



DOI 10.28925/2663-4023.2025.29.869

УДК 004.056.5

Балвак Андрій Анатолійович

аспірант кафедри комп'ютерної інженерії

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6441-8225

a.balvak@stud.duikt.edu.ua**Лашевська Наталья Олександрівна**

завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0003-2148-115X

n.lashchevska@duikt.edu.ua

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАДАЧАХ РОЗМІЩЕННЯ, КОМПЛЕКТУВАННЯ ТА РОБОТИЗАЦІЇ

Анотація. У статті представлено систематизований огляд сучасних наукових підходів до вирішення задач призначення місць зберігання (Storage Location Assignment Problem, SLAP), управління процесом комплектування замовлень (Order Picking Problem, OPP) та впровадження роботизованих мобільних систем (Robotic Mobile Fulfillment Systems, RMFS) у складській логістиці із застосуванням методів машинного навчання. У межах дослідження було сформовано вибірку робіт з бази даних Scopus відповідно до методології PRISMA 2020, що забезпечило прозорість та відтворюваність аналізу. У результаті було відібрано 20 наукових публікацій, що містять експериментальні та прикладні результати у сфері автоматизації логістичних центрів. Аналіз літератури структуровано за типами задач, методами та технологіями реалізації. Розглянуто класичні евристичні алгоритми, інтелектуальні системи, гібридні стратегії та підходи на основі машинного навчання, зокрема глибокого навчання з підкріпленням, кластеризації часових рядів і асоціативного аналізу. Акцент зроблено на практичних аспектах застосування, що охоплюють підвищення ефективності розміщення, зниження транспортних витрат, скорочення часу комплектування та зменшення фізичного навантаження на персонал. Особливу увагу приділено роботизованим системам, які дозволяють оптимізувати маршрути переміщення та скоротити загальний час виконання операцій. До найбільш перспективних напрямів належать алгоритми, що поєднують аналіз історичних даних, кореляційні зв'язки між товарами та попередню класифікацію попиту. Встановлено, що комбіновані моделі, які інтегрують часові характеристики та асоціативні зв'язки, є ефективними у контексті адаптивного управління розміщенням товарів і формування партій замовлень. Отримані результати систематизовано за ознаками, що включають тип задачі, застосований метод, наявність машинного навчання та середовище реалізації. Також окреслено напрями подальших досліджень, серед яких адаптивна кластеризація з урахуванням сезонності, прогнозне оновлення розміщення, інтеграція моделей довгої короткочасної пам'яті (Long Short-Term Memory, LSTM) та врахування енергетичних аспектів. У підсумку проведене дослідження дозволяє сформулювати цілісне уявлення про сучасний стан наукових підходів у сфері оптимізації складських процесів і є підґрунтям для розробки комплексних інтелектуальних систем управління, орієнтованих на гнучкість, ефективність і сталий розвиток логістичних центрів.

Ключові слова: оптимізація розміщення товарів; призначення місць зберігання; комплектування замовлень; машинне навчання; кластеризація часових рядів; роботизовані системи; логістичні центри.



ВСТУП

Постановка проблеми. У сучасних логістичних центрах завдання ефективного розміщення товарів на складах та організації процесів комплектації замовлень набуває особливої актуальності через зростання обсягів обробки, змінність попиту й обмеженість простору. Традиційні підходи, зокрема ABC-аналіз, хоча й широко застосовуються на практиці, часто виявляються недостатньо ефективними для врахування складних патернів формування замовлень і слабо адаптуються до змінного середовища. Відсутність уніфікованих класифікацій для задач розміщення (SLAP), комплектування (OPP) та роботизованих систем (RMFS) ускладнює вибір адекватних рішень. Крім того, наукові підходи часто ізольовано розглядають окремі аспекти складської діяльності, не формуючи цілісного уявлення про взаємозв'язки між методами кластеризації, прогнозування й оптимізації. Зростає потреба в застосуванні методів машинного навчання для аналізу історичних даних і врахування кореляцій між товарами при автоматизованому прийнятті рішень. Недостатня увага приділяється ергономічним і енергетичним аспектам, які в більшості підходів залишаються другорядними. Існує практична потреба у створенні узагальненої систематизації методів та моделей, які дозволяють інтегрувати сучасні комп'ютерні технології в процес оптимізації розміщення товарів у логістичних центрах. Саме ця проблема є ключовою в межах даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення релевантності та наукової достовірності матеріалів, що аналізуються в цій роботі, був застосований систематизований підхід до добору джерел із бази даних Scopus [1]. Вибір саме цієї платформи обумовлений її широким покриттям, яке включає понад 25 тисяч видань від понад 5 тисяч міжнародних видавництв, що забезпечує доступ до найактуальніших і рецензованих наукових досліджень. Scopus індексує публікації лише з перевірених джерел, серед яких провідні видавництва, такі як Elsevier, Springer, IEEE, Wiley, Taylor & Francis, що гарантує високу якість контенту. На відміну від масових або нереконструованих джерел, документи в Scopus проходять строгі процедури редакційного контролю, мають стабільні цифрові ідентифікатори (DOI), містять стандартизовані метадані (ключові слова, анотації, тематики), що забезпечує зручність в подальшій аналітичній обробці. Крім того, Scopus дозволяє використовувати розширені фільтри за предметними галузями, типами публікацій та роками, що дає змогу сформувати цільову вибірку з урахуванням конкретного дослідницького завдання. Таким чином, аналіз джерел із бази Scopus дозволяє отримати репрезентативну, перевірену та міждисциплінарно релевантну сукупність публікацій для виконання системного огляду у сфері оптимізації складських процесів із застосуванням методів машинного навчання.

У цьому дослідженні така вибірка була сформована відповідно до чітко визначеної мети пошуку. Основною метою було виявлення публікацій, які досліджують застосування методів машинного навчання та інтелектуальних технологій у задачах, пов'язаних з оптимізацією розміщення товарів (SLAP) та управлінням комплектацією замовлень (OPP) у логістичних центрах. У результаті на ресурсі <https://www.scopus.com> було сформовано наступний пошуковий запит, у якому за допомогою логічних операторів структуровано ключові поняття, пов'язані з інтелектуальними технологіями та управлінням складськими операціями, з метою точного охоплення релевантних наукових робіт.

