УДК 658.7: 004.942
https://www.doi.org/10.47813/rosnio.5.2026.19.3013
EDN ELVYIB

Анализ применения цифровых двойников в управлении цепями поставок

В.В. Павлов*

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Покровский Бульвар 11, Москва, 109028, Россия

*E-mail: pavlov.v.v@hse.ru

Аннотация. В исследовании проанализированы общие требования и отраслевые особенности создания, внедрения и функционирования цифровых двойников цепей поставок на основе обзора зарубежных и отечественных научных публикаций. Выделены следующие ключевые характеристики цифровых двойников цепей поставок: многослойная сетевая архитектура, необходимость интеграции с корпоративными системами, работа с неполными и асинхронными данными, многокритериальная оптимизация при конфликтующих интересах участников, повышенные требования к сетевой инфраструктуре, обеспечение сквозной прозрачности по всей цепи поставок. Отмечено, что практический опыт создания цифровых двойников цепей поставок ограничен и сконцентрирован преимущественно в промышленности, тогда как отраслевые требования формируют специфические задачи для ритейла, энергетики, строительства, сельского хозяйства и других отраслей. Предложены направления для дальнейших исследований и практические варианты решений для соответствия систем цифрового двойника выявленным общим требованиям и отраслевой специфике.

Ключевые слова: цифровой двойник, цепи поставок, управление цепями поставок.

Analysis of digital twin usage in supply chain management

V.V. Pavlov*

National Research University Higher School of Economics, Pokrovsky Bulvar 11, Moscow, 109028, Russia

*E-mail: pavlov.v.v@hse.ru

Abstract. The paper analyzes general requirements and industry-specific characteristics of creation, implementation, and operation of supply chain digital twins based on a review of international and domestic scientific publications. The following key characteristics of supply chain digital twins are highlighted: multi-layer network architecture, the need for integration with corporate systems, handling incomplete and asynchronous data, multi-criteria optimization due to conflicting interests of participants, increased demands on network infrastructure, and ensuring end-to-end transparency across the entire supply chain. It is noted that practical experience of creating supply chain digital twins is limited and concentrated primarily in manufacturing, while industry-specific requirements create specific challenges for retail, energy, construction, agriculture, and other industries. Directions for further research and practical solutions for ensuring that digital twin systems meet identified general requirements and industry-specific characteristics are proposed.

Keywords: digital twin, supply chain, supply chain management.

1. Введение

Современная экономическая среда в России и глобально в мире характеризуется высоким уровнем неопределенности и рисков в цепях поставок, для снижения которых активно растет применение цифровых технологий, позволяющих повысить видимость и прозрачность цепей поставок, скорость реагирования на инциденты и адаптивность к изменениям [1].

Одной из перспективных технологий является цифровой двойник, применение которого в логистике и управлении цепями поставок приводит к повышению контролируемости логистических процессов, снижению времени реакции на сбои, оптимизации запасов, снижению издержек, повышению надежности поставок и другим положительным эффектам [2].

Развитием применения данной технологии является цифровой двойник цепи поставок, использующий оперативные данные и информацию об узлах сети для создания полного, сквозного отображения процессов в цепи поставок с целью мониторинга состояния, прогнозирования поведения, оптимизации и повышения эффективности цепей поставок и помощи в принятии решений [3].

Создание таких цифровых двойников связано с моделированием мультиагентных сетевых структур цепей поставок и обеспечением доступности данных от всех или большинства контрагентов цепи поставок и организацией обмена данных между информационными системами различных участников цепи поставок [4]. Кроме этого, отраслевая специфика функционирования цепей поставок накладывает дополнительные ограничения и требования к цифровому двойнику для реализации необходимого функционала [5].

Таким образом, актуален исследовательский вопрос определения как общих характеристик создания, внедрения и функционирования цифровых двойников цепей поставок, так и отраслевой специфики применения таких систем в разных сферах экономической деятельности, изучение которых позволит в дальнейшем выработать практические рекомендации по их созданию.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

Цель исследования заключается в выявлении общих требований, а также отраслевой специфики создания, внедрения и функционирования цифровых двойников цепей поставок в контексте управления цепями поставок.

3. Методы и материалы исследования

Основными материалами для исследования послужили научные публикации из зарубежных и русскоязычных рецензированных журналов по вопросам создания и применению цифровых двойников в управлении цепями поставок [3, 4, 5].

