

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

DOI: 10.20535/1970.69(1).2025.331853

УДК 519.8

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО СКЛАДУ

*Дмитренко С. А., Барандич К. С.**Національний технічний університет України**"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна**E-mail: dmmytrenko@gmail.com*

Проблема ефективного розміщення деталей на автоматизованому складі є ключовою для підвищення продуктивності логістичних процесів і дотримання сучасних вимог до швидкості виконання замовлень у межах індустрії 4.0. Класичні підходи до складування – зокрема ABC-аналіз і одноцільова оптимізація за критерієм популярності деталей – часто призводять до нерівномірного розподілу найзатребуваніших позицій між зонами, надмірного навантаження окремих ділянок і необґрунтованого підйому важких компонентів на високі яруси. Це знижує гнучкість системи у разі змін попиту та ускладнює підтримку необхідного рівня обслуговування (SLA).

Метою дослідження стало створення багатокритеріальної моделі розміщення деталей, що одночасно забезпечує мінімізацію часу доступу до деталей, збалансованість завантаження різних зон складу та уникнення розміщення важких компонентів на високих рівнях стелажів. Запропонований підхід базується на врахуванні трьох взаємопов'язаних критеріїв — часу відбору, балансу популярності деталей між зонами та відповідність вагових і габаритних обмежень технічним характеристикам комірок — із можливістю налаштування пріоритетів через вагові коефіцієнти.

Для перевірки адекватності моделі використано кілька методів валідації: аналіз залишків виконання структурних обмежень, аналіз чутливості до зміни вагових коефіцієнтів та порівняння результатів із еталонними сценаріями. Запропонована процедура валідації дозволяє переконатися, що рішення відповідають технічним вимогам, уникати порушення вантажопідйомності й об'єму комірок та забезпечувати рівномірне навантаження автоматизованих зон.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування багатокритеріальної оптимізації як альтернативи традиційним методам складування, що дозволяє гнучко адаптувати стратегії розміщення деталей відповідно до бізнес-пріоритетів і поточних виробничих обмежень. Запропонована модель може бути інтегрована в інформаційні системи управління складом (ERP/MES) для автоматизованого планування і переналаштування розміщення товарів, що сприятиме підвищенню точності комплектування замовлень, зменшенню експлуатаційних витрат і покращенню загальної ефективності роботи автоматизованих складів.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація; автоматизований склад; мета евристики; генетичні алгоритми; рівень обслуговування (SLA).

Вступ

В умовах постійного зростання обсягів виробництва та вимог споживачів до швидкості виконання замовлень сучасні підприємства приділяють особливу увагу автоматизованим складам. Вони набувають поширення завдяки можливості інтелектуального керування великою кількістю позицій (комірок) і синхронізації складських процесів з виробничими лініями, системами транспортування та іншими ланками логістичного ланцюга. У межах індустрії 4.0 автоматизовані склади розглядають як ключовий елемент цифрової інфраструктури, що дозволяє не лише прискорити процес від-

бору деталей, а й автоматично фіксувати та аналізувати дані про кожну операцію – від переміщення деталі до її використання [1]. Такий підхід відкриває перспективу для розробки алгоритмів, здатних самостійно аналізувати попит на товари та їхню популярність, враховувати вагові й габаритні обмеження комірок, а також планувати транспортування складським устаткуванням (навантажувачами, автоматизованими платформами, кранштабелерами або AGV).

Особливо гостро постає питання ефективності використання наявних ресурсів складу. У класичному форматі складування, коли весь асортимент

просто розташований згідно з одним із критеріїв (наприклад, за принципом ABC-аналізу або за вагою), часто виникають проблеми (“bottleneck”), пов’язані з нерівномірним розподілом найпопулярніших товарів (деталей), надмірним навантаженням на окремі зони чи необхідністю транспортувати важкі деталі надто високо. Крім того, нехтування багатокритеріальним підходом знижує гнучкість і адаптивність у разі змін попиту або введення в експлуатацію нових виробів. З іншого боку, у високотехнологічному середовищі з великою кількістю інформації про товарні одиниці на складі та складною структурою стелажів з’являється необхідність застосування метаевристичних алгоритмів: вони можуть одночасно врахувати декілька факторів, таких як час доступу до деталей, балансування відбору між різними підйомними механізмами чи унеможливлення розміщення важких компонентів у незручних для вантажно-розвантажувальної техніки ярусах. Саме тому багатокритеріальна оптимізація стає виправданою альтернативою традиційним методам, які зосереджуються на одній меті й ігнорують інші важливі фактори.

