

УДК 33.338

12. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СПРОСА И УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

Исайкина А. Л., студент гр.373901, Каштелян Д. А., студент гр.373901

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

г. Минск, Республика Беларусь

Маклакова О. М. – старший преподаватель кафедры менеджмента

Аннотация. В условиях цифровой трансформации экономики и стремительного роста электронной коммерции традиционные методы прогнозирования спроса и управления товарными запасами демонстрируют недостаточную эффективность. Данная работа посвящена исследованию потенциала технологии цифровых двойников как инновационного инструмента для оптимизации логистических процессов в онлайн-ритейле. В статье рассматривается сущность технологии, анализируются механизмы ее интеграции с системами прогнозирования спроса на основе искусственного интеллекта и больших данных. Особое внимание уделяется практическим кейсам применения цифровых двойников в деятельности зарубежных и отечественных компаний, включая опыт Республики Беларусь. На основе анализа открытых данных и научных публикаций проведена оценка экономической эффективности внедрения цифровых двойников в складскую логистику электронной коммерции на примере крупнейшего белорусского онлайн-гипермаркета 21vek.by. В заключении систематизированы основные барьеры и перспективы развития технологии в контексте цифровой трансформации электронной коммерции.

Ключевые слова. Цифровой двойник, электронная коммерция, прогнозирование спроса, управление запасами, складская логистика, искусственный интеллект, большие данные, цифровая трансформация, оптимизация цепочек поставок, экономическая эффективность

Современный этап развития экономики характеризуется ускорением изменений, происходящих в обществе под влиянием внедрения новых информационных технологий, что позволяет заключить об актуальности процесса цифровизации, который представляет собой качественные преобразования в способах передачи и получения информации, технологиях и организации деятельности посредством перевода в электронную форму [1]. Электронная коммерция демонстрирует устойчивый рост, становясь доминирующим каналом розничной торговли, что обостряет конкуренцию и требует от ритейлеров повышения операционной эффективности.

Ключевыми проблемами, с которыми сталкиваются компании электронной коммерции, являются: высокая волатильность спроса, необходимость минимизации издержек на хранение, риск образования неликвидных запасов и, одновременно, потери прибыли из-за дефицита товара. Традиционные модели прогнозирования, основанные на анализе временных рядов (такие как скользящая средняя, ARIMA, метод Хольта-Винтерса), часто не справляются с непредсказуемыми изменениями потребительского поведения, особенно в периоды пиковых нагрузок или макроэкономических шоков. Как отмечается в исследовании компании Forecast NOW!, классические методы усредняют итоговые значения спроса, что часто сказывается на качестве и точности прогнозов, тогда как использование вероятностных моделей позволяет учитывать весь спектр возможных сценариев развития событий [3].

В Республике Беларусь, как и во многих странах, все еще функционирует значительное количество складов низкой классности, что свидетельствует о недостаточном уровне развития цифровых технологий и автоматизации в складской отрасли. Отсутствие современных информационных систем управления и автоматизированных средств обработки данных приводит к значительным затруднениям в учете товарно-материальных запасов, а также ограничивает возможности оперативного контроля и прогнозирования складских операций [6]. В условиях растущей конкуренции и необходимости обеспечения высокого уровня сервиса данные проблемы становятся критически значимыми, что подчеркивает актуальность внедрения передовых цифровых технологий, таких как системы управления складом (WMS) и цифровые двойники.

Цель данной работы заключается в комплексном анализе возможностей применения технологии цифровых двойников для повышения точности прогнозирования спроса и эффективности управления товарными запасами в сфере электронной коммерции, а также в количественной оценке экономического эффекта от внедрения данной технологии.

Задачи исследования включают:

- 1 Раскрыть понятие и архитектуру цифрового двойника применительно к задачам управления цепочками поставок и складской логистики.
- 2 Исследовать механизмы интеграции цифровых двойников с системами прогнозирования спроса на основе искусственного интеллекта и больших данных.
- 3 Проанализировать практические примеры внедрения технологии в деятельность зарубежных и отечественных (белорусских) компаний.

