сентября 2024 г.

Орешина М.Н.

Д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», г. Москва

Oreshina M.N.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow

Гарнов А.П.

Д-р экон. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», г. Москва

Garnov A.P.

Doctor of Economic Sciences, Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow

Аннотация

В статье рассмотрены основные направления по созданию и использованию технологий цифровых двойников, приведен обзор успешной реализации цифровых двойников на российских предприятиях.

Представлена классификация задач управления и производства, решение которых возможно на основе применения технологий цифровых двойников.

Предлагается метод реализации технологии цифровых двойников с использованием мультиагентных технологий, заключающийся в создании программных агентов, обеспечивающий сбор информации и моделирование поведения активов предприятия в производственных и бизнес-процессах.

Ключевые слова: цифровой двойник, управление ресурсами предприятия, цифровые технологии, моделирование процессов управления.

Abstract

The article discusses the main directions for the creation and use of digital twin technologies, and provides an overview of the successful implementation of digital twins at Russian enterprises.

A classification of management and production tasks is presented, the solution of which is possible based on the use of digital twin technologies.

A method for implementing digital twin technology using multi-agent technologies is proposed, which consists in creating software agents that collect information and model the behavior of enterprise assets in production and business processes.

Keywords: digital twin, enterprise resource management, digital technologies, management process modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Реализация стратегий цифровой экономики в РФ обозначена в ряде федеральных проектов, направленных на разработку и внедрение цифровых двойников в различных отраслях народного хозяйства [7; 8].

Реализация стратегий цифровой трансформации предполагает создание цифровых платформ для описания задач планирования, моделирования, разработки объектов, а также отражения производственных и бизнес-процессов на основе совместного использования робототехнических систем, технологий искусственного интеллекта, больших данных, современных достижений в области сетевых технологий.

Концепция цифрового двойника была предложена Майклом Гривзом в 2003 г. для описания жизненного цикла продукта в высокотехнологической промышленности и стала активно применяться при цифровой трансформации предприятий. Согласно определению цифрового двойника, предложенного М. Гривзом, данное понятие включает систему, состоящую из виртуального и физического пространств, причем связь между ними обеспечивается посредством сетевого взаимодействия. Виртуальное пространство, представлено в виде программ, отражающих поведение, структуру и свойства реальных

объектов и их взаимодействие между собой. Цифровой двойник должен быть виртуальным отражением своего физического аналога [1–3].

Создание современных киберфизических систем и их внедрение в промышленность РФ открывают новые возможности функционирования предприятий и организаций. Развитие экономики в период с 2012 по 2030 г. обозначено повышением конкурентоспособности отраслей и непрерывно связано с внедрением цифровых технологий в рамках реализации проектов, разработанных для выполнения основных направлений на основе концепции промышленной индустрии четвертого поколения [4–6].

Программа Индустрия 4.0 предполагает разработку:

- нормативно правовой документации;
- эталонных архитектур проектов и стандартов;
- сценариев технологий и приложений;
- цифровых бизнес-моделей;
- положений по безопасности сетевых систем;
- программ обучения и повышения квалификаций специалистов [10].

Классификация задач управления современным предприятием предлагает использование цифровых технологий:

- в планировании производственных мощностей;

- планировании ресурсов предприятия с учетом выработки требуемых показателей;
- разработке методов повышения эффективности производственных и бизнес-процессов, сокращения производственных процессов на основе внедрения новых технологий;
- использовании технологий повышения производительности труда путем применения автоматизированных и робототехнических систем.

Для описания производства от стадии проектирования до выхода готовой продукции используются цифровые модели — цифровые двойники, которые позволяют отработать сценарии производства как по отдельности, так при их совместном использовании [4–6].

Однако использование цифровых двойников в практике предприятий средней и малой мощности связано адаптацией известных методологий в условиях конкретных производств, особенностями архитектуры каждого предприятия, подбором программного обеспечения и трудностями, обусловленными применением сетей нового поколения.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе рассматриваются методы систематизации и классификации применительно к исследованию технологий цифровых двойников, на основе которых выделено три основных способа разработки цифровых двойников:

- путем выполнения расчетов с использованием систем математических уравнений (дифференциальных, интегродифференциальных, регрессионных моделей, временных рядов);
- с использованием нейросетевого подхода и методов машинного обучения;
- на основе применения мультиагентных технологий.