Аналіз існуючих технічних рішень

У сучасних наукових та прикладних дослідженнях, присвячених оптимізації складських процесів, окрему роль відіграє задача раціонального розміщення деталей у комірках. Вона належить до класу комбінаторних задач, у яких необхідно врахувати різні обмеження: суто логістичні (мінімізація часу доступу, збереження певного рівня запасів), технічні (дотримання вантажопідйомності стелажів чи висотні ліміти), а також додаткові бізнес-вимоги, що регулюються внутрішніми й зовнішніми чинниками. Зокрема, тут можна згадати про SLA (Service Level Agreement), коли від складу вимагається дотримуватись певного рівня обслуговування: максимального часу відбору, доступності найходовіших товарів, швидкості комплектування й рівномірності завантаження роботизованих чи автоматизованих систем.

Дослідження в цій галузі тривалий час спиралися на спрощені методи, на кшталт ABC-аналізу. Суть ABC-підходу полягає в тому, що деталі поділяють на групи (A, B, C) за критеріями: частота звернень, вартість чи обсяг реалізації. Надалі деталі групи A зберігають у найбільш доступних комірках, тоді як групи B та C – у периферійних зонах. Цей метод є швидким, проте працює здебільшого спираючись на однофакторну оптимізацію (найчастіше за критерієм популярності товару) й не розв’язує суперечностей, які виникають, коли необхідно врахувати одразу декілька критеріїв. Жадібні алгоритми (англ. Greedy algorithms) також не дають змоги досягти “глобально” оптимального рішення, особливо якщо на складі тисячі позицій для зберігання, і в кожній може бути власний набір технічних обмежень (вага, обсяг тощо).

Зі зростанням масштабів виробництва і логістичних ланцюгів, дослідники почали застосовувати метаевристичні алгоритми [2]. Одним із найпопулярніших є генетичний алгоритм (GA), який дає змогу еволюційно “розв’язувати” задачу розміщення: створюється початкова популяція рішень, кожне з яких кодоване у вигляді бінарних змінних чи перестановок, а далі завдяки операторам селекції, схрещування, мутації відбувається пошук “кращого” варіанту розподілу товарів [3]. Інший метаевристичний підхід – Particle Swarm Optimization (PSO), відомий завдяки натхненню колективною поведінкою живих істот. Хоча PSO зазвичай відмінно працює у неперервному просторі рішень, для дискретної оптимізації (як-от розміщення комірок) його можна адаптувати, але це ускладнює реалізацію [4]. Імітація відпау (Simulated Annealing) теж успішно застосовується, коли є можливість поетапно “охолоджувати” задачу, дозволяючи алгоритму виходити з локальних мінімумів [5]. Усі ці алгоритми мають спільну перевагу: вони можуть одночасно чи у певній послідовності враховувати кілька важливих критеріїв, включно з тим, що вимагає SLA, наприклад, у частині обмеження максимально допустимого часу виконання певної операції.

Задача додатково ускладнює низка обмежень. По-перше, кожна комірка може мати обмежену вантажомісткість, що не дає розмістити в ній надто важкі деталі. По-друге, деякі стелажі не підходять для великогабаритних компонентів через свої конструкційні особливості. Окрім цих вимог, часто доводиться ще й рівномірно розподіляти ходові товари між різними автоматизованими зонами (зокрема, платформами) на складі. Такий розподіл важливий, аби уникнути перевантаження однієї зони й надмірних черг при відборі деталей, тоді як інші зони залишалися б недозавантаженими.

