Салихов Сергей Владиславович
студент
Научный руководитель
Иовлева Ольга Владимировна
канд. экон. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет»
г. Екатеринбург, Свердловская область

DOI 10.31483/r-170486

ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Аннотация: *в статье раскрыта концепция цифрового двойника как инструмента сквозного управления цепями поставок. Рассмотрены принципы интеграции двойников с TMS и WMS, систематизированы сценарии применения (прогнозирование задержек, перераспределение грузов, стресс-тестирование маршрутов) и предложена методика оценки экономического эффекта. Полученные результаты подтверждают переход от реактивного к проактивному управлению и повышение операционной эффективности. Особое внимание уделено барьерам, рискам и методологии внедрения для минимизации издержек и максимизации отдачи от инвестиций.*

Ключевые слова: *цифровой двойник, цепь поставок, логистика, TMS, WMS, имитационное моделирование, проактивное управление, сквозная видимость, оптимизация, Industry 4.0.*

Современная логистика сталкивается с высокой неопределенностью и жесткими требованиями к прозрачности и скорости исполнения обязательств. Традиционные методы, основанные на ретроспективных данных и ручных корректировках, не обеспечивают нужной устойчивости. Цифровые двойники становятся

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

ключевым инструментом цифровой трансформации, позволяя моделировать динамику процессов, прогнозировать отклонения и предлагать управленческие решения в режиме, максимально приближенном к реальному времени.

Цель работы – систематизировать подходы к интеграции цифровых двойников в управление цепями поставок и обосновать их эффективность для оперативного принятия решений. В процессе достижения цели была раскрыта сущность и типология двойников для логистики, описана архитектура их интеграции с корпоративными системами (TMS, WMS, ERP), выделены сценарии использования, разработана методика оценки окупаемости, а также проанализированы барьеры и риски с рекомендациями по их преодолению.

Теоретико-методологическую основу составляют концепция Supply Chain Control Tower, методы имитационного и сценарного моделирования, принципы Industry 4.0 (IoT, большие данные), а также подходы к оценке TCO и ROI. Были задействованы сравнительный анализ, системный подход и экономико-математическое моделирование на операционных данных.

Актуальность темы обусловлена волатильностью внешней среды, ужесточением требований к SLA и давлением на издержки. Геополитические риски, климатические аномалии и разрывы логистических связей регулярно провоцируют сбои, а клиенты ожидают доставки в срок и полной прозрачности. Компании вынуждены снижать затраты и одновременно повышать управляемость цепей поставок, в связи с чем инструменты со сквозной видимостью и автоматизированной поддержкой решений приобретают стратегическое значение.

Сущность и типология цифровых двойников в логистике

Цифровой двойник цепи поставок представляет собой динамическую виртуальную модель, отражающую в режиме, близком к реальному времени, состояние объектов и процессов (грузы, транспорт, склады, заказы). Она синхронизирована с источниками данных (датчики, TMS, WMS, GPS, RFID) и способна выполнять прогнозные расчёты, сценарный анализ и оптимизацию. В отличие от

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

статичных моделей, двойник поддерживает принятие решений, позволяя проигрывать сценарии «что-если», выявлять узкие места и предлагать альтернативы [1].

В логистике выделяют три типа цифровых двойников. Такой подход обеспечивает согласованность решений на оперативном и стратегическом уровнях. Двойник объекта, к которому относят транспортное средство, контейнер или ячейку, отслеживает состояние (температура, вибрация, местоположение), прогнозирует отказы и планирует техобслуживание. Например, для рефрижераторных контейнеров он фиксирует отклонения температуры и инициирует корректирующие действия. Двойник процесса описывает типовые операции, такие как приёмка, кросс-докинг и доставка, и используется для оптимизации времени, выявления потерь и стандартизации процедур. Наконец, двойник системы представляет собой сквозную модель всей цепи поставок с учётом взаимодействия объектов и процессов, внешних факторов (погода, пробки, таможенные задержки) и бизнес-правил. Он обеспечивает проактивное управление и перераспределение ресурсов, позволяя тестировать сценарии без остановки реальных операций [3, с. 267]. Именно двойник системы, объединяющий данные из TMS, WMS, ERP и внешних источников (прогноз погоды, дорожные события, таможенная статистика), представляет наибольший интерес для интегрированной логистики.