Для отбора исходных источников был проведен поиск релевантных научно-исследовательских работ на английском и русском языках с использованием сервисов поиска Dimensions.ai, e-Library и Google Академия за период с 2016 по 2026 годы. Поиск был проведен по ключевым словам «supply chain digital twin» и «цифровой двойник цепи поставок», а также по их комбинациям с использованием синонимов.

Итоговые научные публикации для проведения исследования были отобраны после прочтения их аннотаций на соответствие целям и задачам исследования. Для формирования основных результатов и выводов в работе были применены методы системного анализа и сравнительного исследования.

4. Полученные результаты

На основе проведенного анализа литературы были выделены ключевые особенности цифровых двойников цепей поставок, которые важно учитывать при их создании, внедрении и применении в управлении цепями поставок:

- Необходимость построения многоуровневой сетевой архитектуры цепи поставок, состоящей из множества акторов и узлов сети: цифровой двойник цепи поставок должен корректно отображать всю экосистему участников и контрагентов цепи поставок, включая как горизонтальные взаимодействия участников, так и вертикальные связи между различными уровнями управления цепями поставок.
- Повышенные требования к интеграции с существующими информационными системами участников цепи поставок: цифровой двойник цепи поставок должен функционировать как единая платформа, которая интегрирует данные из различных корпоративных систем (ERP, WMS, TMS, SCM), систем учета и финансовых систем различных участников цепи. Интеграция осложняется различиями в форматах данных, протоколах обмена и архитектуре существующих систем. Также необходимо обеспечить обмен данными без нарушения целостности и доступности информации для каждого участника цепи поставок.
- Функционирование в условиях неполных и асинхронных данных, получаемых из различных источников и узлов цепи поставок: данные о состоянии цепи поставок

поступают неравномерно и с временной задержкой от разнородных источников, таких как датчики Интернета вещей, управленческие системы, мобильные устройства, внешние информационные системы посредников и другие. Цифровой двойник цепи поставок должен работать с пропусками данных, оценивать отсутствующую информацию и обеспечивать принятие управленческих решений в условиях неопределенности.

- Конфликтующие цели и множественные критерии при оптимизации логистической системы: различные участники цепи поставок преследуют противоречащие друг другу цели: поставщики стремятся к минимизации объемов хранения, производители – к стабильным поставкам, логистические операторы – к минимизации транспортных затрат, потребители – к минимальным срокам доставки и так далее. Цифровой двойник должен быть способен моделировать логистические процессы в цепи поставок и балансировать конфликтующие интересы, предлагая различные варианты компромиссных или наиболее оптимальных решений через механизмы многокритериальной оптимизации и достижения компромисса для всех участников цепи поставок.
- Повышенные требования к сетевой инфраструктуре для обмена данными в реальном времени на промежуточных транспортных путях: цифровой двойник цепи поставок требует непрерывного мониторинга и передачи данных от транспортных объектов, находящихся в движении, включая мультимодальные перевозки, что предъявляет дополнительные требования к пропускной способности и надежности передачи информации. Система должна обрабатывать критичные данные без задержек и предусматривать стабильную работу даже при отказе или деградации сетевого канала.
- Обеспечение сквозной прозрачности по всей цепи поставок между всеми участниками: концепция и принципы реализации систем класса Supply Chain Control Tower (SCCT) обеспечивают сквозную видимость цепи поставок и возможности мониторинга, анализа и принятия решений на основе контроля показателей эффективности. Цифровой двойник цепи поставок должен предоставлять каждому участнику надлежащий уровень видимости относительно положения товаров, состояния ресурсов и выполнения обязательств, при этом соблюдая конфиденциальность коммерческой информации каждого участника.

На текущий момент опыт применения цифровых двойников цепей поставок пока недостаточный и в основном сосредоточен в промышленности, но их создание и внедрение

происходит и в других отраслях [5, 6]. В связи с тем, что в разных отраслях требования к функционированию цепей поставок отличаются, то и требования к цифровым двойникам цепей поставок в таких отраслях также будут иметь свою специфику [4]. Наряду с общими требованиями цифровых двойников цепей поставок исследователи также отмечают специфические отраслевые особенности, которые также необходимо учитывать в проектах создания цифровых двойников цепей поставок:

- Розничная торговля: моделирование сложной сети распределительных центров и множества точек продаж; планирование спроса и предложения на основе данных о покупательском поведении, тенденциях и сезонных изменениях; высокая скорость обновления ассортимента и разнообразие товарных категорий в рамках одной сети; интеграция с системами управления онлайн и офлайн каналами продаж, управления взаимоотношениями с клиентами и поставщиками [7].
- Энергетическая отрасль: повышенные требования к отказоустойчивости узлов сети для предотвращения сбоев энергоснабжения; моделирование волатильных потоков и пиковых нагрузок спроса и предложения; автоматические системы перераспределения потоков энергии при изменении условий и отказах в работе сети [8].
- Строительство: интеграция с системами информационного моделирования строительных объектов (BIM); мониторинг хода строительства и потоков материалов, поставляемых вовремя для каждого этапа строительства; координация взаимодействия и договоров между компаниями, подрядчиками и госструктурами; фокус на соблюдение сроков строительства и заложенного бюджета [9].
- Сельское хозяйство: мониторинг и прогнозирование отложенного влияния сезонных колебаний, изменяющихся погодных условий и других факторов на объемы производства; интеграция с агрометеорологическими системами; особенности хранения и транспортировки скоропортящейся продукции на всех этапах цепи поставок [10, 11].
- Здравоохранение: особые требования производства и транспортировки лекарств и медицинских изделий со стороны регулирующих органов; прогнозирование нагрузки на учреждения при сезонных колебаниях и в случае чрезвычайных ситуаций; повышенные требования к безопасности хранения и передачи данных пациентов для сохранения врачебной тайны [12].

5. Выводы

Проведенный анализ литературы показал, что в области создания, внедрения и функционирования цифровых двойников цепей поставок необходимо учитывать как общие требования, так и отраслевую специфику.

В дальнейшем возможно проведение исследований или разработка отдельных решений в соответствии с выявленными общими характеристиками и отраслевой специфики:

- Проведение комплексного анализа и картирования существующей расширенной цепи поставок для определения ключевых узлов и участников, с которыми проводить совместную разработку системы;
- Разработка универсальных интерфейсов и middleware-решений для интеграции различающихся информационных систем компаний;
- Реализация многоуровневой системы управления доступом и прав с применением технологии блокчейн для создания неизменяемого и верифицируемого механизма обмена информацией между участниками сети;
- Адаптация архитектуры и компонентов цифрового двойника цепи поставок под конкретную отраслевую специфику с учетом необходимого функционала.

Учет общих требований и отраслевой специфики в процессах создания, внедрения и функционирования таких цифровых платформ в управлении цепями поставок позволит выработать практические рекомендации для повышения успешности проектов по созданию цифровых двойников цепей поставок.

Список литературы

1. Цифровые технологии в логистике и управлении цепями поставок: аналитический обзор / В. В. Дыбская, В. И. Сергеев, Н. Н. Лычкина [и др.]; под общ. и науч. ред. В. И. Сергеева; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2020. – 190 с.
2. Лычкина, Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 139-149.

3. Сергеев И. В. Аналитический обзор цифровых технологий, преобразующих цепи поставок сетевой розницы // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 467-482.
4. Jesus, V. Digital twins of supply chains: a systems approach / Jesus V. [et al.] // IEEE Transactions on Engineering Management. – 2024. – Т. 71. – С. 14915-14932.
5. Singh M. et al. Applications of digital twin across industries: A review // Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 11. – С. 5727.
6. Guo, D. The role of digital twins in lean supply chain management: review and research directions / D. Guo, S. Mantravadi // International journal of production research. – 2025. – Т. 63. – №. 5. – С. 1851-1872, DOI: 10.1080/00207543.2024.2372655.
7. Mesquita, R. P. Digital twins in the retail industry: A systematic literature review / R. P. Mesquita, F. Leal, J. A. De Queiroz // International Journal of Simulation Modelling. – 2024. – Т. 23. – №. 3.
8. Agho, M. O. Digital twin technology for real-time monitoring of energy supply chains / M. O. Agho [et al.] // International Journal of Research and Innovation in Applied Science. – 2024. – Т. 9. – №. 12. – С. 564-592.
9. Bakhshi, S. Digital twin applications for overcoming construction supply chain challenges / S. Bakhshi [et al.] // Automation in construction. – 2024. – Т. 167. – С. 105679.
10. Burgos, D. Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions / D. Burgos, D. Ivanov // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2021. – Т. 152. – С. 102412.
11. Monteiro, J. Digital twin-enabled regional food supply chain: A review and research agenda / J. Monteiro, J. Barata // Journal of Industrial Information Integration. – 2025. – Т. 45. – С. 100851.
12. Santos, J. A. M. Internal supply chain digital twin of a pharmaceutical company / J. A. M. Santos [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Т. 53. – №. 2. – С. 10797-10802.