

УДК 656.13:658
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/40>

Прокудін О.Г.

Національний транспортний університет

Воркут Т.А.

Національний транспортний університет

Петунін А.В.

Національний транспортний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИКИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЦЕНТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ DIGITAL TWIN: СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ПІДХОДИ

У статті досліджуються можливості оптимізації логістичних процесів розподільчих центрів шляхом впровадження технології Digital Twin. Сучасні розподільчі центри стикаються з низкою викликів, пов'язаних з оптимізацією матеріальних потоків, прогнозуванням попиту, зниженням транспортних і складських витрат, а також забезпеченням гнучкості ланцюгів постачання в умовах мінливих ринкових факторів. Традиційні підходи управління дедалі частіше виявляються недостатніми через складність координації між постачальниками, центрами дистрибуції та торговельними точками. У статті «Оптимізація логістики розподільчих центрів за допомогою Digital Twin: сучасні інформаційні та комунікаційні підходи» обґрунтовано доцільність використання технології Digital Twin як інноваційного інструменту, що забезпечує високоточне моделювання, аналіз і оптимізацію логістичних процесів.

Метою дослідження є вивчення потенціалу технології Digital Twin для підвищення ефективності роботи розподільчих центрів. Об'єктом виступають внутрішні й зовнішні логістичні процеси, пов'язані з дистрибуцією товарів. Методологічну основу становить аналіз наукових публікацій і практичних кейсів провідних компаній (Siemens, McKinsey, BEUMER Group, RELEX Solutions). У роботі запропоновано трирівневий алгоритм впровадження цифрових двійників: створення цифрової моделі розподільчого центру з урахуванням категоризації товарів, просторово-часових параметрів, транспортних та складських витрат; інтеграція даних з різних джерел та застосування прогнозової аналітики на базі методів машинного навчання для передбачення змін попиту; оптимізація потоків із використанням математичного програмування та сценарного моделювання.

Результати дослідження свідчать, що впровадження Digital Twin здатне скоротити транспортні витрати на 15–25%, покращити оборотність запасів на 10–30% та підвищити точність виконання замовлень на 5–15%. Успішні приклади, як-от кейс Siemens, підтверджують можливість досягнення значної економії витрат та підвищення продуктивності без зниження рівня сервісу. Водночас виявлено низку бар'єрів, серед яких — проблеми якості даних, дефіцит кваліфікованих кадрів та організаційний опір змінам. Подолання цих перешкод можливе завдяки поетапному впровадженню та демонстрації «швидких перемог».

Практична значущість роботи полягає в тому, що вона формує базу для використання Digital Twin у діяльності роздрібних, виробничих і логістичних компаній, а також пропонує інструментарій для управлінців та ІТ-фахівців. Результати можуть бути використані як у професійній практиці, так і в освітньому процесі з підготовки спеціалістів у сфері логістики та управління ланцюгами постачань.

Ключові слова: Digital Twin, розподільчий центр, логістика, ланцюг постачань, оптимізація, прогнозування, витрати, ефективність, автоматизація.

Постановка проблеми. Сучасні логістичні системи розподільчих центрів стикаються з викликами, пов'язаними з оптимізацією потоків товарів, прогнозуванням попиту та мінімізацією витрат на транспортування і складське зберігання. Традиційні підходи до управління логістикою часто виявляються недостатньо ефективними через складність координації між постачальниками, розподільчими центрами та кінцевими точками реалізації. Інтеграція технології Digital Twin в роботу розподільчих центрів являє собою зміну парадигми в управлінні логістикою, дозволяючи організаціям моделювати, аналізувати та оптимізувати складні мережі ланцюгів поставок з безпрецедентною точністю. Створюючи віртуальні репліки фізичних логістичних систем, компанії можуть динамічно моделювати товарні потоки, прогнозувати попит, мінімізувати витрати на транспортування та складування, а також генерувати практичні рекомендації для покращення операційної діяльності. Цей підхід поєднує в собі аналітику даних у режимі реального часу, прогнозне моделювання та сценарне планування для вирішення багатогранних проблем сучасних ланцюгів поставок, від вузьких місць в управлінні запасами до коливань цін на паливо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження підтверджують, що технологія Digital Twin є потужним інструментом для оптимізації логістичних процесів розподільчих центрів, підвищення точності прогнозування попиту та мінімізації витрат на транспортування й зберігання.