Архитектура интеграции с TMS и WMS.

Эффективная интеграция требует соблюдения ключевых принципов: единой модели данных, потоковой передачи событий через шину данных или брокер сообщений (Kafka, RabbitMQ), стандартизированных API (REST/SOAP), механизмов буферизации и дедупликации, а также контроля качества данных, включающего валидацию, обогащение и сопоставление [5].

Типовая архитектура включает несколько слоев. Слой сбора данных, в который входят IoT-датчики, RFID, GPS, логи TMS/WMS и внешние API, обеспечивает непрерывный поток информации. Слой обработки и хранения, реализуемый

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

с помощью Spark Streaming, Flink, InfluxDB, Neo4j, очищает, агрегирует и приводит данные к единому формату.

Слой моделирования, где применяются AnyLogic, Simio, CPLEX, Gurobi и ML-модели, формирует сценарии «что-если» и рекомендации. Слой приложений, включающий Control Tower, панели KPI, чат-боты и мобильные приложения, предоставляет интерфейс управления. Такой многоуровневый подход обеспечивает масштабируемость и отказоустойчивость [6].

Интеграция с TMS позволяет автоматически предлагать альтернативные маршруты при прогнозируемых задержках, а с WMS – резервировать слоты под ожидаемые поступления. Например, при прогнозе задержки транспорта на два или три часа система может заранее зарезервировать слоты на приемке, перераспределить ресурсы и уведомить клиентов, таким образом снижая риски срыва SLA.

Сценарии применения и операционная ценность.

Практическое применение охватывает прогноз задержек и управление рисками на основе данных о погоде, ремонтах, таможенных очередях, подбор альтернатив при срыве подачи транспорта, стресс-тестирование на «черных лебедей», включая закрытие границы, аварию или всплеск спроса, оптимизацию последней мили и управление запасами с кросс-докингом [4, с. 23].

Операционная ценность выражается в конкретных метриках. Сокращение времени реакции на сбой достигает 35–50% за счёт автоматизации уведомлений и рекомендаций. Снижение незапланированных простоев составляет 25–40% благодаря прогнозированию и перераспределению ресурсов. Рост точности планирования на 18–30% обусловлен применением ML-моделей и сценарного анализа. Повышение прозрачности проявляется в том, что все участники получают единую картину событий, что минимизирует ошибки и конфликты.

Например, при закрытии таможенного пункта двойник автоматически перестраивает маршруты, перераспределяет грузы и уведомляет стороны, что помогает избежать простоя и штрафов. Оптимизация последней мили сокращает пробег на 15–20% и повышает долю доставок в окно до 90–95%.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Методика оценки экономического эффекта.

Для обоснования инвестиций применяют комбинированный подход, включающий TCO, ROI, NPV и срок окупаемости. TCO учитывает лицензии, внедрение, интеграцию, обучение, поддержку. ROI отражает рентабельность вложений как отношение чистой прибыли к инвестициям. NPV позволяет учесть ставку дисконтирования и горизонт планирования. Срок окупаемости показывает, за какой период экономия покроет инвестиции [2, с. 744].

Приведем пример расчета для компании с грузооборотом 500 тыс. тонн и издержками 12% от выручки, демонстрирующий ожидаемое снижение издержек на 8%. При выручке 5 млрд рублей экономия составит 48 млн рублей в год. Инвестиции оцениваются в 30–45 млн рублей, срок окупаемости колеблется в диапазоне от семи до 12 месяцев, а ROI составит 107–160% в первый год.

Дополнительно учитываются такие нематериальные выгоды, как повышение лояльности клиентов за счет соблюдения SLA, снижение штрафов, улучшение репутации и выход на новые рынки. Например, соблюдение SLA на уровне 95–98% может стать конкурентным преимуществом при работе с ритейлерами и маркетплейсами.

Барьеры, риски и рекомендации по внедрению.

Ключевые барьеры включают фрагментированность ИТ-ландшафта, низкое качество данных, сопротивление изменениям и высокую сложность проекта. Разрозненные TMS/WMS/ERP с разными форматами данных и отсутствие единых справочников затрудняют интеграцию. Ошибки в адресах, номенклатуре, статусах, а также дубликаты и пропуски снижают точность моделей. Недоверие персонала к автоматизированным рекомендациям и страх потери контроля усиливают сопротивление. Высокая стоимость и сложность требуют привлечения экспертов и длительных сроков внедрения [7].