4 Провести количественную оценку экономической эффективности внедрения цифрового двойника склада на основе данных о стоимости внедрения и научно подтвержденных эффектах на примере крупнейшего белорусского онлайн-гипермаркета 21vek.by.

5 Выявить основные барьеры и ограничения при имплементации цифровых двойников и оценить перспективы развития технологии в контексте цифровой трансформации электронной коммерции.

Термин «цифровой двойник» (Digital Twin) впервые появился у Майкла Гривза в работе «Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода» [8]. В современном понимании цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического объекта, процесса или системы, которая не только статично отображает его характеристики, но и динамически синхронизируется с ним в реальном времени за счет потоков данных от сенсоров и IoT-устройств [2].

Существуют различные подходы к определению данной технологии. Одни исследователи считают, что цифровой двойник является интегрированной моделью готового продукта, созданной для отображения всех производственных дефектов и постоянного обновления с учетом износа продукта. Другие описывают цифровой двойник как цифровую модель физического объекта с поддержкой датчиков, которая изображает объект в режиме реального времени. В общем, цифрового двойника можно определить как виртуальную копию физического мира, которая на микро- и макроуровне с помощью набора математических моделей описывает состояние объекта и всех его элементов, помогая при этом оптимизировать эффективность бизнеса [1].

Ключевое отличие цифрового двойника от простой имитационной модели или системы автоматизированного проектирования (САПР) заключается в наличии автоматизированного двустороннего потока данных. Цифровой двойник – это больше, чем любой САПР, полностью инкапсулированный в компьютерную среду, которая продемонстрировала успех в моделировании сложных сред [9]. Изменения в физическом объекте мгновенно отражаются в цифровой модели, и наоборот, управляющие воздействия, отработанные на модели, могут быть применены к реальному объекту.

Выделяют три уровня зрелости цифровых моделей [5]:

1 Цифровая модель (Digital Model): ручной обмен данными между физическим и цифровым объектом.

2 Цифровая тень (Digital Shadow): автоматизированный односторонний поток данных от физического объекта к цифровому.

3 Цифровой двойник (Digital Twin): полностью интегрированная система с автоматическим двусторонним потоком данных.

Работа виртуального двойника строится на непрерывном обмене данными: все, что происходит в реальном мире, мгновенно отражается в цифровом, и наоборот – изменения, протестированные в модели, могут быть безопасно внедрены в физический процесс. Основные этапы создания цифровой реплики включают: сбор и импорт данных, формирование цифровой модели, интеграцию потоков данных в реальном времени, визуализацию и симуляцию, прогнозирование, развертывание и эксплуатацию, а также эволюцию и самообучение [5].

Цифровой двойник основан на технологиях больших данных (Big Data). Данные поступают в режиме реального времени по множеству измерений, создавая профиль объекта или процесса в оцифрованном мире, что позволяет передавать значимые данные о производительности системы и принимать обоснованные решения в реальном мире. Появление все более удобных и бюджетных инструментов обработки и хранения больших данных позволило увеличить количество вариантов использования и возможностей для создания цифровых двойников, что, в свою очередь, повысило ценность для бизнеса [1].

Точность прогнозирования спроса является критическим фактором успеха в электронной коммерции. Цифровые двойники открывают новые возможности в этой области благодаря способности обрабатывать гетерогенные данные. Как отмечается в исследовании компании Forecast NOW!, на вход алгоритма поступает история продаж и остатков за прошлые периоды, которая очищается от аномальных всплесков, сезонности и промоакций. После очистки программа строит цифровую копию товара, снимая все возможные характеристики спроса: частоту продаж, периодичность, объемы [3].

Ключевую роль играет симбиоз цифровых двойников и искусственного интеллекта. Искусственный интеллект обеспечивает скорость обработки данных и выявления паттернов, в то время как цифровой двойник гарантирует точность за счет детального моделирования конкретных операционных сценариев. Использование машинного обучения позволяет цифровому двойнику самостоятельно предлагать способы оптимизации складских операций на основе конкретных условий и исторических данных [6].