В работе также используется метод системного анализа при комплексном рассмотрении использования цифровых платформ в практике российских предприятий.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе на основе анализа опыта использования предприятиями отечественной промышленности и компаний обоснована целесообразность создания цифровых двойников и их внедрение в практику российских предприятий при выполнении мероприятий по цифровой трансформации. Доказано, что использование цифровых двойников является эффективным инструментом при разработке производственных и бизнес-процессов, а также при контроле и управлении параметрами производства.

Для планирования и проектирования сложных технических систем применяются цифровые двойники на основе баз знаний и мультиагентных технологий (MAS), где в роли агентов выступает специальное программное обеспечение, которое понимает условие работы системы, способно генерировать оптимальное решение и действует в комплексе с другими агентами сложной технической системы.

Научный подход к моделированию процессов в рамках цифрового предприятия с использованием онтологий и мультиагентных систем и управлению цифровым потоком рассмотрен в работах научного коллектива под управлением Ю.Ф. Тельнова при построении архитектуры процессов в условиях изменяющихся требований к производству, обусловленных флуктуациями рынка и факторами нестабильности ситуаций на основе интеллектуальных агентов информационных систем, т.е. специальных программ [9; 13–15].

В рамках использования технологий, описанных в программе Индустрия 4.0, при построении цифровой модели как отдельных процессов, так и всего предприятия (организации) применяются программные сервисы и административные оболочки, взаимодействующие между собой. Механизм взаимодействия всех компонентов архитектуры осуществляется посредством онтологий для управления сетевым предприятием. Создание сетевого предприятия осуществляется на основе заданных требований к его архитектуре, т.е. к компонентам цифровой системы и их функциональным связям. При сетевом предприятии осуществляется быстрая настройка компонентов и обеспечение оперативного мониторинга параметров процесса. При этом под цифровой платформой понимается единое пространство, объединяющее все программные сервисы предприятия и подчиняющееся определенным требованиям выполнения. Описаны требования к набору платформенных сервисов. Предложена методика создания и использования цифрового двойника в рамках сетевого предприятия.

В работах [9; 13–15] предложены модели сетевого предприятия, описаны алгоритмы и их программная реализация путем применения мультиагентного подхода с использованием онтологий.

В работе [13] показано создание единого пространства знаний и данных путем разработки мультиагентных систем на основе разработки независимых онтологий. Показано применение этого подхода для создания приложений по управлению роботами.

В работах П.О. Скобелева, А.А. Желяева рассмотрены прикладные решения планирования агрегатной сборки самолетов на основе сведений о закладных

деталей, технологических операциях, возможностях усиления этих операций [11; 12]. При этом базами знаний являются сведения о технологиях производства и отдельных операций, параметрах аппаратуры, совместимости операций, требованиях заказчиков к цифровым моделям.

С использованием мультиагентных технологий осуществляется формирование графиков производства в зависимости от различных условий и критериев, прогнозирование графиков работ (сборки самолетов) в зависимости от ресурсов и поставок деталей, изменение сроков сборки в случае непредвиденных событий в онлайн-режиме, контроль за выполнением производственных графиков, оптимизация работ по сборке сложных технических систем на основе начальных условий и выявления узких мест при выполнении производственных процессов.

Создание графиков работ на основе *MAS* позволяет применить метод адаптивного планирования, гибко реагировать на сложившиеся ситуации и соблюдать баланс интересов заказов и ресурсов на текущий момент, а также устранить ранее рассмотренные сложности, возникающие в ходе выполнения операций. В основе разработанной П.О. Скобелевым технологии мультиагентного планирования лежит концепция «виртуального рынка производства, цеха, производственной линии или магазина, где агенты по заказам могут приобретать ресурсные услуги по виртуальной цене» [13; 14].

При использовании метода адаптивного планирования создается цифровая мультиагентная модель, в которой обозначены агенты по заказам, агенты технологического процесса, его дочерние агенты по операциям в рамках данного технологического процесса, агенты-планировщики, агенты-ресурсы (исполнители) и прописаны роли агентов.

Компоненты приложения позволяют вносить изменения в образованную цифровую модель, менять пользовательские интерфейсы и подпрограммы с учетом дополнительных функций для сторонних разработчиков.

Рассмотренная мультиагентная структура имеет два модуля: первый реализует функции стратегического планирования межцехового взаимодействия, второй оперативный уровень предполагает решение задач в рамках одного цеха. В ходе выполнения заказов (работы мультиагентной системы) осуществляется формирование базы знаний для адаптивного планирования конкретного производства с учетом различных ситуаций и информации о параметрах создаваемой технической системы.