Siemens, McKinsey та BEUMER Group акцентують увагу на інтеграції цифрових двійників у логістичні системи. Наприклад, Siemens використовує систему Tenomatix Plant Simulation, яка дозволяє динамічно адаптувати складські операції на основі реальних даних. McKinsey доводить, що цифрові двійники можуть знизити витрати на транспортування до 15% та покращити прогнозування попиту на 25%. BEUMER Group, у свою чергу, аналізує ефективність IoT-датчиків та ERP-систем у поєднанні з Digital Twin для автоматизації складської логістики та розробки оптимальних маршрутів поставок.

Окрему увагу дослідники приділяють впровадженню цифрових двійників у специфічних логістичних сегментах. Так, Ху Б. (Hu B.), Го Г. (Guo H.), Тао С. (Tao X.) та Чжан Ю. (Zhang Y.) [1, с. 73850] розробили Digital Twin-систему для холодних логістичних складів, що дозволяє покращити

контроль температурного режиму та ефективність зберігання товарів у холодильних камерах. Важливість оптимізації логістичних систем через цифрові двійники також відзначають Руохомаа Г. (Ruohomaa H.), Салмінен В. (Salminen V.) та Торккель Й. (Torkkel J.) [4], які підкреслюють їхню роль у розвитку логістичних хабів та управлінні складською інфраструктурою.

Аспекти цифрової трансформації логістичних ланцюгів також розглядаються в роботах, присвячених стратегічним рішенням у сфері автоматизації та планування ресурсів. Оліватосін Абдул-Азіз (Oliwatosin Abdul-Azeez), Александра Огадімма Іхече́ре (Alexsandra Ogadimma Ihechere) та Кураж Ідемудіа (Courage Idemudia) [2, с. 339] досліджують інтеграцію Digital Twin у систему SAP S/4HANA, що дозволяє підвищити прозорість та ефективність управління постачанням. Шень Л. (Shen L.) та Цзан З. (Zang Z.) [5, с. 1827] розробили алгоритм оптимізації ланцюгів постачання на основі блокчейн-технологій, що сприяє підвищенню безпеки та прогнозованості логістичних процесів.

Окремий напрям досліджень Digital Twin стосується стійкого виробництва та екологічної логістики. Хан Мд. С. (Khan Md. S.) та співавтори [6, с. 370] досліджують централізовані цифрові двійники у виробництві, що дозволяють оптимізувати використання ресурсів та покращити екологічну складову постачання. Купалова Г., Гончаренко Н. та Дуднік М. [3, с. 84] аналізують екологічну модернізацію підприємств через логістичні технології, включаючи застосування цифрових двійників для скорочення викидів CO₂ та оптимізації вантажних потоків.

Деякі дослідники фокусуються на інтеграції Digital Twin у прогнозування та управління ланцюгами поставок. Ань Й. (An Y.), Хань Й. (Han Y.), Сюй Й. (Xu Y.), Оуян С. (Ouyang S.), Чжан М. (Zhang M.) та Чень С. (Chen S.) [7, с. 47098] пропонують допоміжну модель для управління логістикою в виробничій сфері, що дозволяє знизити витрати та підвищити ефективність розподілу товарів. Важливість якісних даних для роботи Digital Twin підкреслюється у дослідженні RELEX Solutions, де наголошується на необхідності стандартизації інформаційних потоків та автоматизації процесів обробки великих масивів даних.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують ефективність цифрових двійників у сфері логістики, однак залишається ряд викликів, пов'язаних із інтеграцією даних з різних джерел, управлінням ресурсами та адаптацією логістичних систем до змінного попиту.

Метою статті є оптимізація логістичних процесів розподільчих центрів шляхом впровадження технології Digital Twin.

Виклад основного матеріалу. Цифрове моделювання розподільчого центру: створення Digital Twin. Процес цифрового моделювання передбачає створення детальної моделі фізичного активу. Ця модель, що розробляється за допомогою різних технологій, включає всі необхідні характеристики та параметри реального об'єкта.