Одним из наиболее значимых преимуществ использования цифровых двойников для прогнозирования спроса является переход от детерминированных к вероятностным моделям. В отличие от классических методов, выдающих одно число в качестве прогноза, цифровой двойник позволяет получить распределение вероятностей продаж.

После создания цифровой копии конкретного товара проводится моделирование возможных вариантов развития событий в будущем. Для этого программа проводит 100 000 экспериментов в виртуальной среде. В результате формируется распределение вероятностей, где для каждого возможного

объема спроса указана вероятность его возникновения. Например, столбец на гистограмме может показывать, что в 16 000 экспериментах не было продано ни одного товара (вероятность 16%), в 10 000 экспериментах продано 2 единицы (вероятность 10%) и т.д.

Такой подход позволяет отказаться от усреднения показателей и учитывать весь спектр возможных сценариев. На основе полученного распределения можно определить оптимальный уровень запаса для достижения целевого уровня сервиса. Если целевой уровень сервиса составляет 95%, то необходимый объем запаса определяется как значение, которое покрывает 95% всех возможных сценариев спроса [3].

Цифровой двойник склада представляет собой точное виртуальное представление физической среды склада, постоянно пополняемое данными из реального мира. Эти данные поступают из различных источников, таких как датчики, камеры и другие интеллектуальные устройства, обеспечивая детальное и актуальное отображение складской среды.

Создание цифрового двойника на складе открывает инновационные возможности для оптимизации логистических процессов и повышения эффективности и точности складских операций. Эта виртуальная модель не только обеспечивает комплексный мониторинг в режиме реального времени, но и позволяет тестировать будущие сценарии с помощью моделирования и принимать обоснованные решения.

Моделирование цифрового двойника на складе основано на интеграции физических и виртуальных источников данных, взаимодействующих друг с другом в реальном времени. Первоначально создается подробная модель склада, отображающая все соответствующие физические характеристики, такие как стеллажи, зоны хранения, транспортные маршруты и хранящиеся товары. В эту модель непрерывно поступают данные, собираемые с помощью различных датчиков, включая положение товаров, уровень температуры и влажности, а также схемы движения погрузчиков и другой техники.

Мониторинг склада с помощью цифровых двойников в режиме реального времени предоставляет множество преимуществ, выходящих далеко за рамки простого отслеживания запасов [6]:

- 1 Повышение прозрачности. Операторы склада могут в любое время и в любом месте получить полный обзор текущего уровня запасов и их местоположения. Это не только упрощает управление запасами, но и позволяет точно планировать и координировать перемещение товаров.

- 2 Раннее выявление проблем. Непрерывный мониторинг позволяет быстро обнаруживать и анализировать аномалии, такие как необычные схемы перемещения или изменения температуры. Это помогает предотвратить повреждение хранящихся товаров и сократить время простоя оборудования.

- 3 Оптимизированное планирование ресурсов. Точное знание уровня запасов и их перемещения позволяет операторам более эффективно распределять персонал и оборудование, минимизируя время ожидания и ненужные транспортные маршруты.

- 4 Экологическая устойчивость. За счет минимизации складских площадей, оптимизации транспортных маршрутов и сокращения отходов цифровой двойник способствует более устойчивому управлению складом.

При управлении запасами цифровой двойник может быть использован для решения следующих задач [3]:

- 1 Определение оптимального товарного запаса;
- 2 Планирование перемещений от поставщиков и между складами и торговыми точками;
- 3 Моделирование распределения запасов через распределительный центр;
- 4 Моделирование запасов при проведении промо-акций;
- 5 Определение рисков дефицита, перетарки, недопоставки и частичной поставки;
- 6 Анализ возможных вариантов событий.

Традиционно страховой запас рассчитывается на основе статистических отклонений. Цифровой двойник позволяет делать этот показатель динамическим. В периоды низкого спроса система автоматически сокращает резервы, высвобождая оборотные средства, а в периоды высокой неопределенности – увеличивает их. Кроме того, технология позволяет отслеживать товар на всех этапах – от поступления на склад до доставки клиенту и, в случае возврата, его обратной интеграции в товарные запасы [6].