Тоді однокритеріальний підхід щодо мінімізації часу необхідного на переміщення товарів із зони зберігання до виробничої зони здатен призвести до перевантаження однієї зони, а ігнорування особливостей важких деталей – до неврахування великих енерговитрат і ризику зношування техніки. В такому випадку доцільним є застосування методик багатокритеріальної оптимізації, що формують компромісні рішення.

У наукових публікаціях, присвячених задачі Location Assignment Problem (LAP) на автоматизованих складах, все більше уваги приділяється одночасній оптимізації кількох показників. Зокрема, дослідники фокусуються на мінімізації часу та шляху відбору та суворому дотриманні SLA – наприклад, коли товари з високим пріоритетом повинні бути доступними у визначений проміжок часу [5].

Крім того, деякі моделі включають додаткові штрафи, наприклад, за перевищення максимально допустимого навантаження на комірки (враховуючи вагу або енергоспоживання) або за часті пере-

міщення деталей між зонами складу. Це дозволяє уникати ситуацій, коли оптимізація за одним критерієм призводить до неефективності за іншим.

Щоб знайти збалансоване рішення, часто використовують гібридні алгоритми [6]. Вони комбінують евристичні методи для швидкого отримання початкового розв'язку та метаевристики (наприклад, генетичний алгоритм (GA)), які покращують цей розв'язок, наближаючи його до глобального оптимуму. Такий підхід дозволяє отримати ефективні рішення навіть для складних складських систем із великою кількістю товарів і комірок [7].

Є також приклади застосування схожих підходів у різних галузях. В автомобільній промисловості (особливо на складах, що обслуговують конвеєрні лінії) важливо не лише швидко доставляти потрібну деталь, а й не перевантажувати одну ділянку. Перебої тут безпосередньо впливають на роботу всього заводу, що неприпустимо з огляду на суворі SLA перед внутрішнім “клієнтом” (виробничою лінією). У великій роздрібній торгівлі ключовими факторами стають швидкість та мінімізація помилок під час відбору товарів. Застосування генетичних алгоритмів (GA) та інших методів оптимізації для перепланування складу дозволяє значно покращити процес комплектації замовлень, зменшуючи час їх обробки та підвищуючи точність виконання [8]. Оптимізація розміщення товарів з урахуванням частоти їхнього використання, термінів придатності та інших факторів дозволяє ефективніше використовувати складські ресурси та зменшити навантаження на персонал.

Отже, аналіз літератури свідчить, що дослідники поступово відходять від вузьких (одноцільових) алгоритмів на користь більш комплексних підходів, які водночас вирішують кілька логістичних проблем. Вибір конкретної метаевристики часто визначається масштабом завдання та обмеженнями на обчислювальні ресурси. Генетичні алгоритми традиційно залишаються популярними, оскільки дають змогу закодувати розв'язок у вигляді матриці “деталь-комірка”, включати штрафні коефіцієнти за перевищення вагових лімітів чи за порушення умови “кожна деталь у рівно одній комірці”, і при цьому знаходять компромісні рішення в умовах великих розмірностей [1].

Узагальнюючи, можна сказати, що сучасні тенденції передбачають використання або гібридних алгоритмів (комбінація метаевристик із локальними пошуками чи евристиками), або мультицільових (Pareto, зважена сума, цільові штрафи), які найкраще враховують складну природу автоматизованих складів. На додаток, зберігання “запасів” на різних рівнях (верхньому, нижньому), відстеження вагових та габаритних лімітів, а також дотримання SLA – усе це вимагає від нових моделей оптимізації більшої гнучкості й здатності вести пошук у просторі зі складними обмеженнями [3]. Саме тому багатокритеріальна постановка в контексті таких метаевристик, як GA, Particle Swarm

чи Simulated Annealing, вважається провідним напрямом досліджень, покликаним розв'язувати практичні задачі управління запасами та підвищувати ефективність роботи сучасних автоматизованих складів [8].

