

- [4] Полушко М., Шевченко В. Автоматизована система контролю процесу обробки деталей. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 349(2), 332-337 С. 2025. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-48>
- [5] Оптика : навч. посіб. / Віктор Махній, Михайло Березовський, Оксана Кінзерська ; за наук. ред. проф. В. П. Махнія. - Чернівці : Друк Арт, 2018. 335 С.
- [6] Полушко М., Шевченко В. Автоматизована система контролю якості поверхні деталей. Молода наука - роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування. Збірник наукових праць. С. 269-271, 2025.

УДК 687.02

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА РОЗМІЩЕННЯ ВИРОБІВ НА АВТОМАТИЗОВАНИХ СКЛАДАХ

Дмитренко С.А., Барандич К.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: dmytrenko@gmail.com

Продуктивність автоматизованих складів критично залежить від оптимального розміщення виробів. Існуючі підходи зазвичай враховують лише один із можливих критеріїв: ABC-аналіз (групування за інтенсивністю попиту); XYZ-аналіз (оцінка варіативності/стабільності попиту); мінімізацію відстані та часу переміщень до зони відвантаження нехтуючи можливістю комплексного поліпшення роботи системи [1]. Тому розроблення математичної моделі розміщення виробів на автоматизованому складі декілька часткових критеріїв із застосуванням метаевристичних алгоритмів є актуальною задачею.

Метою роботи є підвищення продуктивності автоматизованого складу за рахунок оптимального розміщення виробів. Для досягнення цієї мети розроблено математичну модель розміщення виробів на автоматизованому складі, що складається з багатокритеріальної цільової функції та системи обмежень.

Щоб забезпечити максимальну продуктивність роботи складу, розроблено математичну модель розміщення виробів на автоматизованому складі. Розглядаємо задачу розміщення N деталей у M комірок як багатокритеріальну комбінаторну оптимізацію. Вводимо бінарні змінні

$$x_{ij} \begin{cases} 1, \text{ якщо деталь } i \text{ знаходиться в комірці } j \\ 0, \text{ інакше} \end{cases} \quad (1)$$

Частковими критеріями є:

1. Часу відбору виробів

Для кожного виробу i відома частота звернень $freq(i)$ та час доступу $T_{i,j}$ до комірки j . Мінімізація f_1 скорочує сумарний час видачі найпопулярніших виробів.

$$f_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \text{freq}(i) T_{i,j} x_{i,j} \quad (2)$$

2. Баланс навантаження між зонами

Склад поділено на K зон; кожна зона k містить підмножину комірок Z_k . Нехай μ_k – максимально допустима сума частот звернень у зоні k . Мінімізуючи f_2 ми уникаємо перевантаження окремих зон найпопулярнішими виробами.

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

3. Уникнення підйому важких виробів

Кожна деталь i має вагу $\text{weight}(i)$, а комірка j – коефіцієнт висоти $\text{height}(j)$. Мінімізація f_3 стимулює розташовувати важкі вироби ближче до підлоги.

$$f_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \text{weight}(i) \cdot \text{height}(j) \cdot x_{i,j} \quad (2)$$

Загальна багатокритеріальна цільова функція має вид:

$$F = \alpha f_1 + \beta f_2 + \gamma f_3 \quad (3)$$

де α, β, γ – вагові коефіцієнти за пріоритетами.

Визначення оптимального розміщення виробів на автоматизованому складі здійснюється із області допустимих рішень. При розв’язанні зазначеної задачі ця область задається множиною обмежень:

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

$$\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1, \forall i = 1, \dots, N \quad (4)$$

2. Якщо в комірці може знаходитись тільки 1 виріб, маємо:

$$\sum_{i=1}^N x_{i,j} \leq 1, \forall j = 1, \dots, M \quad (5)$$

3. Вага не перевищує граничну

$$\sum_{i=1}^N [\text{weight}(i) \cdot x_{i,j}] \leq \text{capWeight}(j), \forall j = 1, \dots, M \quad (6)$$

4. Обсяг (габарити) не перевищує місткість

$$\sum_{i=1}^N [\text{volume}(i) \cdot x_{i,j}] \leq \text{capVolume}(j), \forall j = 1, \dots, M \quad (7)$$

Для розв’язання задачі оптимізації розміщення деталей на автоматизованому складі застосовано три метаевристики: генетичний алгоритм (GA), метод рою часток (PSO) та імітацію відпалу (SA). Кожен з них має ключові гіперпараметри — розмір популяції (кількість частинок), ймовірності кросоверу й мутації (GA), когнітивні/соціальні коефіцієнти та вагу інерції

(PSO), початкову/кінцеву температури й темп охолодження (SA). Правильне налаштування гарантує баланс між глобальним пошуком і локальною оптимізацією, уникненням передчасної збіжності та дотриманням обмежень за вагою, об'ємом, часом доступу і балансом навантаження зон [2].

Методика тестування метаевристичних алгоритмів базується на п'яти синтетичних сценаріях із аналітично відомими оптимумами:

1. Базова перевірка коректності обмежень.
2. Мінімізація сукупного часу відбору.
3. Баланс завантаження зон.
4. Зменшення підйому важких виробів.
5. Повноцінна багатокритеріальна задача з конфліктними вимогами.