Мировой опыт демонстрирует успешные примеры применения цифровых двойников в деятельности крупнейших ритейлеров и логистических компаний.

Walmart использует цифровые двойники для управления своими складами и оптимизации цепочек поставок [2]. Благодаря созданию цифровых двойников склада компания выявила неэффективные процессы, в том числе связанные с энергопотреблением, и произвела интеграцию системы управления складом с системами автоматизации для управления освещением, отоплением и охлаждением. В результате энергопотребление сократилось на 15%, уменьшение выбросов углекислого газа составило 10%, а эффективность использования ресурсов компании в целом увеличилась на 8% [10].

Alibaba применяет технологию цифровых двойников с целью прогнозирования спроса на продукты и эффективного управления запасами на своих складах [2].

DHL, мировой лидер в области логистики, создала цифровую модель склада с помощью данных датчиков IoT, GPS и разработанных алгоритмов для анализа данных, интегрировав ее в WMS-систему. Благодаря этому DHL (подразделение DHL) добилась роста производительности труда на 15% и

улучшения точности прогнозирования спроса на 25%, что привело к сокращению складских затрат на 10% [10].

В Республике Беларусь технология цифровых двойников также находит применение, хотя ее распространение пока ограничено крупными предприятиями.

Компания Беларуськалий использует цифровые двойники для управления процессом добычи калийных солей. Компания Белшина применяет данную технологию для оптимизации производства шин [11].

Центральный научно-исследовательский и проектно-технологический институт организации и техники управления (ЦНИИТУ) стремится создать и внедрять комплексную систему, охватывающую учет и управление предприятием, цифровые двойники продуктов и производственных процессов. Институт уже проводит пилотные проекты на таких предприятиях, как «БелОМО», «Витязь», «Белвест» и «Полесье» [2].

Компания EPAM Systems разрабатывает цифровые двойники для промышленных предприятий, а также решения для управления и контроля производственными процессами [2]. На одном из крупных логистических центров Минска внедрение цифрового двойника позволило сократить время обработки заказов и улучшить точность учета запасов, что существенно повысило качество клиентского сервиса [7].

Несмотря на наличие качественных описаний эффектов от внедрения цифровых двойников, в научной литературе и открытых источниках отсутствуют систематизированные количественные оценки экономической эффективности данной технологии применительно к складской логистике электронной коммерции в Республике Беларусь. В рамках настоящего исследования предпринята попытка восполнить этот пробел на основе анализа доступных данных о стоимости внедрения, научно подтвержденных эффектах и практических кейсах.

Для оценки экономической эффективности внедрения цифрового двойника склада в электронной коммерции использована следующая методология:

1 Определение стоимости внедрения на основе анализа реальных тендерных данных по закупке WMS-систем в Республике Беларусь и оценки затрат на IoT-инфраструктуру и интеграционные модули.

2 Оценка ожидаемого экономического эффекта на основе научно подтвержденных данных о снижении уровня запасов, сокращении простоев из-за дефицита и уменьшении операционных расходов.

3 Расчет срока окупаемости инвестиций (Payback Period) как отношения суммарных инвестиций к годовому экономическому эффекту.

В качестве объекта исследования рассматривается крупнейший белорусский онлайн-гипермаркет 21vek.by – лидер электронной коммерции Республики Беларусь. Согласно исследованию видимости сайтов Байнета, проведенному digital-агентством AMDG по итогам IV квартала 2025 года, 21vek.by занимает 1-е место в поисковой выдаче Google и Яндекс в категориях «Мебель» и «Сантехника», а также входит в ТОП-3 категорий «Косметика» и «Мобильные телефоны» [4]. В категории «Сантехника» в Яндексе лидерство удержал 21vek.by с показателем видимости 91,78%, а в категории «Мебель» в Яндексе его видимость составила 95,20% [4].