TITLE-ABS-KEY("machine learning" OR "reinforcement learning" OR "deep learning" OR "artificial intelligence" OR "storage location assignment" OR "order picking management" OR "smart logistics" OR "picking efficiency" OR "robotic warehouse" OR "travel distance"



OR "warehouse zoning") AND TITLE-ABS-KEY("storage location" OR "storage assignment" OR "picking efficiency" OR "order picking" OR "warehouse management") AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "cp")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA, "ENG") OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "COMP") OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "MATH") OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "DECI") OR LIMIT-TO(SUBJAREA, "BUSI"))

Таблиця 1

Характеристика пошукового запиту в базі Scopus

Критерій	Значення	Обґрунтування вибору значень
Ключові терміни (група 1)	machine learning, reinforcement learning, deep learning, artificial intelligence, storage location assignment, order picking management, smart logistics, picking efficiency, robotic warehouse, travel distance, warehouse zoning	Охоплено сучасні технології аналізу та оптимізації machine learning, AI, deep learning, а також терміни, що характеризують логістичні підходи нового покоління smart logistics, robotic warehouse, travel distance
Ключові терміни (група 2)	storage location, storage assignment, picking efficiency, order picking, warehouse management	Безпосереднє зосередження на функціональних завданнях складу таких як storage location, picking efficiency тощо
Рік публікації	2011–2025	Обраний період відповідає етапу стрімкої інтеграції ML у логістику в контексті Industry 4.0, Smart Logistics та цифрової трансформації складів орієнтованих на e-commerce
Мова публікацій	Англійська	Саме англійські джерела становлять переважну більшість у наукометричних базах Scopus та охоплюють найактуальніші, високоякісні дослідження у галузях інженерії, логістики й машинного навчання
Типи документів	ar (journal article), cp (conference paper)	Ці типи публікацій проходять наукове рецензування, містять результати оригінальних досліджень й відображають як теоретичні напрацювання, так і практичні інновації
Предметні області	Engineering, Computer Science, Mathematics, Decision Sciences, Business, Management and Accounting	Дослідження належить до сфери міждисциплінарних наукових робіт, що поєднують інженерію, інформатику, математику та менеджмент

Формування фінальної вибірки із застосуванням рекомендацій PRISMA

Пошуковий запит з бази Scopus повернув 688 документів. Надалі відбір джерел здійснювався згідно з етапами, визначеними у PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), які передбачають ідентифікацію, скринінг, оцінювання повних текстів та формування остаточного списку робіт. За результатами цього процесу до повнотекстового аналізу було залишено 23 публікації, з яких 20 [3] – [22] відповідають встановленим критеріям включення до огляду.

Застосування рекомендацій PRISMA 2020 [2] забезпечило прозорість і відтворюваність систематичного огляду, присвяченого використанню методів машинного навчання у вирішенні задач SLAP та OPP у логістичних центрах. Усі етапи добору джерел задокументовано на PRISMA-діаграмі (рис. 1), що дозволяє верифікувати процес формування вибірки та підвищує достовірність аналізу.



Рис. 1. Діаграма систематичного огляду, оформлена за шаблоном PRISMA 2020

Прим.:

* Критерії виключення:

1. Зосереджуються на аналізі наявних публікацій без представлення нових експериментальних результатів.
2. Присвячені рекомендаціям або стандартам.
3. Зосереджені на загальних аспектах IoT, а не на складах.
4. Містять лише опис теоретичних моделей або класифікацій без проведення симуляцій чи прикладних досліджень.

Мета статті. Метою даного дослідження є проведення глибокого системного аналізу 20 наукових публікацій, що були відібрані з бази даних Scopus відповідно до методології PRISMA. Усі ці роботи спрямовані на вивчення можливостей застосування методів машинного навчання та інтелектуальних технологій для вирішення задач



оптимізації складських процесів. Особлива увага зосереджується на напрямках, що охоплюють призначення місць зберігання, управління процесом комплектування замовлень, а також впровадження роботизованих мобільних систем, які є ключовими компонентами сучасної автоматизованої складської логістики.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі взаємопов'язані завдання:

- виявлення переваг ML-орієнтованих підходів у порівнянні з класичними методами;
- аналіз відмінностей між підходами за типами задач, середовищами їх застосування та рівнем досягнутої ефективності у контексті Industry 4.0 і Smart Logistics;
- класифікація рішень за типом алгоритму, джерелом даних, середовищем реалізації та складністю інтеграції;
- формування практичних рекомендацій і визначення перспективних напрямів подальших досліджень у сфері інтелектуального управління логістичними центрами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Здійснено детальний аналіз 20 наукових публікацій, що відповідають критеріям систематичного огляду. Результати узагальнено відповідно до типів складських задач, застосованих алгоритмів, рівня автоматизації та використання методів машинного навчання.

Роботизовані мобільні системи та AGV (Automated Guided Vehicle)

Робота [3] присвячена розробці інтегрованої моделі для планування й оптимізації роботизованих мобільних систем комплектування замовлень. Автори моделюють сукупність рішень щодо групування замовлень, розподілу їх між роботами та робочими станціями, а також маршрутизації роботів. Запропоновано два методи прийняття рішень: швидкий інтуїтивний тривірневий алгоритм і більш точну змішано-цілочисельну модель оптимізації. Чисельні експерименти, проведені на реальному наборі даних, що включав 400 замовлень, 300 товарних одиниць, 160 роботів і 14 станцій, показали, що навіть великі задачі можуть бути розв'язані до квазіоптимальності за декілька хвилин. Важливим результатом дослідження є факт, що інтегроване планування, навіть за допомогою гібридних евристичних алгоритмів, дозволяє досягти значно кращих результатів порівняно з послідовною оптимізацією окремих рішень. Крім того, доведено, що різноманітність товарів у контейнерах та їх розосереджене зберігання позитивно впливають на загальний час виконання партій замовлень.

У статті [4] розглянуто суміжну задачу оптимізації маршрутів AGV в умовах реального часу у системах з кількома станціями комплектації. Автори пропонують гібридну модель, яка адаптивно поєднує синхронну та асинхронну стратегії залежно від рівня завантаженості, простоїв станцій та просторового розташування товарів. Запропоновано удосконалений алгоритм навчання з підкріпленням на основі трансформерної архітектури, що враховує як доступність робочих зон, так і внутрішню структуру логістичних запитів. Ключовою особливістю є механізм керування заповнювачами, який дозволяє вирівнювати довжини входних послідовностей за допомогою спеціальних маркерів. Це забезпечує ефективну обробку партій з неоднорідною кількістю позицій в єдиному навчальному циклі та підвищує рівень паралелізації обчислень. Симуляційні експерименти продемонстрували здатність алгоритму до масштабування в умовах підвищеного навантаження, особливо у



періоди промоакцій, характерних для B2C-сектору. Використання AGV зі змінною конфігурацією маршрутів дозволяє істотно скоротити повний цикл виконання логістичного завдання — від надходження запиту до доставки комплекту на станцію обробки й повернення в буферну зону. Це, своєю чергою, підвищує пропускну здатність системи та мінімізує затримки без необхідності розширення фізичної інфраструктури.