Обзор литературных источников показал, что исследования по созданию цифровых двойников как

отдельных объектов, так и всего предприятия в целом ведутся для ряда отраслей топливно-энергетического комплекса, ядерной промышленности, автомобильной промышленности, станкостроения и машиностроения.

Создание цифровых моделей на основе онтологии в рамках семантической паутины используется для управления ресурсами предприятия с использованием унифицированной мультиагентной системы (*MAS*), что позволяет расширить сферу деятельности предприятия и виртуально отработать процессы предприятия.

Создание цифровых двойников на основе построения мультиагентных систем и применения онтологий используется в промышленности, образовании, сельском хозяйстве и медицине. Однако широкое распространение мультиагентных систем требует подготовки специалистов по работе с системами искусственного интеллекта, большим данным и киберфизическим системам.

Решение задач управления ресурсами путем использования концепции мультисервисных систем открывает новые возможности для управления ресурсами предприятия. Создание мультиагентных систем на основе онтологий коррелируется с общей концепцией стратегий цифровой трансформации предприятий [13; 14].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование мультиагентных систем обеспечивает повышение эффективности, гибкости и быстроедействие, производительности, масштабируемости и надежности производства.

Развитие мультиагентных систем связано с построением цифровых двойников предприятий на всех этапах их жизненного цикла — от планирования, моделирования процессов, производства продукции до его утилизации.

Использование цифровых двойников путем реализации принципа создания мультиагентных систем, т.е. с использованием микросервисных технологий, позволяет быстро перенастраивать процессы, регулировать параметры и вносить изменения согласно условиям рынка.

Рассмотренные технологии и методы создания цифровых двойников предприятия показали эффективность использованием цифровых двойников при цифровой трансформации предприятий.

Использование технологий цифровых двойников на основе онтологий и мультиагентных систем с разработкой механизмов взаимодействия компонентов архитектуры предприятия показало свою универсальность в управлении современным предприятием.

Реализация мультиагентного подхода с использованием онтологий позволяет создавать большой спектр моделей сетевого предприятия.

Реализация методов создания цифровых двойников на предприятиях отечественной промышлен-

ности с использованием программных агентов и микросервисных технологий при описании производственных и управленческих процессов позволяет успешно реализовывать цифровую трансформацию бизнеса и промышленности.

Литература

1. *Абрамов В.И.* Теоретические и практические аспекты создания цифрового двойника компании [Текст] / В.И. Абрамов, Д.С. Бобоев, Т.Д. Гильманов, К.Ю. Семенов // Вопросы инновационной экономики. — 2022. — Т. 12. — № 2. — С. 967–980. — DOI: 10.18334/vines.12.2.114890
2. *Боровков А.И.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт [Текст] / А.И. Боровков, А. Прохоров, М. Лысачев. — М., 2020. — 404 с.
3. *Васильев А.Н.* Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, Г.Ф. Малыгина // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2018. — Т. 14. — № 3. — С. 521–532. — DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.521-532
4. *Головин С.А.* Стратегия информационного обеспечения эффективности вхождения промышленности России в современных условиях [Текст] / С.А. Головин, А.Н. Лоцманов, Б.М. Позднев // Стандарты и качество. — 2020. — № 7. — С. 68–73.
5. *Головин С.А.* Программа «Промышленность РФ 4.0» — шанс не отстать навсегда в области промышленного производств [Текст] / С.А. Головин, А.Н. Лоцманов, Б.М. Позднев // Мир информационных технологий. — 2021. — № 1–2. — С. 38–40.
6. *Городецкий В.И.* Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление, Основные понятия [Текст] / В.И. Городецкий // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2019. — № 1. — DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-144-162
7. ГОСТ Р 57700. 37-21 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 2021. — 11 с.
8. ГОСТ Р 59799-21 Умное производство. Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0) [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 2021. — 35 с.
9. *Тельнов Ю.Ф.* Методы и модели обоснования прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий [Текст] / Ю.Ф. Тельнов, В.А. Казаков, А.А. Брызгалов, И.Г. Федоров // Бизнес-информатика. — 2023. — Т. 17. — № 4. — С. 73–93. — DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.73.93
10. Industrie 4.0 — Digital Platforms in Manufacturing 2021. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digital-platforms-in-manufacturing-2021.pdf> (дата обращения: 03.05.2024).
11. *Skobelev P.* Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova, O. Goryanin, A. Zhilyaev, A. Tabachinskiy, V. Yalovenko // Journal of Physics: Conference Series, 2020, p. 19. DOI: 10.1088/1742-6596/1703/1/012022
12. *Skobelev P.* Disruptions Are the Norm: Cyber-Physical Multi-agent Systems for Autonomous Real-Time Resource Management / P. Skobelev, D. Trentesaux, 2017, pp. 287–294. DOI: 10.1007/978-3-319-51100-9_25
13. *Telnov Y.F.* et al. Constructing network enterprise structure to create innovative process // Open Education, 2019,