Етап 1: Параметризація системи та визначення базових ліній моделі. Процес моделювання починається з комплексної системної параметризації, починаючи з категоризації товарів. Як зазначено в базовій логістичній структурі, це включає в себе різні типи обробки і зберігання для фруктів і овочів, холодозалежних і заморожених продуктів а також товарів, що не потребують спеціальних умов зберігання. Кожна категорія несе унікальні вимоги до щільності зберігання, типів транспортних засобів та показників обороту запасів, які безпосередньо впливають на конфігурацію складу та алгоритми маршрутизації всередині складу.

Паралельно з класифікацією продукції система встановлює макрогрупи для консолідації постачальників. Цей рівень абстракції вирішує складність управління тисячами окремих постачальників шляхом кластеризації їх у функціональні групи на основі географічної близькості, об'єму і частоти відвантаження та сумісності продукту. Така агрегація дозволяє більш точно моделювати витрати на поставки лагера (артикула), зберігаючи гранулярність там, де це операційно критично.

Етап 2: Визначення часових та просторових меж моделі. Ефективне функціонування цифрового двійника вимагає точного визначення часових рамок, із чітким розподілом періодів для збору базових даних (аналіз історичної продуктивності) та вікон моделювання (тестування майбутніх сценаріїв). Ця концепція охоплює як статичні мережі філій і розподільчих центрів (РЦ), так і можливі сценарії їхнього розширення, зокрема відкриття нових супермаркетів і дистрибуційних хабів. Це дозволяє оцінювати ефективність логістичних процесів як у стабільних умовах, так і в умовах можливих змін.

Просторові параметри включають моделювання витрат на транспортування, враховуючи коливання цін на паливо, тарифи зовнішніх перевізників, а також особливості маршрутів, зокрема обмеження, кількість точок та рівень трафіку.

Розрахунок вартості складу здійснюється за багатовимірним підходом, враховуючи постійні

інфраструктурні витрати, такі як оренда та амортизація обладнання, змінні операційні витрати, зокрема оплату праці за приймання, комплектування, пакування, а також плату за крос-докінг, дистрибуцію та відвантаження, а також додаткові витрати на обробку потоку, включаючи рух моно-палет і підйом або спуск зі зберігання.

Ці параметри використовуються в моделі витрат, скоригованій на інфляцію, яка прогнозує фінансові результати в умовах змінної ринкової і поточної ситуації.

Етап 3: Формування обмежень та сценаріїв моделювання. Фізичні та операційні обмеження є важливими вхідними даними для алгоритму Digital Twin. Обмеження пропускної здатності складу виражаються в кількості палет на годину, тоді як пропускна здатність транспорту визначається складом автопарку та коефіцієнтом використання транспортних засобів. Система генерує кілька сценаріїв «що було б, якби», поєднуючи ці обмеження з ринковими змінними та зовнішніми факторами. Серед них – 20% сплеск попиту під час святкових сезонів, 15% скорочення доступності перевізників, а також перебої в логістичних ланцюгах через обмежену доступність інфраструктури, спричинену зруйнованими або пошкодженими дорогами, мостами та залізничними вузлами. Додатково враховуються енергетичні обмеження, такі як відключення електроенергії та нестабільність постачання, що впливають на роботу складських комплексів і транспорту, зокрема холодильного обладнання. Крім того, система розглядає вимушену релокацію складів і виробництв для забезпечення безперебійного постачання товарів у безпечніші регіони, а також зростання попиту на критичні товари, зокрема медикаменти, продукти харчування та паливо, що вимагає адаптивного управління запасами.

На цьому етапі значну користь приносить задокументований підхід McKinsey до моделювання варіативності, коли цифрові двійники тестують розподіл потенційних результатів, а не односторонні оцінки.

Інтелектуальна основа Digital Twin: від інтеграції даних до прогнозування попиту. Точність прогнозування Digital Twin у ланцюгах поставок критично залежить від двох ключових компонентів: інтеграції даних та механізмів динамічного прогнозування попиту. Створення ефективної аналітичної платформи вимагає гармонізації розрізнених потоків даних з різноманітних джерел.