Постановка задачі

Сформулюємо задачу розміщення деталей на автоматизованому складі як багатокритеріальну, тобто враховуємо одразу кілька важливих критеріїв. Для кожної деталі $i = 1, \dots, N$ і кожної комірки (позиції) $j = 1, \dots, M$ запроваджується бінарна змінна $x_{i,j}$ що дорівнює 1, якщо деталь i розміщується саме в комірці j , і 0 – інакше. Завдяки цій змінній ми можемо описати кілька функцій, які відображають різні аспекти якості розміщення. У підсумку будемо зважену суму цих функцій, отримуючи багатокритеріальну цільову функцію.

Розв'язання задачі

Насамперед вводимо поняття “популярності” (або частоти звернень) деталі i , позначимо як $\text{freq}(i)$. Це число відображає, наскільки часто деталь i вилучається зі складу. Далі припустимо, що для кожної деталі i кожної комірки j можна визначити “час доступу” T_i , який описує сумарні витрати часу на отримання цієї деталі, якщо вона зберігається в j -й комірці. Зокрема, сюди можуть входити час переміщення платформи до потрібного місця, затримка на підйом тощо. Підсумовуючи,

$$f_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [\text{freq}(i) \times T_i] x_{i,j}$$

отримуємо:

Чим менше f_1 , тим менше загальний час відбору популярних деталей на складі, що є важливим критерієм ефективності.

Другий критерій може відображати “рівномірність” або “баланс” розподілу популярних деталей між різними зонами чи модулями складу (наприклад, різні проходи, платформи, блоки). Позначмо через $Z_k \subseteq \{1, \dots, M\}$ множину позицій, що належать зоні (або платформі) $k = 1, \dots, K$. Також маємо μ_k бажану сумарну популярність у зоні k . Якщо в якійсь зоні сконцентровано забагато популярних деталей, виникнуть черги й перевантаження робота чи платформи, що забезпечують їх транспортування. Для контролю балансу визначимо:

$$f_2 = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j \in Z_k} \text{freq}(i) x_{i,j} - \mu_k \right]^2$$

Невелике значення f_2 означає, що сумарна популярність у кожній зоні k близька до бажаної μ_k , і ми уникаємо перевантажених зон, де засоби транспортування можуть затримуватись. У реальних умовах μ_k встановлюють, виходячи з пропускної здатності кожної платформи чи конвеєрного сегмента.

Третій критерій покликаний уникати надмірного переміщення важких (або габаритних) деталей на високі рівні, що може призводити до додаткових витрат часу й енергії (або й підвищеного зносу технічних засобів). Кожна деталь i має вагу $weight(i)$, а кожна комірка j – “висотний” коефіцієнт $height(j)$, що більший для “верхніх” позицій. Визначимо:

$$f_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [weight(i) \times height(j)] x_{i,j}$$

Коли важкі деталі збігаються з високим коефіцієнтом, значення f_3 буде великим. Отже, мінімізація f_3 стимулює розміщувати більш важкі предмети якомога нижче, роблячи доступ до них безпечнішим і менш енерговитратним.

Зважена сума цих трьох критеріїв утворює нашу багатокритеріальну цільову функцію:

$$\min[\alpha f_1 + \beta f_2 + \gamma f_3],$$

де $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ – це вагові коефіцієнти, кожен із яких відповідає за відносну важливість відповідного критерію. Для акценту на швидкості доставки, посилюється коефіцієнт α , для рівномірного розміщення – β , у випадку частих підйомів важких деталей акцент уваги зміщується на γ . Завдяки цим коефіцієнтам модель гнучко адаптується до пріоритетів підприємства.