Для оценки масштаба деятельности компании использованы данные о совокупном обороте белорусского рынка электронной коммерции. По состоянию на конец 2024 года удельный вес розничного товарооборота интернет-магазинов составил 11,7% в объеме розничного товарооборота в целом, что в 2,1 раза выше показателя предыдущего года [2, 6]. Общее количество зарегистрированных интернет-магазинов и площадок в Республике Беларусь по состоянию на 1 января 2025 года составило почти 31 тыс., что в 2,6 раза больше, чем в 2020 году [2].

Согласно данным бизнес-справочника ZoomInfo, годовая выручка компании 21vek.by составляет \$61.7 млн [12]. Для целей настоящего исследования производится пересчет в белорусские рубли по среднему курсу Национального банка Республики Беларусь за 2025 год (1 USD = 3,2 BYN), что дает 197 440 000 BYN. Для удобства расчетов и сохранения консервативного подхода принимается значение 200 000 000 BYN.

Таблица 1 – Параметры объекта исследования

Параметр	Значение
Наименование	21vek.by
Сфера деятельности	Онлайн-гипермаркет (электроника, бытовая техника, мебель, товары для дома)
Позиция в SEO-рейтинге	1-е место в категориях «Мебель», «Сантехника», «Бытовая техника»; ТОП-3 в категориях «Косметика», «Мобильные телефоны»
Оценка годового товарооборота	200 000 000 BYN

Анализ открытых тендерных данных позволяет оценить стоимость внедрения автоматизированной системы управления складом (WMS) в Республике Беларусь. Согласно тендеру №320926948, размещенному на портале BiCoTender, стоимость закупки и внедрения WMS-системы для логистического центра в Минске составила 700 000 BYN [13].

Однако полноценный цифровой двойник требует дополнительных затрат на развертывание IoT-инфраструктуры (датчики, сенсоры, камеры), а также на интеграцию аналитических модулей, обеспечивающих вероятностное прогнозирование и машинное обучение. На основе данных о структуре затрат при внедрении цифровых двойников [5] и опыте российской компании Технониколь [15], дополнительные инвестиции оцениваются в 350 000 BYN.

Таблица 2 – Структура инвестиций в создание цифрового двойника склада

Статья затрат	Сумма, BYN
WMS-система (базовое внедрение)	700 000
IoT-инфраструктура и сенсоры	200 000
Интеграция и аналитические модули	150 000
Итого инвестиции	1 050 000

Для расчета эффекта приняты следующие допущения о текущих потерях и издержках на основе среднеотраслевых показателей для компаний масштаба 21vek.by:

1 Потери от дефицита – 5% от годового оборота. Данный показатель соответствует среднерыночным значениям для электронной коммерции в условиях недостаточно точного прогнозирования спроса.

2 Издержки на хранение избыточных запасов – 4% от годового оборота. Включают затраты на аренду складских площадей, обслуживание, страхование и альтернативные издержки замороженного капитала.

3 Операционные расходы склада – 10% от годового оборота. Включают заработную плату персонала, коммунальные платежи, амортизацию оборудования и прочие текущие затраты.

Таблица 3 – Исходные экономические показатели (до внедрения)

Показатель	Значение, BYN	Обоснование
Годовой оборот	200 000 000	ZoomInfo
Потери от дефицита	750 000	5% от оборота
Издержки на хранение избыточных запасов	600 000	4% от оборота
Операционные расходы склада	1 500 000	10% от оборота
Итого потери и издержки	2 850 000	

Для количественной оценки эффектов использованы результаты научных исследований и данные из практических кейсов.

В работе «Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики» представлены следующие результаты практической апробации [14]:

- 1 Снижение среднего уровня запасов – 25%;
- 2 Сокращение времени реакции на сбои – в 4 раза;
- 3 Уменьшение простоев из-за дефицита – 87%.

Кейс российской компании Технониколь, внедрившей цифровой двойник склада готовой продукции в 2025 году, демонстрирует [15]:

- 1 Рост производительности труда на складе – 60%;
- 2 Увеличение пропускной способности – 25%;
- 3 Сокращение времени обработки операций – 35%;
- 4 Снижение операционных расходов – 15%.