Для ефективної роботи Digital Twin вкрай важлива якісна інтеграція даних з різноманітних

джерел, серед яких ключовими є історичні записи про відвантаження, що фіксують фактичні обсяги товарів, які переміщуються через розподільчі центри до філій, слугуючи основою для розуміння базового попиту та сезонних коливань. Не менш значущою є транспортна телематика, дані GPS-відстеження маршрутів та показники споживання пального якої не тільки оптимізують логістичні процеси, але й надають цінну інформацію про ефективність ланцюга поставок, опосередковано впливаючи на точність прогнозування. Важливими є також журнали системи управління складом, що відображають частоту відбору товарів, тривалість зберігання та інтенсивність перехресних перевантажень, розкриваючи динаміку складських операцій та допомагаючи ідентифікувати потенційні вузькі місця, що, своєю чергою, впливає на точність прогнозів доступності товарів. Нарешті, для врахування зовнішніх факторів, що впливають на загальний попит та необхідне позиціонування запасів, необхідний аналіз ринку, що включає інформацію про заплановані відкриття магазинів, демографічні зміни та активність конкурентів.

RELEX Solutions підкреслює, що якість даних є наріжним каменем успішного впровадження Digital Twin. Значні зусилля необхідні для очищення та стандартизації інформації зі старих систем. Сучасні методи попередньої обробки, такі як автоматизоване виявлення аномалій, інтерполяція пропущених значень та протоколи перерахунку одиниць виміру, вирішують ці проблеми, забезпечуючи надійність даних для подальшого аналізу.

Виходячи за межі традиційних методів прогнозування часових рядів, Digital Twin використовує інтелектуальні механізми динамічного прогнозування попиту. Інтелектуальні механізми динамічного прогнозування попиту в Digital Twin використовують моделі машинного навчання, що аналізують широкий спектр факторів, які впливають на споживчий попит. Зокрема, система враховує кореляцію між погодними умовами та продажами на рівні категорії, що дозволяє, беручи до уваги вплив погоди на певні групи товарів (наприклад, збільшення попиту на прохолодні напої у спеку), проактивно коригувати запаси. Крім того, аналізується вплив настроїв у соціальних мережах на попит на продукцію: аналіз настроїв та обговорень в соціальних мережах дає можливість виявляти тренди та передбачати зміни у споживчих перевагах, що є важливим для оперативного пристосування запасів. Також, система оцінює ефективність рекламних кампаній

у різних географічних регіонах: аналізуючи вплив рекламних акцій, Digital Twin допомагає оптимізувати розподіл ресурсів та прогнозувати сплески попиту у відповідь на маркетингові зусилля.

Ці механізми динамічного прогнозування дозволяють Digital Twin не просто реагувати на зміни попиту, а передбачати їх та проактивно коригувати позиціонування запасів. Дослідження McKinsey підтверджує значний потенціал такого підходу, показуючи, що можливості динамічного розрахунку страхового запасу можуть підвищити рівень виконання обіцянок споживачам на 20%. Таким чином, інтелектуальна основа Digital Twin, що поєднує якісну інтеграцію даних та передові механізми динамічного прогнозування, створює потужну систему для оптимізації ланцюга поставок та підвищення рівня обслуговування клієнтів.

Digital Twin для оптимізації ланцюга поставок використовує складний механізм оптимізації та моделювання потоків, спрямований на багатоцільову мінімізацію витрат. Основний алгоритм системи Digital Twin спрямований на багатоцільову мінімізацію витрат шляхом балансування конкуруючих пріоритетів у трьох ключових центрах. Перш за все, це транспортні витрати, які система розраховує як функцію від об'єму перевезення та відстані, враховуючи такі фактори, як витрати на паливо, оплату праці водіїв та технічне обслуговування транспорту, де ефективна мінімізація є ключовою для загальної оптимізації. Другим важливим центром витрат є витрати на складську обробку, що представляють собою змінні витрати на обробку кожного кубічного метра вантажу, які диференціюються залежно від типу потоку, і оптимізація складських процесів дозволяє знизити ці витрати, підвищуючи загальну ефективність. Нарешті, третім ключовим центром є витрати на зберігання запасів, до вартості яких входять капітальні витрати, пов'язані із заморожуванням коштів у запасах, ризики уцінки товарів через пошкодження або втрату якості, а також ймовірність застарівання продукції, особливо для товарів з коротким терміном придатності, і точне прогнозування та оптимізація рівня запасів дозволяє мінімізувати ці витрати.