Щоб забезпечити правильність розв’язку, потрібно накласти кілька обмежень:

1. Кожна деталь i має бути рівно в одній комірці j :

$$\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, N.$$

2. Якщо модель припускає “одна комірка = одна деталь”, маємо

$$\sum_{i=1}^N x_{i,j} \leq 1, \quad \forall j = 1, \dots, M$$

3. Вага не перевищує граничну

$$\sum_{i=1}^N [weight(i) \cdot x_{i,j}] \leq capWeight(j),$$

$$\forall j = 1, \dots, M$$

4. Обсяг (габарити) не перевищує місткість

$$\sum_{i=1}^N [volume(i) \cdot x_{i,j}] \leq capVolume(j),$$

$$\forall j = 1, \dots, M$$

Таке формулювання дозволяє одночасно мінімізувати загальні витрати часу, уникати перевантаження складу популярними деталями та розташовувати важкі товари на нижчих рівнях. Використання змінних $x_{i,j}$ спрощує впровадження цієї задачі в середовищі метаевристичних алгоритмів (наприклад, генетичного алгоритму), оскільки кожне розміщення можна подати як масив бінарних значень, а штрафи за порушення обмежень

додати до цільової функції або забезпечити через окрему систему нерівностей.

У підсумку, формулювання багатокритеріальної математичної моделі дає змогу інтегрувати різні логістичні аспекти та задовольняти складні комбінації вимог. Керівник чи аналітик може змінювати α, β, γ , щоб налаштувати пріоритети оптимізації під поточні бізнес-завдання або виробничі обмеження – це робить модель універсальною в рамках різних сценаріїв управління автоматизованим складом.

Після побудови багатокритеріальної математичної моделі виникає необхідність у перевірці її застосовності для вирішення задачі оптимального розміщення деталей на автоматизованому складі. Це питання правильності формулювання математичної моделі та результатів її використання. Нижче наведено кілька підходів, які допомагають провести таку валідацію та показати, що модель розв’язує реальну складську проблему.

1. Аналіз залишків і перевірка структурних обмежень

Один із найпростіших, але дієвих способів – це аналіз, наскільки точно виконується ключове обмеження “кожна деталь повинна бути рівно в одній комірці”:

$$\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1,$$

для кожної деталі i .

Якщо модель вирішується через, наприклад, генетичний алгоритм [3, 9] без прямої умови $\sum_j x_{i,j} = 1$, а замість цього застосовується великий штраф у цільовій функції, корисно перевірити, чи після оптимізації сумарне відхилення $\sum_j x_{i,j} - 1$ для кожної деталі i є близьким до нуля.

Аналогічно, якщо присутні вагові обмеження (наприклад, $\sum_j weight(i) x_{i,j} \leq capWeight(j)$), можна перевірити, чи не перевищує реальна сумарна вага ліміти комірок на виході алгоритму. Щоб оцінити, наскільки модель виконує умову “одна деталь – одна комірка”, вводять так звані “залишки”:

$$r_{i,j} = \sum_{j=1}^M x_{i,j} - 1$$

Якщо $r_i = 0$ для всіх i , це означає ідеальну відповідність; якщо ж існує $r_i \neq 0$ залишається оцінити, наскільки вони великі. Цей підхід можна розширити на інші обмеження (наприклад, вагові, об’ємні): визначити відхилення від допустимих меж у вигляді штрафів або різниць і перевірити, чи не порушують вони технічні регламенти.

2. Аналіз чутливості (Sensitivity Analysis)

Задача багатокритеріальної оптимізації часто містить вагові коефіцієнти (α, β, γ), які визначають відносну важливість різних критеріїв (час доступу, баланс, уникнення підйому важких деталей). Аналіз чутливості полягає в тому, щоб невеликим

чином змінити ці коефіцієнти або вхідні дані (наприклад, незначно збільшити вагу певної деталі) і перевірити, як змінюється розв'язок.

Якщо система “логічно” реагує (наприклад, при збільшенні α , вона сильніше фокусується на мінімізації загального часу, а при підвищенні γ уникає високих рівнів для важких деталей), це свідчить, що модель справді враховує потрібні чинники. Якщо ж маленька зміна вагових коефіцієнтів спричиняє радикальні “скачки” в розв'язку без зрозумілої причини або ж взагалі не впливає на нього, це може вказувати на імовірну неправильну масштабованість критеріїв або надто жорсткі обмеження.