При этом компания Технониколь отмечает, что создание цифровой модели требует на 80% меньше ресурсов, чем реализация физических изменений на складе [15].

На основе представленных данных проведен расчет годового экономического эффекта от внедрения цифрового двойника склада для компании 21vek.by. В расчете использованы научно подтвержденные эффекты: сокращение простоев из-за дефицита на 87% [14], снижение уровня запасов на 25% [14] и сокращение операционных расходов на 15% [15].

Таблица 4 – Расчет годового экономического эффекта

Показатель	До внедрения, BYN	После внедрения, BYN	Экономия, BYN	Обоснование
Потери от дефицита	10 000 000	1 300 000	8 700 000	Сокращение простоев из-за дефицита на 87%
Издержки на хранение	8 000 000	6 000 000	2 000 000	Снижение уровня запасов на 25%

избыточных запасов				
Операционные расходы склада	20 000 000	17 000 000	3 000 000	Снижение операционных расходов на 15%
Итого годовая экономия	38 000 000	24 300 000	13 700 000	

Срок окупаемости инвестиций (Payback Period) рассчитывается как отношение суммарных инвестиций к годовому экономическому эффекту:

$$PP = 1\,050\,000 \text{ BYN} / 13\,700\,000 \text{ BYN/год} \approx 0.077 \text{ года} \approx 28 \text{ дней (менее 1 месяца)}$$

Полученный срок окупаемости (менее 1 месяца) свидетельствует о высокой экономической эффективности внедрения технологии для крупных игроков электронной коммерции. Столь быстрая окупаемость объясняется масштабом деятельности компании: при годовом обороте 200 млн BYN даже небольшое процентное снижение потерь дает значительный абсолютный эффект.

Анализ структуры годовой экономии позволяет выявить наиболее значимые факторы, обеспечивающие возврат инвестиций для компании 21vek.by:

- 1 Сокращение потерь от дефицита – 63,5% от общего эффекта (8 700 000 BYN);
- 2 Снижение операционных расходов склада – 21,9% эффекта (3 000 000 BYN);
- 3 Оптимизация уровня запасов – 14,6% эффекта (2 000 000 BYN).

Наибольший вклад в экономический эффект вносит снижение потерь от дефицита, что подтверждает ключевую роль цифровых двойников в повышении точности прогнозирования спроса и обеспечении доступности товара.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение цифровых двойников сопряжено с рядом серьезных вызовов.

1 Качество и интеграция данных. Эффективность цифрового двойника напрямую зависит от качества исходных данных. Проблема «мусор на входе – мусор на выходе» (garbage in – garbage out) стоит здесь особенно остро. Многие компании сталкиваются с разрозненностью данных в устаревших legacy-системах, что требует значительных инвестиций в построение единой шины данных. Даже самые продвинутые алгоритмы бесполезны при низком качестве исходных данных, а проблема «информационного шума» возникает, когда данные поступают из сотен источников, но не унифицированы и не синхронизированы [5].

2 Высокая стоимость внедрения. Создание и применение цифровых двойников связано со значительными инвестициями в программное обеспечение, сенсорную инфраструктуру, облачные сервисы и обучение персонала. Как показано в разделе 4, общая стоимость внедрения для крупного логистического центра может составлять порядка 1 млн BYN. Особенно трудоемким этапом становится интеграция цифрового двойника с уже существующими системами – ERP, CAD, MES, PLM, SCADA. Это не разовое решение, а долгосрочная программа развития, требующая стратегического подхода и финансовых вложений [5].

3 Недостаток компетенций. Эффективное использование цифровых двойников требует специалистов, умеющих работать с данными, моделями и аналитикой. Многие компании сталкиваются с нехваткой экспертизы и сопротивлением изменениям, ведь внедрение двойников подразумевает перестройку бизнес-процессов и формирование новой культуры принятия решений на основе данных [5]. Для успешного преодоления этих негативных моментов особое внимание необходимо уделять подбору специалистов, обладающих соответствующими знаниями, опытом и креативным мышлением [7].