Для пошуку оптимальних рішень система використовує змішане цілочисельне програмування, оцінюючи мільйони потенційних комбінацій потоків. Це дозволяє визначити оптимальні за Парето варіанти, що балансують між різними центрами витрат. Додатково, спеціалізовані евристичні алгоритми враховують нелінійні обмеження, такі як обмежена наявність рефрижератор-

ного транспорту в періоди пікового попиту або обмеження пропускної здатності різних зон руху потоків на складі.

В рамках оптимізації потоків, Digital Twin моделює чотири основні стратегії дистрибуції представлені на рисунку 2, кожна з яких ретельно оцінюється системою в реальному часі з урахуванням їх економічних та операційних характеристик. Перша стратегія – стандартна маршрутизація від РЦ до філії, оптимальна для філії в зоні обслуговування конкретного розподільчого центру, мінімізуючи проміжну обробку, скорочуючи час доставки та забезпечуючи стабільність поставок для підтримки високого рівня обслуговування клієнтів. Друга стратегія – перехресне складування (крос-докінг) через другий РЦ, що дозволяє оптимізувати логістику між віддаленими регіонами, де на першому РЦ формуються палети для філій іншого РЦ, транспортування відбувається через проміжний РЦ для доукомплектування, підвищуючи використання транспорту та зменшуючи витрати на великі відстані. Третя стратегія – реверсивна дистрибуція між РЦ, використовується для вирівнювання запасів між розподільчими центрами, коли перший РЦ формує палети для філій другого РЦ, ефективно балансує навантаження на склади, уникаючи дефіциту/надлишку запасів та забезпечуючи безперебійні поставки. Четверта стратегія – магістральні перевезення між РЦ, реалізує стратегічне переміщення великих обсягів товарів між розподільчими

центрами, наприклад, при обмеженні зберігання на одному РЦ, забезпечуючи гнучкість відбору товарів для філій, використовуючи ресурси всієї мережі розподільчих центрів.

Digital Twin забезпечує динамічне перенаправлення потоків у відповідь на зміни попиту, коливання ринкових умов або виникаючі логістичні обмеження. Можливість оперативної адаптації стратегій дистрибуції значно підвищує загальну ефективність ланцюга поставок та знижує витрати.

Для забезпечення надійності та точності, модель Digital Twin підлягає ретельній перевірці та постійному вдосконаленню. Валідація моделі починається з її перевірки на історичних даних для встановлення базової достовірності. Статистичні методи, зокрема бек-тестування, використовуються для порівняння змодельованих результатів з фактичними історичними показниками, оцінюючи точність прогнозування. Аналіз чутливості дозволяє визначити найбільш критичні вхідні параметри моделі, розуміння яких важливе для подальшого удосконалення. Ключовим елементом є цикли безперервного навчання, що передбачають інтеграцію нових потоків даних в систему. Це забезпечує постійне підвищення точності прогнозування та адаптацію моделі до мінливих ринкових умов і динаміки ланцюга поставок, гарантуючи актуальність та ефективність Digital Twin з плином часу.

Незважаючи на значний технологічний прогрес у сфері цифрових двійників, практика впровадження,