Ще одним напрямком оптимізації виступає покращення порядку виконання завдань у високонавантажених роботизованих системах типу Pick-Place-Carry-Pick-Place (PPCPP). У дослідженні [5] для оптимізації, що базується на моделюванні, автори застосовують байєсівську рекурентну нейронну мережу як наближену модель для оцінки таких показників, як загальний час виконання робіт і ймовірність виникнення блокувань. Запропонований алгоритм Bayesian Recurrent Neural Network-Assisted Simulated Annealing (BRNN-SA) поєднує переваги попереднього навчання на історичних розподілах з евристичним методом імітації відпалу, який здійснює пошук оптимального рішення шляхом поступового зниження ймовірності прийняття гірших варіантів. Отримані результати демонструють 8,9-кратне прискорення порівняно з класичною оптимізацією на основі імітаційного моделювання, що дозволяє оперативно оновлювати графіки комплектування в реальному часі. Такий підхід є особливо актуальним для складів з великою кількістю автоматизованих керованих транспортних засобів (AGV), де пріоритетом є висока продуктивність за умови гарантованого уникнення збоїв у роботі системи.

На відміну від підходів, орієнтованих виключно на автоматизацію, у статті [6] розглядається впровадження роботизованих систем типу Pick and Transport Robot (PTR) у системах picker-to-parts, де оператори переміщуються до місць зберігання для комплектування замовлень. Дослідження орієнтоване на впровадження таких рішень із фокусом на принципи Індустрії 5.0, які передбачають збереження ролі людини та підвищення її добробуту в автоматизованому середовищі. Запропонована математична модель враховує одночасно продуктивність, якість та людський фактор (human factors, HF), що охоплює фізичні, когнітивні та психосоціальні аспекти, включаючи вплив фізичного навантаження, рівень помилок і загальні умови праці операторів. Особливу увагу приділено зональному плануванню, зокрема динамічному розподілу зон між людьми й роботами, а також визначенню оптимальної кількості операторів і PTR. Модель протестовано на реальному кейсі з використанням робота Grab™. Результати доводять, що інтегроване планування з урахуванням HF дозволяє досягти як підвищення продуктивності, так і зменшення фізичного навантаження на персонал. Важливим аспектом дослідження є те, що запропоноване рішення не потребує зміни існуючої конфігурації складу, завдяки чому значно спрощується впровадження.

У контексті стратегій організації зберігання товарів у роботизованих середовищах варто відзначити дослідження [7], у якому запропоновано інноваційний підхід до оптимізації розміщення товарів у роботизованих складах із застосуванням аналізу кореляції заявок. Автори порівнюють традиційні стратегії, такі як розміщення за принципом обертання товарів, підкреслюючи їхню обмеженість при роботі зі значними обсягами замовлень. Тому, використовуючи історичні дані щодо спільних покупок, розроблено модель корельовано-розсіяного розміщення (Correlated Dispersed Assignment, CDA), яка базується на змішано-цілочисельному програмуванні для оптимального розподілу товарів між кластерами та зонами складу з метою мінімізації очікуваного часу пересування роботів. Дослідження демонструє перевагу CDA над традиційними стратегіями завдяки впровадженню обмежень, що порушують симетрію та розробці гібридного алгоритму вдосконалення рішень. Водночас детальний аналіз математичної



моделі охоплює формулювання основних змінних і обмежень, а також розгляд алгоритмічних етапів оптимізації, що є суттєвим для зменшення обчислювальної складності. Проведений експериментальний порівняльний аналіз показав, що інтеграція як даних щодо обертання товарів, так і їхньої попарної кореляції значно скорочує середній час обробки замовлення, особливо у системах зі значними середніми розмірами заявок.

Логічним продовженням теми є дослідження [8] у якому представлено підхід до призначення місць зберігання у роботизованих мобільних системах комплектування замовлень (RMFS). Запропоноване рішення базується на використанні методів інтелектуального аналізу даних, кластеризації та автоматизації процесів (Robotic Process Automation, RPA). Автори запропонували впровадження хмароорієнтованої кіберфізичної системи (Cyber-Physical Systems, CPS), яка об'єднує IoT-сенсори, хмарні обчислення, штучний інтелект та роботизовану платформу керування. Така інтеграція покликана зменшити загальні витрати на переміщення мобільних стелажів у RMFS. Дослідники розглянули дев'ять сценаріїв зонального групування з використанням різних алгоритмів кластеризації, серед яких K-means, Gaussian Mixture Model та Bayesian Gaussian Mixture Model. Отримані результати надалі застосовуються для класифікації замовлень у задачах призначення місць зберігання. Проведене тестування шести алгоритмів класифікації засвідчило точність понад 95% у процесі виявлення патернів кореляції між замовленнями. Отримані результати дали змогу програмним агентам RPA реалізувати повну автоматизацію процесів — від формування замовлення та його обробки у системі управління складом (Warehouse Management System, WMS) до керування маршрутами доставки та взаємодії з клієнтами.

Класичні методи без використання машинного навчання

Одним із прикладів сучасного підходу до вирішення задачі SLAP є дослідження [9], у якому розроблено адаптивний алгоритм, який інтегрує критерії ефективності комплектації замовлень, безпеки працівників, міцності стелажних систем та спорідненості товарів. Запропонований алгоритм, який базується на методах базисно-стрибкового пошуку (basin-hopping) та алгоритму імітаційного відпалу (simulated annealing algorithm), дозволяє розв'язувати задачі як з лінійними, так і нелінійними цільовими функціями. Дослідження також включає реальний приклад використання алгоритму на складі австралійської меблевої компанії, що підтверджує його ефективність у практичних умовах. Крім того, порівняння запропонованого алгоритму з комерційними рішеннями, такими як SCIP (розв'язання задач цілочисельного програмування з обмеженнями), показує, що цей інструмент може працювати лише з лінійними цільовими функціями, тоді як запропонований алгоритм здатний вирішувати задачі з нелінійними функціями. Вперше у рамках задачі SLAP до цільових функцій додано аспект безпеки працівників, що дозволило зменшити ризик травматизму, зокрема пов'язаного із падінням важких об'єктів з високих полиць.