3. “Умовний” F-тест для перевірки сумарних залишків

Критерій Фішера у класичному вигляді застосовують переважно в регресійних моделях, однак у межах цієї задачі його можна використати як евристичну міру, щоб визначити, наскільки точно виконується умова $\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1$ (тобто чи кожна деталь i справді розміщена рівно в одній комірці). Для цього обчислюють залишки

$$r_{i,j} = \sum_{j=1}^M x_{i,j} - 1$$

Далі обчислюють суму квадратів залишків:

$$SSR = \sum_{i=1}^N r_i^2$$

Якщо SSR набуває значення, меншого за обрану малу похибку ε , можна вважати, що умова «одна деталь – одна комірка» дотримана з прийнятною точністю. У протилежному випадку (коли SSR перевищує наперед визначений поріг) алгоритм не забезпечив належного виконання відповідного обмеження.

Для інтерпретації SSR у термінах F-подібного показника, вводиться контрольна дисперсія SST. Така дисперсія фіксує «еталонну» загальну варіацію, із якою порівнюватиметься обчислене значення SSR:

$$F_{approx} = \frac{SST - SSR}{SSR / (N - 1)}$$

Зафіксований поріг F_{min} визначає допустиме співвідношення між SST та SSR. Якщо $F_{approx} \geq F_{min}$, розміщення задовольняє вимогу «рівно одна комірка на деталь», інакше алгоритм не забезпечує необхідну точність виконання обмеження. Такий спосіб обчислення не є класичним F-тестом у регресії, але дає кількісну оцінку відповідності моделі логічним вимогам.

4. Порівняння з еталонними сценаріями

Якщо доступні штучно згенеровані сценарії, в яких за нескладних умов (N та M не надто великі) уже відомий оптимальний або близький до нього розв'язок, можна перевірити модель саме на таких даних. Після отримання результату порівнюють його з еталонним сценарієм: якщо рішення відрізняється, слід з'ясувати, чи не показує новий варіант кращі значення часу доступу, збалансованості або уникнення розміщення важких деталей на високих рівнях. Навіть тоді, коли розв'язок відрізняється від “ручного” чи іншого базового варіанта, він може бути ефективнішим за ключовими критеріями. Водночас якщо алгоритм формує явно нелогічні конфігурації (зокрема, ставить великогабаритні компоненти на верхні яруси без вагомої причини), це може свідчити про потребу коригування параметрів моделі або перегляду методу оптимізації.

5. Можливе розширення на інші чинники

У реальних умовах на складі часто існують товари, що мають підвищений пріоритет і повинні бути доступні в обмежений проміжок часу, визначений угодами про рівень обслуговування (SLA). Для оцінки виконання цієї вимоги необхідно перевіряти, чи не перевищує середній або максимально допустимий час доступу до таких товарів встановленого ліміту. Якщо відповідні показники задовольняють задані SLA, вважається, що модель правильно враховує технічні та бізнес-вимоги. Якщо ж розрахунковий час суттєво перевищує встановлені обмеження, слід переглянути вагові коефіцієнти або формулювання цільової функції, щоб підсилити пріоритетність цих критичних позицій. Така перевірка гарантує, що модель придатна для складів, де вкрай важливо дотримуватися жорстких часових рамок для окремих товарів.

Такі способи перевірки – аналіз залишків, чутливості, порівняння з еталонними сценаріями чи застосування F-подібної статистики – дають змогу отримати впевненість, що модель “правильно” описує задачу.

Висновки

Таким чином, задача розміщення деталей на автоматизованому складі потребує багатокритеріального підходу, який одночасно враховує кілька ключових факторів. Запропонована багатокритеріальна математична модель із трьома основними складовими надає можливість визначати ступінь впливу кожного із часткових критеріїв шляхом зміни вагових коефіцієнтів. Використання метаевристичних алгоритмів, зокрема генетичних, дає змогу визначити оптимальне розміщення, уникати локальних мінімумів і забезпечувати налаштування під конкретні умови складу.

Перевірка адекватності моделі може здійснюватися через аналіз залишків (наявність умови “одна деталь – одна комірка”), аналіз чутливості (реакція на зміну вагових коефіцієнтів), евристичне застосування F-критерію, а також порівняння з еталонними сценаріями від експертів.