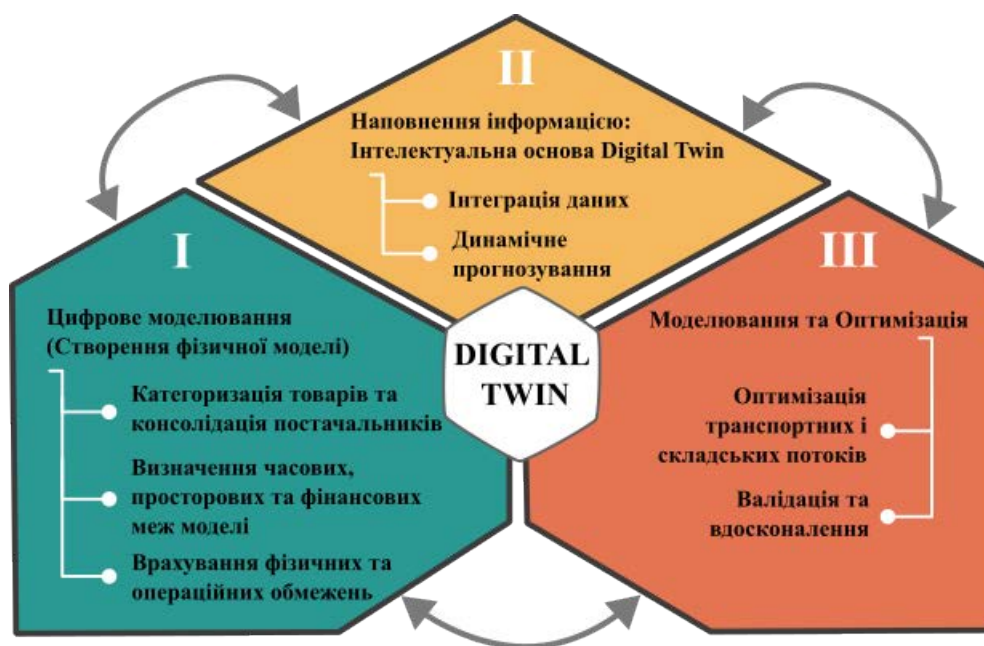


Рис. 1. Схема впровадження Digital Twin у логістиці: моделювання, інтеграція даних та оптимізація потоків

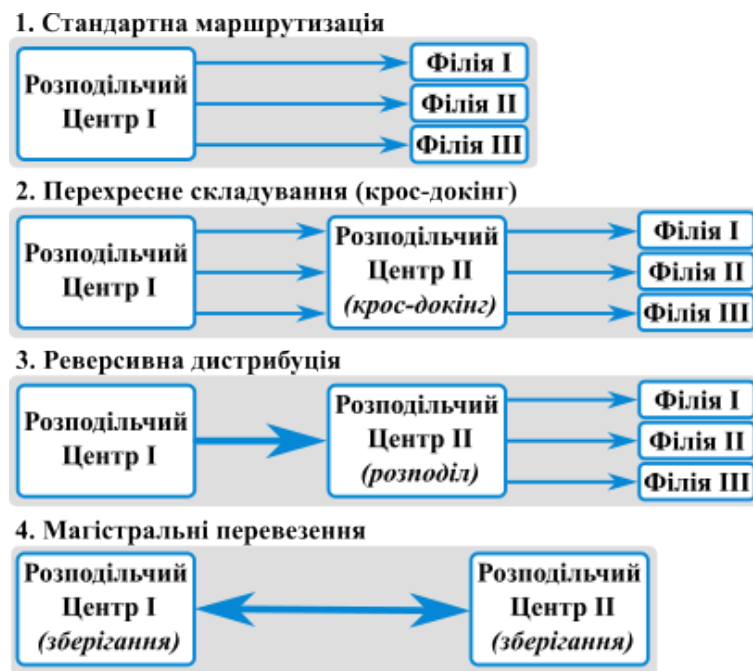


Рис. 2. Візуалізація чотирьох стратегій дистрибуції

як виявляє RELEX Solutions, стикається з рядом типових проблем, серед яких проблема сховищ даних, коли застарілі системи чинять опір інтеграції з сучасними аналітичними платформами, прогалини в навичках через нестачу персоналу, що однаково добре володіє як операціями ланцюга поставок, так і наукою про дані, та опір змінам з боку оперативних команд, що виявляють недовіру до рекомендацій, згенерованих на основі алгоритмів. При цьому, успішні приклади впровадження, такі як цифровий двійник складу Siemens, демонструють ефективні стратегії подолання цих перешкод, зокрема через поетапне розгортання, що дозволяє продемонструвати швидкі перемоги у вузьких областях процесів перед тим, як розширювати застосування технології на більші масштаби.