Подальший внесок у розуміння впливу конфігурацій складських систем представлено в дослідженні [10], яке присвячене аналізу впливу апаратних і програмних параметрів на ефективність операцій комплектації замовлень шляхом порівняння політик індивідуального збирання замовлень та пакетного збирання. Застосовано симуляційний підхід із повним факторним дизайном, що дозволяє отримати базу даних із 1260 конфігурацій, враховуючи середні відстані пройдені комплектувальниками. Отже, інтеграція методології планування експериментів (DoE) та аналізу дисперсії (ANOVA) дозволяє чітко визначити вплив таких ключових факторів, як форма складу й політик маршрутизації та призначення місць зберігання. При цьому аналіз даних демонструє, що зі збільшенням списків з переліком позицій для збору програмні



компоненти, зокрема політика маршрутизації, набувають більшої значущості, тоді як апаратні параметри (наприклад, розташування I/O) є критичними для систем з короткими замовленнями. Математична модель, що включає розрахунок порогового часу сортування, дає змогу ідентифікувати оптимальні умови для застосування пакетного підбору. Отже, отримані результати дозволяють сформулювати практично значущі рекомендації для оптимізації управлінських рішень без необхідності кардинальної перебудови складу. Нарешті, з огляду на перспективи майбутніх досліджень, доцільно інтегрувати аналіз традиційних конфігурацій зі вивченням нетрадиційних систем та даних реальних виробничих кейсів для підвищення практичної значущості висновків.

Ергономічним аспектам у класичних підходах приділено окрему увагу, зокрема у статті [11] запропоновано двофазову методологію для врахування одночасно економічної та ергономічної (мінімізація дискомфорту працівників) цілей у процесі призначення місць зберігання. Побудовано регресійні моделі на основі даних з WMS і оцінок персоналу, що пов'язують просторові та товарні характеристики з повним часом виконання операції збору (від отримання завдання до його підтвердження) та рівнем дискомфорту. Ці моделі інтегруються в оптимізаційну задачу призначення товарів до місць зберігання з двома цілями — мінімізаціями загального часу збору та середнього рівня дискомфорту працівників. Застосування методології на складах Yamaha та Sorbo дозволило визначити набір оптимальних рішень, що демонструють найкращі можливі співвідношення між часом збору та рівнем дискомфорту. Автори також запропонували практичне правило призначення місць зберігання, яке враховує популярність товарів та розміщення їх у так званій «золотій зоні» — області полиць на висоті між талією та плечима працівника, що є найбільш зручною для доступу. Це рішення дозволило суттєво знизити рівень дискомфорту працівників при збереженні прийняттого часу виконання замовлень.

Окрему увагу маршрутизації комплектувальників приділено в роботі [12], де формалізовано задачу збору замовлень у складі з паралельними проходами, враховуючи штрафи за повороти. Особливу увагу приділено U-поворотам при яких комплектувальник змушений розвернутись у тому ж проході, фактично повертаючись назад у напрямку з якого прийшов. Такі маневри істотно впливають на загальну тривалість маршруту і складність його реалізації. Автори розглядають як однокритеріальні постановки задачі (мінімізація кількості поворотів або часу маршруту), так і багатокритеріальні формулювання. Зокрема, запропоновано трицільову оптимізаційну модель, у якій одночасно мінімізуються загальний час переміщення, кількість поворотів та кількість U-поворотів. Побудовано ефективні алгоритми, які трансформують графи маршрутів для зменшення кількості поворотів без втрати досяжності; зокрема, доведено властивість повного проходження кожного зайнятого проходу. Також формалізовано аналітичні залежності між кількістю проходів, типами з'єднань і мінімально можливою кількістю поворотів. Ці результати є важливими для розробки стратегій маршрутизації в автоматизованих і ручних системах комплектування, де час маневрування та просторові обмеження є критичними.

До іншого напрямку класичних підходів належить дослідження [13], у якому описано систему призначення місць зберігання RFID-based Storage Assignment System (RFID-SAS). Її мета — підвищення ефективності відбору замовлень, особливо в умовах малих і середніх підприємств. Система базується на використанні RFID-технологій на рівні окремих товарів, що дозволяє автоматично фіксувати їх розташування та взаємодіяти з модулем прийняття рішень, реалізованим за допомогою нечіткої логіки. Це сприяє значному скороченню часу на відбір замовлень (до 75%) і зменшенню



кількості втрат або помилок у процесі зберігання, водночас підвищуючи точність і контроль складських процесів.

Інтеграцію IoT у класичні складські рішення розглянуто у статті [14], присвяченій дослідженню поєднання апаратних засобів (RFID-мітки, сенсори, мобільні пристрої) з програмним забезпеченням з метою вдосконалення контролю за товарними потоками. Автори пропонують інтегровану архітектуру для автоматизованого збору даних у режимі реального часу, що забезпечує оперативне оновлення інформації та точне управління запасами. Описано механізм синхронізації замовлень за допомогою системи прийняття рішень на основі формально заданих правил, адаптований до умов високої варіативності попиту. Застосування нечіткої логіки, яка включає фазифікацію, (перетворення вхідних даних у нечіткі множини), інференцію (логічний висновок на основі заданих правил) та дефазифікацію (отримання чітких значень), дозволяє оптимізувати процес комплектації, сприяючи зниженню операційних витрат й скороченню часу виконання. Отже, порівняльний аналіз до і після впровадження зазначеної системи демонструє суттєве зменшення часу приймання товарів (з 2.54 до 0.96 хвилин) та підвищення точності інвентаризації (від 92% до 100%). Зважаючи на те, що система відповідає концепції Industry 4.0, відкриваються перспективи подальшої інтеграції зі штучним інтелектом та робототехнікою, хоча є певні обмеження у сфері оптимізації просторового розподілу, що вимагають додаткових досліджень.

Підходи на основі машинного навчання

Зважаючи на сучасні труднощі в оптимізації розміщення товарів за умов слабого взаємозв'язку між елементами замовлень, у дослідженні [15] представлено новий алгоритм BTC, який інтегрує методи текстової кластеризації та асоціативного аналізу. Його реалізація передбачає декілька послідовних етапів, починаючи з обробки найменувань товарів як текстових рядків, які за допомогою Python-модуля jieba розбиваються на окремі слова для подальшого об'єднання у групи, чисельність яких визначається параметром «а» (від 30 до 100 одиниць), що забезпечує однорідність кластерів навіть при слабкій взаємозалежності на рівні окремих SKUs. Далі, спираючись на обчислення показників підтримки (support) та довіри (confidence), здійснюється аналіз асоціацій між отриманими кластерами, що дозволяє визначити групи товарів, які частіше зустрічаються разом у замовленнях, і, відповідно, розмістити їх на складі у вигляді матричної структури так, щоб товари з високою статистичною взаємозалежністю знаходилися поруч, що мінімізує сумарну довжину маршрутів під час комплектування замовлень. Проведені експерименти на даних про 11867 товарів та 26900 замовлень на складі розміром 109×109 , демонструють, що запропонований BTC алгоритм дозволяє зменшити загальну довжину маршрутів у середньому на 19,34% із досягненням зниження до 40,54% у деяких групах. Це свідчить про його суттєву перевагу порівняно з класичними стратегіями, такими як політика найближчого вільного місця та система класифікації ABC. Таким чином, інтегрований підхід, що поєднує кластеризацію тексту й асоціативний аналіз, сприяє оптимізації розміщення товарів на складах за умов слабких зв'язків між елементами замовлень, відкриваючи перспективи для подальших досліджень у сфері управління складськими процесами.