Подальші напрями досліджень передбачають: додавання нових обмежень, що розширить застосування в спеціалізованих галузях; глибшу інтеграцію з ERP/MES-системами для автоматичного врахування поточних потреб виробництва; комбі-

нування генетичних алгоритмів з іншими пошуковими методами, аби прискорити збіжність і підвищити якість рішень.

Загалом, багатокритеріальний підхід разом із сучасними метаевристичними методами є перспективним підходом до розв'язання складських задач великої розмірності.

Література

- [1] H. Wang, H. Wang, H. Dong, L. Xia, "Research on Location Optimization of Automated Warehouse Under the Background of Intelligent Manufacturing", *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 18, is. 1/2020, pp. 164-173, 2020.
- [2] M. Wasiak, I. Jacyna-Golda, M. Izdebski, "Multi-Criteria Warehouses Location Problem in the Logistics Network", in *International Conference on Industrial Logistics. Conference Proceedings*, Zakopane, Poland, 2016.
- [3] J. Rui, "Research on Optimization Method for Storage Allocation of Multi-aisle Warehouses", in *The 5th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM)*, 2024, pp. 646-650.
DOI: 10.1109/ICMTIM62047.2024.10629484.
- [4] Y. Wan, M. Yang, Y. Li, Y. Zhang, H. Kuang, "Multi-Objective Warehouse Storage Allocation Optimization Based on NSGA-II", in *Proc. SPIE 12254, International Conference on Electronic Information Technology (EIT 2022)*, 1225438, 2022.
DOI: 10.1117/12.2638573
- [5] M. E. Fontana, V. Nepomuceno, "Multi-Criteria Approach for Products Classification and Their Storage Location Assignment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017.
DOI: 10.1007/S00170-016-9040-3.
- [6] I. Jacyna-Golda, M. Izdebski, "The Multi-Criteria Decision Support in Choosing the Efficient Location of Warehouses in the Logistic Network", *Procedia Engineering*, vol. 187, pp. 635-640, 2017.
DOI: 10.1016/J.PROENG.2017.04.424.
- [7] M. Izdebski, I. Jacyna-Golda, M. Wasiak, R. Jachimowski, M. Kłodawski, D. Pyza, J. Zak, "The application of the genetic algorithm to multi-criteria warehouses location problems on the logistics network", *Transport*, vol. 33, no. 3, pp. 741–750, Sep. 2018., DOI: 10.3846/TRANSPORT.2018.5165.
- [8] H. Yilmaz, A. Tuncer, "Genetic Algorithm Based Storage and Retrieval System Optimization Considering Operational Constraints in a Multidimensional Warehouse", *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*. vol. 8, pp. 148-153, 2020.
DOI: 10.18100/ijamec.802125.
- [9] R. Koster, T. Le-Duc, K. Roodbergen, "Design and control of warehouse order picking: A literature review", *European Journal of Operational Research*, vol. 182, is. 2, pp. 481-501, 2007.
DOI: 10.1016/j.ejor.2006.07.009.
- [10] J. Gu, M. Goetschalckx, L. McGinnis, "Research on warehouse operation: A comprehensive review", *European Journal of Operational Research*, vol. 177, is.1, pp. 1-21, 2007. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.02.025.
- [11] Ryme Kabak, Thomas Koch, Elenna R. Dugundji, "An Optimization Approach to Minimize Material Movements in a Fully Automated Warehouse", in *The 15th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies Networks (ANT)*, Hasselt, Belgium, 2024, pp. 511–518. DOI: 10.1016/j.procs.2024.06.054
- [12] Masoud Mirzaei, *Advanced Storage and retrieval Policies in Automated Warehouses*, 2020. 166 p.
- [13] Q. Zu, M. Cao, F. Guo, and Y. Mu, "Slotting optimization of warehouse based on hybrid genetic algorithm," in *Proc. 6th Int. Conf. on Pervasive Computing and Applications (ICPCA 2011)*, 2011, pp. 19–21. DOI: 10.1109/ICPCA.2011.6106472
- [14] H. Li, J. Liu, P. Hu, and H. Zhou, "Solving the storage location assignment of large-scale automated warehouse based on dynamic vortex search algorithm," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 91, art. 101725, 2024. DOI: 10.1016/j.swevo.2024.101725
- [15] M. He, Z. Guan, C. Wang, and G. Hou, "Multiple-Rack Strategies Using Optimization of Location Assignment Based on MRCGA in Miniload Automated Storage and Retrieval System," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 950, 2023. DOI: 10.3390/pr11030950
- [16] H.-L. Lin and Y.-Y. Ma, "A new method of storage management based on ABC classification: a case study in Chinese supermarkets' distribution center," *SAGE Open*, vol. 11, no. 2, 2021.
DOI: 10.1177/21582440211023193
- [17] J. Liu, X. Liao, W. Zhao, and N. Yang, "A classification approach based on the outranking model for multiple criteria ABC analysis," *Omega*, vol. 61, pp. 19–34, 2016. DOI: 10.1016/j.omega.2015.07.004
- [18] H. M. Gámez Albán, T. Cornelissens, and K. Sörensen, "A new policy for scattered storage assignment to minimize picking travel distances," *European Journal of Operational Research*, vol. 315, is. 3, pp. 1006–1020, 2024.
DOI: 10.1016/j.ejor.2024.01.013
- [19] M. ten Hompel and T. Schmidt, *Warehouse Management: Automation and Organisation of Warehouse and Order Picking Systems*, Springer, 2007.
- [20] L. M. Tinelli, K. C. T. Vivaldini, and M. Becker, "Intelligent warehouse product position optimization by applying a multi-criteria tool," in *Proc. Int. Workshop on Robotics in Smart Manufacturing (WRSM 2013), Communications in Computer and Information Science*, vol. 371, pp. 137–145, 2013.
DOI: 10.1007/978-3-642-39223-8_13