4 Кибербезопасность. Цифровой двойник содержит критически важные сведения о производстве, оборудовании и людях. Утечка такой информации может привести к серьезным финансовым потерям и репутационным рискам. Поэтому ключевой задачей становится надежная защита каналов передачи данных и контроль доступа пользователей [5]. Необходимо разработать соответствующие правовые нормы и стандарты для защиты данных и предотвращения их утечек [1].

Несмотря на перечисленные барьеры, перспективы развития технологии цифровых двойников в Республике Беларусь оцениваются как благоприятные. Развитие национальной инфраструктуры поддержки цифровизации, включая создание центров компетенции по цифровым технологиям, реализацию государственных программ цифровой трансформации и развитие инновационной экосистемы, создает необходимые предпосылки для более широкого распространения данной технологии [1]. Важным фактором является также снижение стоимости IoT-устройств и облачных сервисов, что постепенно делает технологию доступной не только для крупных, но и для средних компаний.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что технология цифровых двойников является одним из наиболее перспективных направлений развития логистики и управления запасами в электронной коммерции. Способность создавать точные виртуальные копии сложных систем, интегрировать разнородные данные в реальном времени и проводить многовариантное вероятностное

прогнозирование открывает перед ритейлерами принципиально новые возможности для повышения эффективности.

Применение цифровых двойников позволяет решить ключевое противоречие современной логистики: между необходимостью поддержания высокого уровня сервиса (наличие товара) и стремлением к минимизации оборотного капитала (отсутствие излишков). Как показал анализ кейсов Walmart, Alibaba и DHL, внедрение технологии обеспечивает измеримый экономический эффект в виде сокращения дефицита, ускорения оборачиваемости, повышения точности прогнозов и снижения энергопотребления.

В рамках настоящей работы впервые для белорусского контекста проведена количественная оценка экономической эффективности внедрения цифрового двойника склада на примере крупнейшего отечественного онлайн-гипермаркета 21vek.by. На основе анализа реальных тендерных данных по стоимости WMS-систем в Республике Беларусь и научно подтвержденных эффектов от внедрения технологии установлено, что:

1 Объем инвестиций в создание полноценного цифрового двойника склада для компании 21vek.by составляет порядка 1 050 000 BYN, включая базовую WMS-систему, IoT-инфраструктуру и аналитические модули.

2 Годовой экономический эффект достигает 13 700 000 BYN за счет сокращения потерь от дефицита (8 700 000 BYN), снижения операционных расходов склада (3 000 000 BYN) и оптимизации уровня запасов (2 000 000 BYN).

3 Срок окупаемости инвестиций составляет менее 1 месяца (28 дней), что объясняется масштабом деятельности компании и подтверждает высокую экономическую целесообразность внедрения технологии для крупных игроков белорусского e-commerce.

В Республике Беларусь технология цифровых двойников начинает внедряться на крупных предприятиях, таких как Беларуськалий, Белшина, а также в рамках проектов ЦНИИТУ и EPAM Systems. Однако для более широкого распространения необходимо развитие соответствующей инфраструктуры и экосистемы, включая создание центров компетенции по цифровым технологиям, обучение специалистов и развитие инновационной экосистемы [1]. Также важно учитывать вопросы безопасности данных и конфиденциальности, связанные с использованием цифровых двойников, и разработать соответствующие правовые нормы и стандарты.

Внедрение цифровых двойников – это отражение изменений в обществе. Действия по введению цифровых двойников в экономику необходимо сопровождать комплексом мер, которые минимизируют все минусы, неизбежно возникающие в процессе цифровизации. Преобразования общества в процессе развития цифровой экономики неизбежны, и цифровые двойники станут одним из ключевых инструментов этого преобразования [1].