Ще одним підходом, орієнтованим на вирішення задачі динамічного розподілу місць зберігання (DSLAP), є використання методів глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning, DRL) [16]. Авторами розглянуто реальний кейс на складі, на основі даних про операції за 14 місяців. Рішення, прийняті агентом DRL, навченим за алгоритмом оптимізації проксимальної політики (PPO), призвели до зменшення транспортних витрат на



6,3% у порівнянні з традиційною стратегією ABC-класифікації. Методику протестовано на даних за два останні місяці цього періоду, що охоплює як сезонні особливості, так і складності реалізації. У порівнянні з методами RANDOM та Just-in-Order перевага підходу DRL полягає в адаптивному врахуванні як поточної заповненості складу, так і історичних даних про операції. Важливо також зазначити, що обмеженнями підходу є можливі розбіжності між симуляцією та реальним середовищем, а також необхідність перенавчання алгоритму при появі нових типів товарів. У перспективі відзначаються можливості для вдосконалення методики, зокрема, через оптимізацію гіперпараметрів, розширення набору навчальних даних та адаптацію до інших складів.

Альтернативний підхід до оптимізації розміщення товарів запропоновано у дослідженні [17], де розглянуто гібридний підхід на основі кластеризації часових рядів. Зокрема, автори використовують методи самоорганізуючих карт (SOM), алгоритм динамічної трансформації часової шкали на основі К-середніх (DTW) та агломеративної ієрархічної кластеризації (АНС) для групування товарів за схожістю профілів попиту. Завдяки попередній нормалізації даних із застосуванням принципу Парето та використанню реального набору даних з Kaggle, дослідники змогли змоделювати умови сучасних складів електронної комерції. Крім того, проведено симуляційний аналіз із розгляданням шести сценаріїв комплектування, що дозволило детально оцінити ефективність запропонованого підходу. Одним з ключових результатів є встановлення переваги стратегії АНС, яка демонструє приріст ефективності операцій комплектування до 61% за маршрутом типу «s-shape» та до 69% за маршрутом «mid-point» порівняно з випадковим або ABC-розміщенням. Результати дослідження були перевірені статистично за допомогою аналізу одновимірної дисперсії (ANOVA) та тесту Тьюкі, що підтверджує наукову валідність висновків.

Запропонований підхід поєднує динамічний аналіз попиту з практичною реалізацією гібридної системи розміщення товарів, що є значним внеском у сферу оптимізації операцій e-commerce складів.

З-поміж інших підходів до групування товарів варто відзначити також метод асоціативного аналізу, застосований у статті [18]. Автори виходять із припущення, що певні товари часто замовляються разом, отже, їх доцільно зберігати поруч для скорочення маршрутів комплектування. Алгоритм визначає ступінь взаємозв'язку між товарами на основі транзакційних даних і розраховує оптимальне просторове розміщення для взаємопов'язаних одиниць. Рішення щодо призначення місць зберігання ґрунтується на комплексній метриці, яка враховує відстань від місця зберігання до точки входу/виходу складу, рівень взаємозв'язку з товарами, розміщеними поблизу (на основі асоціативних правил), а також важливість товару згідно з ABC-класифікацією. Метою є мінімізація сумарної відстані при операціях комплектування та розміщення. Експериментальні моделювання на синтетичних даних, що імітують склад комп'ютерних запчастин у Гонконгу, продемонстрували ефективність алгоритму порівняно з політиками розміщення у найближчу вільну комірку та виділеного зберігання. Результати були найбільш помітними у сценаріях з високим рівнем кореляції товарів і обмеженим складським простором.

У статті [19] запропоновано гібридну інтелектуальну систему обробки B2B-замовлень (Intelligent B2B Order Handling System, IOHS), призначену для використання в дистрибуційних центрах. Основним викликом виступає необхідність швидкого й ефективного групування великої кількості дрібних замовлень, що надходять нерівномірно протягом дня. IOHS поєднує базу даних, нечітку логіку та генетичний алгоритм і включає три основні модулі, які відповідають за аналітику замовлень, інтелектуальне групування та



сортування результатів. Нечітка логіка забезпечує адаптивне визначення розміру партій, а генетичний алгоритм — оптимізацію маршрутів комплектування.

Кейс-дослідження, проведене в логістичному центрі Гонконгу, показало, що інтеграція цих технологій дозволяє суттєво підвищити продуктивність обробки замовлень, уникнути надмірного навантаження на працівників і покращити сервісне обслуговування. Особливо важливо, що запропонована архітектура є масштабованою, гнучкою до налаштувань та легко адаптується до умов конкретного складу. Автори підкреслюють, що система може ефективно функціонувати за різних конфігурацій складу та типів замовлень. Зокрема, її можна адаптувати до стратегій комплектування зі збором товарів у коробки або доставки товарів до комплектувальника, а також до інших сучасних підходів до організації процесу добору. Така універсальність забезпечує стратегічну перевагу рішення, що дозволяє впроваджувати в різних складських середовищах із мінімальними модифікаціями.

Крім безпосереднього розміщення товарів, машинне навчання демонструє ефективність і в задачах прогнозування навантаження на комплектувальників у зональних системах збирання замовлень, як показано в роботі [20]. Автори вперше застосовують моделі часових рядів, зокрема ARIMA та методи експоненційного згладжування, для прогнозування кількості замовлень на наступний день. ARIMA моделює залежності в даних шляхом поєднання автокореляції, диференціювання та усереднення випадкових похибок, тоді як експоненційне згладжування надає більшої ваги останнім значенням, щоб краще відображати тренди та сезонність. Прогнозування здійснюється як на агрегованому, так і на дезагрегованому (зональному) рівні. На прикладі реального складу автомобільних запчастин показано, що навіть прості моделі дають кращі результати, ніж експертні прогнози відповідальних працівників складу. Автори також порівнюють висхідний (bottom-up) та низхідний (top-down) підходи до прогнозування, виявляючи переваги комбінованих стратегій у контексті зонального планування. У висхідному підході прогнозування здійснюється на рівні окремих зон складу з подальшим агрегуванням до загального рівня, тоді як у низхідному — спочатку прогнозується загальна кількість замовлень, після чого вона розподіляється між зонами на основі історичних пропорцій. Такий підхід дає змогу не лише підвищити точність прогнозів, а й ефективніше планувати роботу персоналу. Результати дослідження демонструють, що впровадження точного прогнозування істотно покращує розподіл робочої сили та знижує витрати на залучення тимчасових працівників.