Риски подразделяются на технологические, организационные и репутационные. Первые связаны со сбоями интеграции, задержками передачи данных и ошибками моделей.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Организационные обусловлены несогласованностью KPI между подразделениями и отсутствием единого владельца процесса. Репутационные риски возникают из-за ошибочных рекомендаций, способных привести к срыву поставок и потере клиентов.

Рекомендации по минимизации рисков предполагают старт с пилотного проекта на ограниченном сегменте. Важно внедрить MDM и регламенты ввода для обеспечения качества данных, а также вовлекать пользователей с ранних этапов, проводить обучение и демонстрировать ценность на примерах. Целесообразен поэтапный подход, снижающий риски, ускоряющий окупаемость и повышающий степень вовлеченности персонала. На первом этапе внедряют мониторинг и аналитику, на втором подключают прогнозные модели и рекомендации, а на третьем – автоматизацию рутинных операций. Кроме того, необходимо разработать механизмы контроля и аудита, включая логирование решений, возможность ручного переопределения и отчётность по точности прогнозов.

Практические примеры и результаты пилотных внедрений.

В пилотном проекте для сети распределительных центров цифровой двойник сократил среднее время обработки входящего потока на 22% за счет динамического распределения транспортных средств по слотам и оптимизации маршрутов внутри склада. Система резервировала слоты, перераспределяла ресурсы и уведомляла операторов о потенциальных узких местах.

В другом случае модель прогнозирования задержек на таможне снизила долю просроченных поставок на 31% за счёт заблаговременного переключения на альтернативные маршруты и терминалы. Это позволило избежать штрафов и сохранить уровень сервиса при непредвиденных сбоях.

Результаты подтверждают, что цифровой двойник представляет собой не просто инструмент визуализации, а является реальным механизмом управления, влияющим на ключевые операционные показатели. Он трансформирует логистику из реактивной в проактивную, обеспечивая устойчивость к внешним шокам и повышение эффективности.

Заключение.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Интеграция цифровых двойников смещает фокус с реагирования на сбои на проактивное управление рисками и ресурсами. Сквозная модель, синхронизированная с TMS/WMS и внешними источниками, позволяет прогнозировать задержки, перераспределять мощности и тестировать сценарии без остановки операций. Экономический эффект проявляется в снижении издержек, росте точности планирования и улучшении сервиса. При грамотной организации проекта окупаемость достигается в течение первого года.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку отраслевых шаблонов внедрения, стандартизацию моделей данных и методов оценки точности прогнозов. Перспективно развитие межкорпоративных цифровых двойников для сквозной видимости и координации между участниками цепи поставок, а также интеграция с ИИ и ML для повышения точности и адаптивности моделей.

Список литературы

1. Иванов, Ф. Д. Возможности использования искусственного интеллекта при управлении цепями поставок / Ф. Д. Иванов // Экономика и управление. – 2024. – Т. 30, № 9. – С. 1121–1129.

2. Ивашкин, М. В. Модель цифрового двойника для логистической цепи поставок Российской Федерации / М. В. Ивашкин // Весенние дни науки: сборник докладов международной конференции студентов и молодых учёных. – Екатеринбург, 2023. – С. 743–746.

3. Мамыр, Ж. Цифровые двойники в логистике / Ж. Мамыр // Логистика – Евразийский мост : материалы XIX Международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2024. – С. 265–269.

4. Столяров, А. Д. Цифровая трансформация логистики предприятия с использованием цифровых двойников / А. Д. Столяров, А. М. Файзуллина, В. И. Абрамов // Beneficium. – 2024. – Т. 2, № 51. – С. 23–31.

5. Цифровизация промышленности. Обзор TAdviser. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Обзор_Цифровизация_промышленности_2024 (дата обращения: 25.10.2026). – Текст : электронный.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

6. Market Guide for Technologies Supporting a Digital Twin of an Organization. – URL: https://cosmotech.com/resources/article/market-guide-for-technologies-supporting-a-digital-twin-of-an-organization/ (дата обращения: 25.10.2026). – Текст : электронный.

7. McKinsey & Company. Digital in Supply Chain: Unlocking Value Through Technology. – 2023. – P. 18–22.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)