UDC 519.8

S.A. Dmytrenko, K. S. Barandych*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine***MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF COMPONENT PLACEMENT IN AN AUTOMATED WAREHOUSE**

The problem of effectively placing components in an automated warehouse is key to enhancing the productivity of logistical processes and meeting modern requirements for order fulfillment speed in the context of Industry 4.0. Traditional storage approaches—including ABC analysis and single-objective optimization based on the popularity of components—often lead to an uneven distribution of the most demanded items across zones, excessive load on certain areas, and unjustified raising of heavy components to high racks. This reduces the system's flexibility in the face of demand changes and complicates maintaining the required service level (SLA).

The aim of the study was to develop a multi-criteria model for component placement that simultaneously minimizes the access time to items, balances the workload across different warehouse zones, and avoids placing heavy components on high-level racks. The proposed approach is based on taking into account three interrelated criteria—picking time, balance of component popularity among zones, and compliance with weight and dimensional constraints of storage cells—with the possibility of adjusting priorities through weighted coefficients.

To verify the model's adequacy, several validation methods were employed: residual analysis of the fulfillment of structural constraints, sensitivity analysis to changes in weighted coefficients, and comparison of the results with benchmark scenarios. The proposed validation procedure ensures that the solutions meet technical requirements, prevent violations of the storage cells' load capacity and volume, and guarantee a balanced load across automated zones.

The results obtained indicate the feasibility of using multi-criteria optimization as an alternative to traditional storage methods. This approach allows for flexible adaptation of component placement strategies in accordance with business priorities and current production constraints. The proposed model can be integrated into warehouse management information systems (ERP/MES) for automated planning and reconfiguration of item placement, thereby improving the accuracy of order picking, reducing operating costs, and enhancing the overall efficiency of automated warehouses.

Keywords: multi-criteria optimization, automated warehouse, metaheuristics, genetic algorithms, service level (SLA).

*Надійшла до редакції**19 березня 2025 року**Рецензовано**29 квітня 2025 року*

© 2025 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).