Список использованных источников:

1. Цифровые двойники и их развитие на территории Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/52930/1/Kupreichik_Cifrovie.pdf – Дата доступа: 20.03.2026.
2. «Цифровые двойники»: практика применения зарубежными и отечественными компаниями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.bsui.by/bitstream/123456789/309379/1/711-714.pdf> – Дата доступа: 20.03.2026.
3. Как технология цифрового двойника помогает в управлении запасами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fnov.ru/articles/digital-twin/> – Дата доступа: 20.03.2026.
4. AMDG. Укрепление маркетплейсов в FMCG и новый лидер в «Лизинге»: SEO-рейтинг белорусских компаний на конец 2025 года [Электронный ресурс] // Официальный сайт digital-агентства AMDG. – Минск, 2026. – 13 января. – Режим доступа: <https://amdg.by/blog/ukreplenie-marketpleysov-v-fmcg-i-novyy-lider-v-lizinge-seo-rejting-belorusskikh-kompaniy-na-konet> – Дата доступа: 20.03.2026.
5. Цифровые двойники: что это и как они работают [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://productstar.ru/blog/cifrovye-dvoyniki-digital-twin-cto-eto-i-kak-oni-rabotaiut/> – Дата доступа: 20.03.2026.
6. Инновационная складская логистика с использованием цифровых двойников и искусственного интеллекта – технология, обеспечивающая отслеживание запасов в режиме реального времени [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xpert.digital/ru/> – Дата доступа: 20.03.2026.
7. Цифровой двойник склада как инструмент повышения эффективности управления запасами на складе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/161457/198-202.pdf?sequence=1&isAllowed=y> – Дата доступа: 20.03.2026.
8. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication – LLC, 2014, 7p.
9. Т. О. Толстых, Л. А. Гамидуллаева, Е. В. Шкарупета Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производства и индустрии 4.0. Т.11. № 1. – Экономика в промышленности, 2018. – с. 11-19.
10. Are you ready to implement AI like Walmart? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://the.codework.com/explore/are-you-ready-to-implement-ai-like-walmart/> – Дата доступа: 20.03.2026.
11. РБК Тренды [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://trends.rbc.ru/trends/> – Дата доступа: 20.03.2026.
12. ZoomInfo. 21vek.by Company Profile [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zoominfo.com/p/21vekby/> – Дата доступа: 20.03.2026.
13. BiCoTender. Тендер №320926948: Закупка и внедрение автоматизированной системы управления складом (WMS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bicotender.ru/it-kompiutery-sviaz/zakupka-i-vnedrenie-avtomatizirovannoi-sistemy-upravleniya-skladom-wms-minsk-tender320926948.html> – Дата доступа: 20.03.2026.
14. Кузнецова Е.С., Щеглов Д.К. Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2025. – Т. 28, № 4. – С. 56-63.
15. MASHNEWS. Техноиколь модернизирует склад с помощью VR и цифровых двойников [Электронный ресурс]. – 2025. – 25 марта. – Режим доступа: <https://mashnews.ru/tehnokol-s-pomoshhy-vr-i-tsifrovyykh-dvoynikov/> – Дата доступа: 20.03.2026.

UDC 33.338

USING DIGITAL TWINS FOR DEMAND FORECASTING AND INVENTORY MANAGEMENT IN E-COMMERCE

Isaykina A.L., student of group 373901, Kashtelyan D.A., student of group 373901

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Maklakova O. M. – Senior Lecturer at the Department of Management

Annotation. In the context of digital transformation of the economy and the rapid growth of e-commerce, traditional methods of demand forecasting and inventory management are proving insufficiently effective. This paper investigates the potential of Digital Twin technology as an innovative tool for optimizing logistics processes in online retail. The article examines the essence of technology, analyzes the mechanisms of its integration with demand forecasting systems based on artificial intelligence and big data. Special attention is paid to practical cases of Digital Twin application in the activities of foreign and domestic companies, including the experience of the Republic of Belarus. Based on the analysis of open data and scientific publications, an assessment of the economic efficiency of implementing digital twins in warehouse logistics of e-commerce is carried out using the example of the largest Belarusian online hypermarket 21vek.by. The conclusion systematizes the main barriers and prospects for the technology's development in the context of the digital transformation of e-commerce.

Keywords. Digital twin, e-commerce, demand forecasting, inventory management, warehouse logistics, artificial intelligence, big data, digital transformation, supply chain optimization, economic efficiency.