Впровадження центрального глобального розподільного центру Siemens слугує яскравою демонстрацією потенціалу логістичних цифрових двійників, адже компанія, поєднавши середовище симуляції заводу Tenomatix з реальними даними WMS, досягла значних результатів, включаючи 8% скорочення витрат на фрахт і пошкодження завдяки оптимізованому вибору перевізника, стовідсоткове виконання замовлень, попри 15% збільшення пропускної здатності, та 5% економії енергії завдяки моніторингу обладнання з високим споживанням в реальному часі. Таке успішне впровадження стало можливим завдяки структурованому підходу, що включав оцифрування фізичної інфраструктури через 3D-сканування планувань складу та шляхів

матеріальних потоків, аналіз процесів, що полягав у виявленні вузьких місць у комплектації на основі історичних патернів замовлень, тестування сценаріїв через моделювання пікових сезонних сплесків попиту та дефіциту робочої сили, та інтеграцію прескриптивної аналітики для автоматизованого планування змін на основі прогнозованих обсягів замовлень. Цей показовий проєкт чітко демонструє, як технологія Digital Twin перетворюється з аналітичного інструменту на систему підтримки оперативних рішень, зокрема, в контексті досягнення цілей сталого розвитку через підвищення прозорості енергоспоживання.

В контексті майбутньої еволюції, технологія Digital Twin демонструє тенденцію до інтеграції з роботизованою автоматизацією процесів (РАП), відкриваючи шлях до створення самооптимізуючихся логістичних мереж. Такі системи набувають здатності до автоматичного регулювання рівня страхових запасів на основі мінливості термінів виконання замовлень постачальниками, перенаправлення вантажів в обхід заторів у портах для оптимізації маршрутів та мінімізації затримок, та обговорення спотових тарифів з альтернативними перевізниками в умовах дефіциту потужностей для забезпечення гнучкості та економічної ефективності. За прогнозами McKinsey, розвиток цих можливостей у прогресивних організаціях сприятиме значному скороченню витрат на наскрізні ланцюги поставок на 10-15%.

Висновки. Стратегічне розгортання технології Digital Twin в операціях розподільчих центрів

пропонує трансформаційний потенціал для підвищення ефективності логістики. Впроваджуючи структуровану алгоритмічну основу, що охоплює параметризацію системи, інтеграцію даних з різних джерел та багатоцільову оптимізацію, організації можуть досягти помітного покращення ключових показників ефективності – як правило, на 15-25% скоротити транспортні витрати, на 10-30% покращити оборотність запасів та на 5-15% підвищити точність виконання замовлень.

Майбутній успіх залежатиме від подолання викликів, пов'язаних з інтеграцією даних за допомогою

надійних конвеєрів ETL, а також від налагодження міжфункціональної співпраці між фахівцями з ланцюгів поставок та спеціалістами з обробки даних. Як демонструють лідери галузі, ті, хто сприймає цифрових двійників як живі моделі, що розвиваються, а не статичні симуляції, отримують вирішальні конкурентні переваги на все більш нестабільному глобальному ринку. Розвиток технології в напрямку когнітивної автоматизації та оптимізації, орієнтованої на сталий розвиток, обіцяє переосмислити галузеві стандарти стійкості ланцюгів поставок та екологічного управління.

Список літератури:

1. Hu B., Guo H., Tao X., Zhang Y. Construction of Digital Twin System for Cold Chain Logistics Stereo Warehouse. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2023. Vol. 11, P. 73850–73862. DOI: 10.1109/access.2023.3295819.
2. Oliwatosin Abdul-Azeez, Alexsandra Ogadimma Ihechere, Courage Idemudia. Optimizing supply chain management: strategic business models and solutions using SAP S/4HANA. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*. GSC Online Press. 2024. Vol. 11, Issue 1. P. 339–351. DOI: 10.30574/msarr.2024.11.1.0097.
3. Купалова Г., Гончаренко Н., Дуднік М. Екологічна модернізація логістики підприємств. *Український журнал прикладної економіки та технологій*. Друкарня Мадрид. 2024. Том 9. № 1. С. 84–88. DOI: 10.36887/2415-8453-2024-1-14.
4. Ruohomaa H., Salminen V., Torkkel J. Virtual technologies and digital twins for logistics hub development. *AHFE International*. 2024. Vol. 135. DOI: 10.54941/ahfe1004953.
5. Shen L., Zang Z. Enterprise supply chain network optimization algorithm based on blockchain-distributed technology under the background of digital economy. *Intelligent Decision Technologies*. SAGE Publications. 2024. Vol. 18, № 3. P. 1827–1839. DOI: 10.3233/idt-240680.
6. Khan Md. S., Chinnaiyan, R., Balachandar, S., Ibrahim, S. J. A., Chakravarthy, N. S. K., Kalaiarasan, C., Divya, R. Centralized Digital Twin driven Supply Chain for Sustainable Smart Manufacturing Plants. *International Conference on Computational Modelling, Simulation and Optimization (ICCMO)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2022. P. 370–373. DOI: 10.1109/iccmso58359.2022.00077.
7. An Y., Han Y., Xu Y., Ouyang S., Zhang M., Chen S. *An Auxiliary Model of Intelligent Logistics Distribution Management for Manufacturing Industry Based on Refined Supply Chain*. *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2023. Vol. 11. P. 47098–47111. DOI: 10.1109/access.2023.3275010.
8. Kmiecik M. Digital Twin as a Tool for Supporting Logistics Coordination in Distribution Networks. *International Journal of Supply Chain Management*. ExcelingTech. 2023. Vol. 12, № 1. DOI: 10.59160/ijscm.v12.i01.6149
9. Stan M., Borangiu T., Raileanu S. Data- and model-driven digital twins for design and logistics control of product distribution. *23rd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*. IEEE. 2021. P. 33–40. DOI: 10.1109/cscs52396.2021.00013.

Prokudin O.G., Vorkut T.A., Petunin A.V. OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION CENTER LOGISTICS USING DIGITAL TWIN: MODERN INFORMATION AND COMMUNICATION APPROACHES

The article explores the potential of optimizing logistics processes in distribution centers through the implementation of Digital Twin technology. Modern distribution centers face a number of challenges related to the optimization of material flows, demand forecasting, reduction of transportation and warehousing costs, as well as ensuring supply chain flexibility under volatile market conditions. Traditional management approaches are increasingly insufficient due to the complexity of coordination between suppliers, distribution centers, and retail outlets. The paper "Optimization of Distribution Center Logistics Using Digital Twin: Modern Information and Communication Approaches" substantiates the relevance of using Digital Twin as an innovative tool for high-precision modeling, analysis, and optimization of logistics processes.

The aim of the study is to investigate the potential of Digital Twin technology to improve the efficiency of distribution center operations. The object of the research includes both internal and external logistics processes related to product distribution. The methodological basis consists of an analysis of scientific publications and

practical cases of leading companies (Siemens, McKinsey, BEUMER Group, RELEX Solutions). The paper proposes a three-stage algorithm for implementing digital twins: creating a digital model of the distribution center, taking into account product categorization, spatio-temporal parameters, transportation and warehousing costs; integrating data from diverse sources and applying predictive analytics based on machine learning methods to anticipate demand fluctuations; optimizing flows using mathematical programming and scenario-based modeling.

The findings indicate that the implementation of Digital Twin can reduce transportation costs by 15–25%, improve inventory turnover by 10–30%, and increase order fulfillment accuracy by 5–15%. Successful examples, such as the Siemens case, confirm the possibility of achieving significant cost savings and productivity gains without compromising service levels. At the same time, several barriers have been identified, including data quality issues, shortages of skilled personnel, and organizational resistance to change. These challenges can be mitigated through phased implementation and demonstration of “quick wins.”

The practical significance of the study lies in providing a foundation for the application of Digital Twin in the operations of retail, manufacturing, and logistics companies, as well as offering a toolkit for managers and IT specialists. The results may be applied both in professional practice and in educational programs for training specialists in logistics and supply chain management.

Key words: *Digital Twin, distribution center, logistics, supply chain, optimization, forecasting, costs, efficiency, automation.*

Дата надходження статті: 26.09.2025

Дата прийняття статті: 17.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025