У статті [21] автори вирішують задачу визначення найефективнішого розподілу площ між зонами А, В та С на неавтоматизованих складах типу picker-to-parts, де основні операції виконуються працівниками. Методологія базується на симуляції понад 16 000 варіантів конфігурацій складу, кожен з яких оцінюється за середнім часом комплектування замовлень. На основі отриманих даних побудовано чотири моделі машинного навчання: лінійна регресія, дерево рішень, випадковий ліс і багатошарова перцептронна мережа. Всі моделі продемонстрували високу точність прогнозування оптимальних розмірів зон. Отримані результати суттєво перевершили ефективність традиційних емпіричних підходів — зокрема, типового розподілу зон у пропорції 20:30:50 для класів А, В і С відповідно. Особливо значущі переваги спостерігалися в умовах нерівномірного розподілу попиту. Це підкреслює доцільність використання моделей машинного навчання навіть у традиційних, неавтоматизованих складських середовищах.

Значну увагу у дослідженнях також приділяють внутрішній локалізації товарів у складських приміщеннях, зокрема на основі BLE-маяків (Bluetooth Low Energy) і алгоритмів машинного навчання, що розглядається у роботі [22]. Система аналізує рівень



прийнятого сигналу, що надходить через три стандартні канали BLE — 37, 38 та 39. Зібрані дані обробляються за допомогою регресійних моделей машинного навчання, зокрема нейронних мереж і методу опорних векторів, що дозволяє підвищити точність оцінки відстані до об'єкта в умовах радіоперешкод. Запропонована архітектура також залучає дані з сенсорів руху смартфонів для підвищення точності. Основна перевага цієї системи полягає в низькій вартості впровадження, сумісності з мобільними пристроями та високій точності локалізації, що робить її конкурентною альтернативою RFID-рішенням. Автоматизоване відстеження місця розташування ресурсів забезпечує зниження часу пошуку, полегшує інвентаризацію та прискорює виконання замовлень у середовищах з високою щільністю товарів.

Для узагальнення виявлених тенденцій проаналізовані дослідження згруповано за типом поставлених задач, застосованими методами та характером експериментального середовища. Така структуризація дозволяє системно зіставити використовувані алгоритми, рівень складності задач та типи даних, на яких вони тестувалися, що дає змогу оцінити ступінь практичної придатності кожного підходу (табл. 2).

Таблиця 2

**Характеристики проаналізованих досліджень
за типом задач, методів і середовищ застосування**

Джерело	Задача	Мета використання	Метод / алгоритм	ML застосовано	Тип середовища
[9]	SLAP	Оптимізація з урахуванням безпеки	Евристика з урахуванням безпеки працівників	Ні	Ручне зонування складу
[15]	SLAP	Кластеризація текстових описів	Кластеризація текстових описів	Так	ERP/система управління складом
[14]	IoT WMS	Автоматизація через IoT	Правила IoT та автоматичне відстеження	Ні	IoT-інфраструктура в логістиці
[16]	SLAP	Автоматичне навчання стратегії розміщення за допомогою DRL	Глибоке Q-навчання	Так	Симульоване середовище
[17]	SLAP	Групування на основі часових рядів	Ієрархічна кластеризація + динамічне вирівнювання часових рядів	Так	Е-commerce склад
[12]	OPP	Мінімізація поворотів	Комбінаторна оптимізація зі штрафами за повороти	Ні	Склад з паралельними проходами
[6]	OPP	Покращення умов роботи з PTR	Оптимізаційна модель з урахуванням людських факторів	Ні	Система збирачів із PTR
[13]	SLAP	Покращення через RFID	Система на правилах з RFID	Ні	Невеликий виробничий склад в машинобудівній сфері із застосуванням RFID-рішень



[21]	ABC zoning	Прогнозування оптимальних розмірів зон ABC	Лінійна регресія, дерево рішень, випадковий ліс, багат шаровий перцептрон	Так	Неавтоматизований склад (picker-to-parts)
[5]	Планування послідовності замовлень	Оптимізація загального часу виконання робіт	Басівська рекурентна нейромережа + імітаційне відпалювання	Так	Склад з AGV/роботами
[22]	Локалізація об'єктів	Точна локалізація за BLE	Методи машинного навчання на основі RSSI, KNN	Так	Закриті приміщення з BLE
[4]	Гібридна маршрутизація	Динамічна маршрутизація AGV	Навчання з підкріпленням з керуванням заповнювачами	Так	Склад з AGV в реальному часі
[10]	Batching	Чутливість до групування замовлень	Імітаційне моделювання сценаріїв	Ні	Симуляція складу
[7]	SLAP	Корельоване розосереджене розміщення	Евристичне кластеризоване розміщення	Ні	Роботизований склад
[3]	Оцінка впровадження RMFS	Аналіз впливу конфігурацій на ефективність системи	Агентно-орієнтована симуляція	Ні	Симуляційна модель RMFS
[11]	SLAP	Оптимізація для зменшення дискомфорту	Оптимізаційна модель з урахуванням ефективності та комфорту працівників	Ні	Реальні склади з персоналом
[20]	OPP	Прогноз навантаження	Прогнозування навантаження на збирачів замовлень	Так	Зональний склад
[19]	Batching	Онлайн-групування B2B замовлень	Нечітка логіка + генетичний алгоритм	Так	Центр обробки B2B замовлень
[18]	SLAP	Розміщення за асоціативними зв'язками	Алгоритм на основі асоціативних правил	Так	Склад з довільним розміщенням товарів
[8]	SLAP	Класифікація на основі історичних замовлень	Кластеризація + SVM-класифікація	Так	Роботизована система виконання замовлень (RMFS)

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У статті здійснено систематизований аналіз 20 наукових досліджень, відібраних із бази Scopus відповідно до протоколу PRISMA 2020, що охоплюють сучасні підходи до вирішення задач призначення місць зберігання, комплектування замовлень та впровадження роботизованих мобільних систем у складській логістиці. У результаті огляду виявлено, що методи машинного навчання демонструють суттєву перевагу над класичними евристичними стратегіями у складних умовах динамічного попиту, високої щільності товарів та необхідності адаптивної маршрутизації.