References

1. Abramov V.I., Boboev D.S., Gil'manov T.D., Semenov K.Ju. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty sozdaniya cifrovogo dvojnika kompanii // Voprosy innovacionnoj jekonomiki, 2022, v. 12, no. 2, pp. 967–980. DOI: 10.18334/vines.12.2.114890
2. Borovkov A.I. Cifrovoy dvojniki. Analiz, trendy, mirovoj opyt / A.I. Borovkov, A. Prohorov, M. Lysachev. Moskva, Izdatel'stvo, 2020. 404 s.
3. Vasil'ev A.N. Metody sozdaniya cifrovyyh dvojnikov na osnove nejrosetevogo modelirovaniya / A.N. Vasil'ev, D.A. Tarhov, G.F. Malyhina // Sovremennyye informacionnyye tehnologii i IT obrazovanie, 2018, v. 14, no. 3, pp. 521–532. DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.521-532
4. Golovin S.A., Locmanov A.N., Pozdnev B.M. Strategija informacionnogo obespecheniya jeffektivnosti vhozheniya promyshlennosti Rossii v sovremennyh uslovijah // Standarty i kachestvo, 2020, no. 7, pp. 68–73.
5. Golovin S.A., Locmanov A.N., Pozdnev B.M. Programma «Promyshlennost' RF 4.0» — shans ne otstat' navsegda v oblasti promyshlennogo proizvodstv // Mir informacionnyh tehnologij, 2021, no. 1–2, pp. 38–40
6. Gorodeckij V.I. Povedencheskie modeli kiber-fizicheskikh sistem i gruppovoe upravlenie, Osnovnyye ponjatija / V.I. Gorodeckij // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki, 2019, no. 1. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-144-162
7. GOST R 57700. 37-21 Komp'yuternyye modeli i modelirovanie. Cifrovyye dvojniki izdelij. Moskva: IPK Izd-vo standartov, 2021, 11 s.
8. GOST R 59799-21 Umnoe proizvodstvo. Model' jetalonnoj arhitektury Industrii 4.0 (RAMI 4.0). Moskva: IPK Izd-vo standartov, 2021. 35 s.
9. Tel'nov Ju.F., Kazakov V.A., Bryzgalov A.A., Fedorov I.G. Metody i modeli obosnovaniya prikladnyh scenariev cifrovizacii proizvodstvennyh i biznes-processov setevyyh predpriyatij // Biznes-informatika, 2023, v. 17, no. 4, pp. 73–93. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.73.93
10. Industrie 4.0 — Digital Platforms in Manufacturing 2021. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digital-platforms-in-manufacturing-2021.pdf> (data obrashheniya: 03.05.2024).
11. Skobelev P. Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova, O. Goryanin, A. Zhilyaev, A. Tabachinskiy, V. Yalovenko // Journal of Physics: Conference Series, 2020, p. 19. DOI: 10.1088/1742-6596/1703/1/012022
12. Skobelev P. Disruptions Are the Norm: Cyber-Physical Multi-agent Systems for Autonomous Real-Time Resource Management / P. Skobelev, D. Trentesaux, 2017, pp. 287–294. DOI:10.1007/978-3-319-51100-9_25
13. Telnov Y.F. et al. Constructing network enterprise structure to create innovative process // Open Education, 2019, v. 23, no. 6, pp. 59–73. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73
14. Telnov Y.F., Kazakov V.A., Trembach V.M. Developing a knowledge-based system for the design of innovative product creation processes for network enterprises // Business Informatics, 2020, v. 14, no. 3, pp. 35–51. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.35.53

- v. 23. no. 6, pp. 59–73. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73
14. Telnov Y.F., Kazakov V.A., Trembach V.M. Developing a knowledge-based system for the design of innovative product creation processes for network enterprises // *Business Informatics*, 2020, v. 14, no. 3, pp. 35–51. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.35.53
15. Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V., Bryzgalov A.A. Development of models of production and business processes of network enterprises based on multi-agent systems // *Software products and systems*, 2023, v. 36, no. 4, pp. 632–643. DOI: 10.15827/0236-235X.142.632-643