Для кожного алгоритму підібрано збалансовані налаштування (генетичний алгоритм: стартова популяція – 200, кросовер – 0.85, мутація – 0.15; метод рою часток: стартова кількість частинок – 200,).

Результати оцінювалися за двома метриками: точність розміщення та середнє значення цільової функції. GA і PSO показали стабільно високу точність (98-100 %) та досягли найнижчих значень цільової функції в усіх сценаріях. SA виявив більшу варіативність: він добре справлявся з простими завданнями, але у випадку вирішення багатокритеріальної задачі продемонстрував нижчу точність (рис. 1).

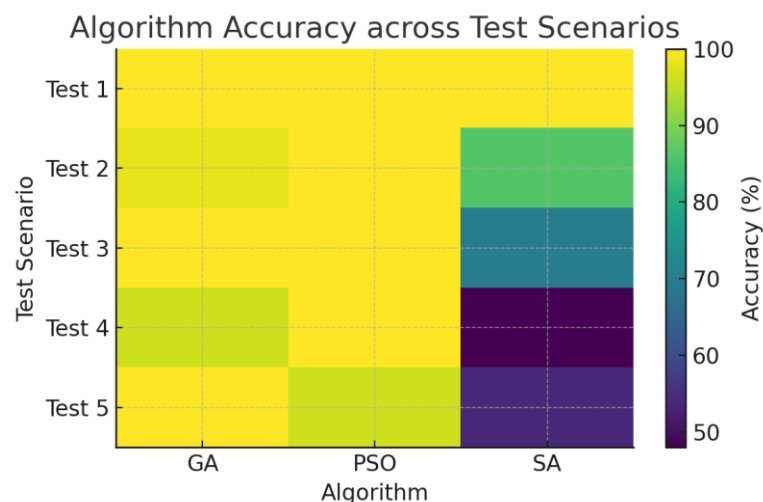


Рис. 1. Точність використаних алгоритмів

Складнощі порівняння метаевристик полягають у їхній чутливості до гіперпараметрів, різних стратегіях пошуку (популяційний та локальний) та відсутності єдиної метрики, що одночасно враховувала б якість рішення, швидкість збіжності й дотримання обмежень [3]. Для об'єктивного аналізу необхідний уніфікований підбір параметрів і єдиний ресурсний бюджет (обсяг оперативної пам'яті, кількість ітерацій тощо) [4].

На основі описаних вище алгоритмів розроблено програмний модуль, який інтегрується в WMS та приймає дані (опис комірок, виробы, запити) через HTTP/AMQP протоколи або імпорт CSV файлів. На виході він формує звіт

(CSV/JSON) або передає готовий план через AMQP, автоматично спрямовуючи рекомендації в модуль пересортування чи AGV-системи та мінімізуючи участь оператора. [5].

У FlexSim створено модель складу за результатами багатокритеріальної оптимізації (матриця часу доступу, частоти запитів, габарити та вага). Синтетичний потік запитів і лічильники (середній час обслуговування, завантаженість платформ, пересування вантажів) дозволили оцінити вплив розміщень GA, PSO та SA на пропускну здатність і ефективність конвеєрної системи.

Запропонований математичний підхід і розроблений модуль можуть гнучко інтегруватися з існуючими WMS-системами та автоматизованими транспортними засобами, що робить його придатним для впровадження на виробництві. Подальші дослідження доцільно зосередити на адаптивному налаштуванні вагових коефіцієнтів у реальному часі та масштабуванні моделі під змінні логістичні умови.

Ключові слова: склад, оптимізація, розміщення деталей, метаевристичні алгоритми, виробництво, управління складом, автоматизація.

Література

- [1] 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
- [2] 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
- [3] Izdebski M., Jacyna-Golda I., Wasiak M., Jachimowski R., Kłodawski M., Pyza D., Zak J. The Application of the Genetic Algorithm to Multi-Criteria Warehouses Location Problems on the Logistics Network, *Transport*. – 2018. DOI: 10.3846/TRANSPORT.2018.5165.
- [4] Wang H., Wang H., Dong H., Xia L. Research on Location Optimization of Automated Warehouse Under the Background of Intelligent Manufacturing, *Conference Paper*. – 2020.
- [5] Tubis A.A., Rohman J. Intelligent Warehouse in Industry 4.0—Systematic Literature Review. *Sensors*. 2023; 23(8): 4105. DOI: 10.3390/s23084105.

УДК 681.5

ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ЗАСОБАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ НА ПРИКЛАДІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПАКУВАННЯ ТАРИ

Полухін Д.І., Базіло К.В.

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

E-mail: d.i.polukhin.asp24@chdtu.edu.ua

Анотація. Проаналізовано взаємодію робота маніпулятора з рухомим об’єктом в системах автоматизації безперервних технологічних процесів. Визначено вхідні і вихідні параметри системи для побудови регресійної моделі виявлення прихованих закономірностей між вхідними параметрами та якісними