Одержані результати дозволили:

- класифікувати існуючі підходи за типом задачі, застосованими алгоритмами, середовищем реалізації та ступенем автоматизації;
- виявити найбільш перспективні методи, зокрема кластеризацію часових рядів, глибоке навчання з підкріпленням, а також поєднання текстового аналізу з асоціативними правилами;
- узагальнити практичні переваги інтеграції ML-моделей у системи управління складом, включаючи скорочення часу комплектування, покращення організації робочого простору, зменшення транспортних витрат та підвищення точності розміщення.

Водночас встановлено, що більшість існуючих рішень фокусуються на оптимізації ізольованих аспектів складських процесів і потребують подальшої інтеграції в єдину архітектуру інтелектуального управління. Залишається недостатньо дослідженим вплив багатофакторних обмежень, таких як енергоспоживання, взаємодія персоналу з роботизованими або автоматизованими системами, а також оновлення параметрів замовлень у реальному часі залежно від змін у клієнтських запитах.

Подальші дослідження в напрямку кластеризації історичних даних заслуговують особливої уваги, з огляду на можливість врахування часової та кореляційної структури попиту при призначенні місць зберігання. Розглянута у роботі [17] гібридна стратегія, яка інтегрує методи кластеризації часових рядів з політиками зонального розміщення, що за висновками авторів дозволяє суттєво підвищити обґрунтованість прийняття рішень в умовах динамічного попиту. Перспективним є розвиток моделей, здатних адаптивно оновлювати кластери на основі нових вхідних даних у реальному часі, а також розширення таких підходів на багаторівневі складські структури та мережеві логістичні системи. Це створює передумови для формування гнучких, інтелектуальних систем управління запасами зі здатністю до швидкої адаптації до коливань попиту.

Окрему увагу слід приділити аналізу асоціативних зв'язків між товарами, що часто зустрічаються в складі одного замовлення. У дослідженні [8] обґрунтовано доцільність кластеризації таких товарів на основі патернів їхньої спільної появи, а також синхронізації стратегій зберігання у контексті роботизованих мобільних систем. Такий підхід сприяє підвищенню логістичної узгодженості та зменшенню обсягу внутрішньоскладських переміщень під час комплектування.

Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція аналізу асоціативних зв'язків із часовими аспектами попиту. Це дозволить враховувати не лише факт спільного замовлення товарів, але й часові закономірності у їх появі з подальшим відображенням цих залежностей у стратегічному плануванні розміщення товарів у динамічному середовищі RMFS.

Також варто поглибити вивчення адаптивної кластеризації, яка оновлює розміщення залежно від сезонності та короткострокових трендів. Такі моделі можуть використовувати алгоритми з поступовим навчанням або поєднання з прогностичними моделями на основі довгої короткочасної пам'яті, які здатні враховувати тимчасові залежності в динаміці попиту та забезпечують більш точне передбачення змін попиту у часі.

Таким чином, проведене дослідження не лише окреслює сучасний стан наукових розробок у сфері оптимізації складських процесів, а й закладає підґрунтя для подальших комплексних рішень, що інтегрують дані, алгоритмічні моделі та участь персоналу. Такі рішення спрямовані на формування цілісної та ефективної логістичної системи управління.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wanyama S. B., McQuaid R. W., Kittler M. Where you search determines what you find: the effects of bibliographic databases on systematic reviews. *International Journal of Social Research Methodology*. 2021. C. 1–13. <https://doi.org/10.1080/13645579.2021.1892378>
2. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews / M. J. Page та ін. *Journal of Clinical Epidemiology*. 2021. T. 134. C. 178–189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001>
3. How to Deploy Robotic Mobile Fulfillment Systems / L. Zhen та ін. *Transportation Science*. 2023. <https://doi.org/10.1287/trsc.2022.0265>
4. Research on Hybrid Real-Time Picking Routing Optimization Based on Multiple Picking Stations / D. Wang та ін. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. T. 2022. C. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/5510749>
5. I. Suemitsu (2022) Fast Simulation-based Order Sequence Optimization Assisted by Pre-trained Bayesian Recurrent Neural Network, *IEEE Robotics and Automation Letters*. 1–8. <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3185778>
6. Vijayakumar V., Sobhani A. Performance optimisation of pick and transport robot in a picker to parts order picking system: a human-centric approach. *International Journal of Production Research*. 2023. C. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2232469>
7. Mirzaei M., Zaerpour N., de Koster R. B. M. How to benefit from order data: correlated dispersed storage assignment in robotic warehouses. *International Journal of Production Research*. 2021. C. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1971787>
8. Keung K. L., Lee C. K. M., Ji P. Data-driven order correlation pattern and storage location assignment in robotic mobile fulfillment and process automation system. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. T. 50. C. 101369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101369>
9. Adaptive warehouse storage location assignment with considerations to order-picking efficiency and worker safety / A. Zarinchang та ін. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2023. C. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2263009>
10. From Single Orders to Batches: A Sensitivity Analysis of Warehouse Picking Efficiency / C. Suppini та ін. *Sustainability*. 2024. T. 16, № 18. C. 8231. URL: <https://doi.org/10.3390/su16188231>
11. Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions / J. A. Larco та ін. *International Journal of Production Research*. 2016. T. 55, № 21. C. 6407–6422. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1165880>
12. Çelik M., Süral H. Order picking in a parallel-aisle warehouse with turn penalties. *International Journal of Production Research*. 2016. T. 54, № 14. C. 4340–4355. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1154624>
13. Choy K. L., Ho G. T. S., Lee C. K. H. A RFID-based storage assignment system for enhancing the efficiency of order picking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014. T. 28, № 1. C. 111–129. URL: <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0965-9>
14. Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics / C. K. M. Lee та ін. *International Journal of Production Research*. 2017. T. 56, № 8. C. 2753–2768. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592>
15. An optimization algorithm based on text clustering for warehouse storage location allocation / C. Xin та ін. *2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)*, м. Shenyang, China, 23–27 лип. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ici.2019.8850832>
16. Dynamic Storage Location Assignment in Warehouses Using Deep Reinforcement Learning / C. Waubert de Puiseau та ін. *Technologies*. 2022. T. 10, № 6. C. 129. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies10060129>
17. Enhancing Warehouse Efficiency with Time Series Clustering: A Hybrid Storage Location Assignment Strategy / H. Kalkha та ін. *IEEE Access*. 2024. C. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3386887>
18. Pang K.-W., Chan H.-L. (2016). Data mining-based algorithm for storage location assignment in a randomised warehouse. *International Journal of Production Research*, 55(14), 4035–4052. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1244615>
19. Leung K. H., Lee C. K. M., Choy K. L. An integrated online pick-to-sort order batching approach for managing frequent arrivals of B2B e-commerce orders under both fixed and variable time-window batching. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. T. 45. C. 101125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101125>
20. T. van Gils (2016). The use of time series forecasting in zone order picking systems to predict order pickers' workload. *International Journal of Production Research*, 55(21), 6380–6393. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1216659>
21. Estimating optimal ABC zone sizes in manual warehouses / A. Silva та ін. *International Journal of Production Economics*. 2022. C. 108579. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108579>
22. Zadgaonkar H., Chandak M. Locating Objects in Warehouses Using BLE Beacons & Machine Learning. *IEEE Access*. 2021. T. 9. C. 153116–153125. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3127908>

**Andrii Balvak**

PhD student at the Department of Computer Engineering
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-6441-8225
a.balvak@stud.duikt.edu.ua

Nataliia Lashchevska

Head of the Department of Computer Engineering
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2148-115X
n.lashchevska@duikt.edu.ua

**INTELLIGENT APPROACHES FOR ENHANCING WAREHOUSE EFFICIENCY:
ITEM PLACEMENT, ORDER PICKING, AND ROBOTIC AUTOMATION**

Abstract. The article presents a systematic review of contemporary scientific approaches to solving the Storage Location Assignment Problem (SLAP), managing the Order Picking Problem (OPP), and implementing Robotic Mobile Fulfillment Systems (RMFS) in warehouse logistics using machine learning methods. The study was based on a selection of publications from the Scopus database, compiled according to the PRISMA 2020 methodology, ensuring transparency and reproducibility of the analysis. As a result, 20 scientific publications were selected, each containing experimental and applied results related to logistics center automation. Task types, methods, and implementation technologies structure the literature analysis. It covers classical heuristic algorithms, intelligent systems, hybrid strategies, and machine learning-based approaches, including deep reinforcement learning, time series clustering, and associative analysis. Emphasis is placed on practical applications that aim to improve storage efficiency, reduce transportation costs, shorten order-picking times, and minimize physical strain on personnel. Particular attention is given to robotic systems that optimize movement routes and reduce overall operational time. The most promising directions include algorithms combining historical data analysis, product correlations, and preliminary demand classification. It was found that combined models integrating temporal features and associative relationships are effective in adaptive inventory placement and order batching. The results are systematized based on features such as task type, applied method, presence of machine learning, and implementation environment. The article also outlines future research directions, including adaptive clustering with seasonality considerations, predictive storage updates, Long Short-Term Memory (LSTM) model integration, and attention to energy-related aspects. As a result, the conducted research enables us to form a comprehensive understanding of the current state of scientific approaches in warehouse process optimization, providing the basis for the development of complex intelligent management systems that prioritize flexibility, efficiency, and the sustainable development of logistics centers.

Keywords: product placement optimization; storage location assignment; order picking; machine learning; time series clustering; robotic systems; logistics centers.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Wanyama S. B., McQuaid R. W., Kittler M. Where you search determines what you find: the effects of bibliographic databases on systematic reviews. *International Journal of Social Research Methodology*. 2021. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1080/13645579.2021.1892378>
2. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews / M. J. Page et al. *Journal of Clinical Epidemiology*. 2021. Vol. 134. P. 178–189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001>
3. How to Deploy Robotic Mobile Fulfillment Systems / L. Zhen et al. *Transportation Science*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.2022.0265>
4. Research on Hybrid Real-Time Picking Routing Optimization Based on Multiple Picking Stations / D. Wang et al. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. Vol. 2022. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/5510749>



5. Fast Simulation-based Order Sequence Optimization Assisted by Pre-trained Bayesian Recurrent Neural Network / I. Suemitsu et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3185778>
6. Vijayakumar V., Sobhani A. Performance optimisation of pick and transport robot in a picker to parts order picking system: a human-centric approach. *International Journal of Production Research*. 2023. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2232469>
7. Mirzaei M., Zaerpour N., de Koster R. B. M. How to benefit from order data: correlated dispersed storage assignment in robotic warehouses. *International Journal of Production Research*. 2021. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1971787>
8. Keung K. L., Lee C. K. M., Ji P. Data-driven order correlation pattern and storage location assignment in robotic mobile fulfillment and process automation system. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. Vol. 50. P. 101369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101369>
9. Adaptive warehouse storage location assignment with considerations to order-picking efficiency and worker safety / A. Zarinchang et al. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2023. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2263009>
10. From Single Orders to Batches: A Sensitivity Analysis of Warehouse Picking Efficiency / C. Suppini et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 18. P. 8231. URL: <https://doi.org/10.3390/su16188231>
11. Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions / J. A. Larco et al. *International Journal of Production Research*. 2016. Vol. 55, no. 21. P. 6407–6422. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1165880>
12. Çelik M., Süral H. Order picking in a parallel-aisle warehouse with turn penalties. *International Journal of Production Research*. 2016. Vol. 54, no. 14. P. 4340–4355. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1154624>
13. Choy K. L., Ho G. T. S., Lee C. K. H. A RFID-based storage assignment system for enhancing the efficiency of order picking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014. Vol. 28, no. 1. P. 111–129. URL: <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0965-9>
14. Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics / C. K. M. Lee et al. *International Journal of Production Research*. 2017. Vol. 56, no. 8. P. 2753–2768. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592>
15. An optimization algorithm based on text clustering for warehouse storage location allocation / C. Xin et al. *2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)*, Shenyang, China, 23–27 July 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ici.2019.8850832>
16. Dynamic Storage Location Assignment in Warehouses Using Deep Reinforcement Learning / C. Waubert de Puiseau et al. *Technologies*. 2022. Vol. 10, no. 6. P. 129. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies10060129>
17. Enhancing Warehouse Efficiency with Time Series Clustering: A Hybrid Storage Location Assignment Strategy / H. Kalkha et al. *IEEE Access*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3386887>
18. Pang K.-W., Chan H.-L. Data mining-based algorithm for storage location assignment in a randomised warehouse. *International Journal of Production Research*. 2016. Vol. 55, no. 14. P. 4035–4052. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1244615>
19. Leung K. H., Lee C. K. M., Choy K. L. An integrated online pick-to-sort order batching approach for managing frequent arrivals of B2B e-commerce orders under both fixed and variable time-window batching. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. Vol. 45. P. 101125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101125>
20. The use of time series forecasting in zone order picking systems to predict order pickers' workload / T. van Gils et al. *International Journal of Production Research*. 2016. Vol. 55, no. 21. P. 6380–6393. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1216659>
21. Estimating optimal ABC zone sizes in manual warehouses / A. Silva et al. *International Journal of Production Economics*. 2022. P. 108579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iipe.2022.108579>
22. Zadgaonkar H., Chandak M. Locating Objects in Warehouses Using BLE Beacons & Machine Learning. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 153116–153125. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3127908>

