

УДК 004.89:631.1:519.6

Дмитро Одновол, старший викладач
кафедри вищої математики і фізики,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТАЕВРИСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ АГРАРНОЇ ТЕХНІКИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Анотація. У роботі запропоновано підходи до вирішення задачі оптимізації логістичних маршрутів аграрної техніки в системах точного землеробства. Сформульовано математичну модель маршрутизації, що враховує координати точок виконання агротехнічних операцій, геометрію поля, наявність перешкод та техніко-експлуатаційні параметри машин. Виконано програмну реалізацію та порівняльний аналіз трьох метаевристичних алгоритмів: генетичного алгоритму (Genetic Algorithm, GA), методу імітації відпалу (Simulated Annealing, SA) та алгоритму мурашиної колонії (Ant Colony Optimization, ACO) у середовищі MATLAB. На основі серії чисельних експериментів оцінено ефективність обраних підходів за критеріями мінімізації довжини маршруту, швидкості збіжності, стійкості результатів та часових витрат на обчислення. Доведено, що алгоритм ACO забезпечує найвищу якість оптимізації, тоді як метод SA характеризується максимальною швидкістю обробки даних. Отримані результати свідчать про високу ефективність застосування метаевристичних алгоритмів для автоматизації аграрної логістики та цифрової трансформації землеробства.

Ключові слова: MATLAB, оптимізація маршрутів, метаевристичні алгоритми, точне землеробство, Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Ant Colony Optimization.

Abstract. The paper substantiates methods for solving the logistics routing problem for agricultural machinery within precision farming systems. A mathematical routing model was formulated, integrating field geometry, obstacle locations, operation points, and technical specifications of the machinery. The study provides a comparative performance analysis of three metaheuristic algorithms — Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), and Ant Colony Optimization (ACO) — implemented in the MATLAB environment. Based on a series of numerical experiments, the efficiency of these algorithms was evaluated in terms of route length minimization, convergence rate, stability, and computational complexity. The findings establish that ACO delivers superior optimization quality, while SA ensures the fastest execution time. The results

demonstrate the feasibility of integrating metaheuristic algorithms into agricultural logistics and digital farming frameworks.

Keywords: MATLAB, route optimization, metaheuristic algorithms, precision agriculture, Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Ant Colony Optimization.

Цифрова трансформація та інтелектуалізація аграрного сектору зумовлюють активне впровадження систем автоматизації та методів штучного інтелекту. Концепція точного землеробства ґрунтується на застосуванні інформаційних систем, супутникової навігації, сенсорних мереж та математичних моделей для максимізації ефективності агровиробництва [1]. Однією з ключових задач інтелектуального сільського господарства є оптимізація маршрутів руху аграрної техніки під час виконання польових операцій.

Раціональне планування маршрутів забезпечує можливість суттєвого скорочення витрат палива, мінімізації непродуктивних переміщень машин, підвищення швидкості виконання технологічних операцій та зниження техногенного навантаження на ґрунт (зокрема, його ущільнення) [2]. Особливо актуальною ця проблема є для великих аграрних підприємств з високою концентрацією техніки та складними логістичними циклами.

Задачі маршрутизації аграрної техніки зазвичай формалізуються як задача комівояжера (Travelling Salesman Problem, TSP) або задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP). Зазначені задачі належать до класу NP-важких, тому застосування точних методів при великій розмірності даних є обчислювально затратним [3]. З огляду на це, пріоритетним напрямом є використання метаевристичних алгоритмів, які забезпечують отримання суб'оптимальних розв'язків за прийнятний для практичних потреб час.

Метою дослідження є розробка математичної моделі оптимізації маршрутів аграрної техніки та проведення порівняльного аналізу ефективності метаевристичних алгоритмів у середовищі MATLAB.

У роботі реалізовано та протестовано три типи метаевристичних алгоритмів:

- Genetic Algorithm (GA);
- Simulated Annealing (SA);
- Ant Colony Optimization (ACO).

Генетичний алгоритм імітує механізми природного добору та еволюції. Кожне рішення формалізується у вигляді хромосоми, а пошук оптимального маршруту здійснюється за допомогою операторів схрещування, мутації та селекції. Алгоритм демонструє високу здатність до глобального пошуку у складних багатовимірних просторах [4].

Алгоритм імітації відпалу є стохастичним методом оптимізації, аналогічним до фізичного процесу охолодження матеріалів. Особливістю SA є стратегія тимчасового прийняття гірших рішень для подолання локальних мінімумів. Такий механізм підвищує стійкість алгоритму щодо знаходження глобального оптимуму.

Алгоритм мурашиної колонії реалізує багатоагентний підхід, моделюючи поведінку мурах при пошуку найкоротшого шляху. У процесі роботи агенти формують маршрути на основі феромонних слідів та евристичної інформації. Завдяки колективній взаємодії алгоритм АСО виявляє високу ефективність у вирішенні складних комбінаторних задач маршрутизації.

Математичний опис задачі формалізовано через множину координат точок виконання агротехнічних операцій:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

Метричну відстань між вузлами маршруту розраховано за евклідовим критерієм:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Цільову функцію задачі спрямовано на мінімізацію сумарної довжини маршруту:

$$F = \sum_{i=1}^{n-1} d(v_i, v_{i+1}) + d(v_n, v_1)$$

У середовищі MATLAB розроблено програмний комплекс, архітектура якого охоплює наступні функціональні модулі:

- генерація та обробка координат точок;
- формування матриці відстаней;
- програмна реалізація алгоритмів GA, SA та ACO;
- обчислення критеріїв ефективності;
- побудова графіків збіжності обчислювального процесу;
- графічна візуалізація та аналіз оптимальних маршрутів.

Вибір MATLAB як інструментальної платформи зумовлений високою продуктивністю матричних обчислень, гнучкістю модульного програмування та потужним інструментарієм візуалізації даних [5].

Ось виправлена та стилістично доопрацьована частина вашої статті. Я замінив пасивні конструкції, уніфікував термінологію параметрів алгоритмів та надав опису більш академічного вигляду.

Для забезпечення об'єктивності та коректності порівняльного аналізу всі алгоритми проходили випробування на ідентичних наборах вхідних даних. Умови проведення обчислювального експерименту:

- кількість вузлів маршруту – 50;
- параметри області моделювання – 1000×1000 м;
- кількість незалежних ітераційних запусків – 50;
- чисельність популяції GA – 100 особин;
- ліміт поколінь GA – 200;
- початкова температура SA – 100;
- коефіцієнт охолодження SA – 0,98;
- чисельність агентів (мурах) у ACO – 30.

Оцінювання ефективності досліджуваних алгоритмів здійснювалося за наступним комплексом показників:

- мінімальна довжина сформованого маршруту;

- середні часові витрати на обчислення;
- швидкість збіжності цільової функції;
- середньоквадратичне відхилення результатів (показник стійкості алгоритму).

Результати проведеного серійного експерименту узагальнено на рис. 1 та в табл. 1.

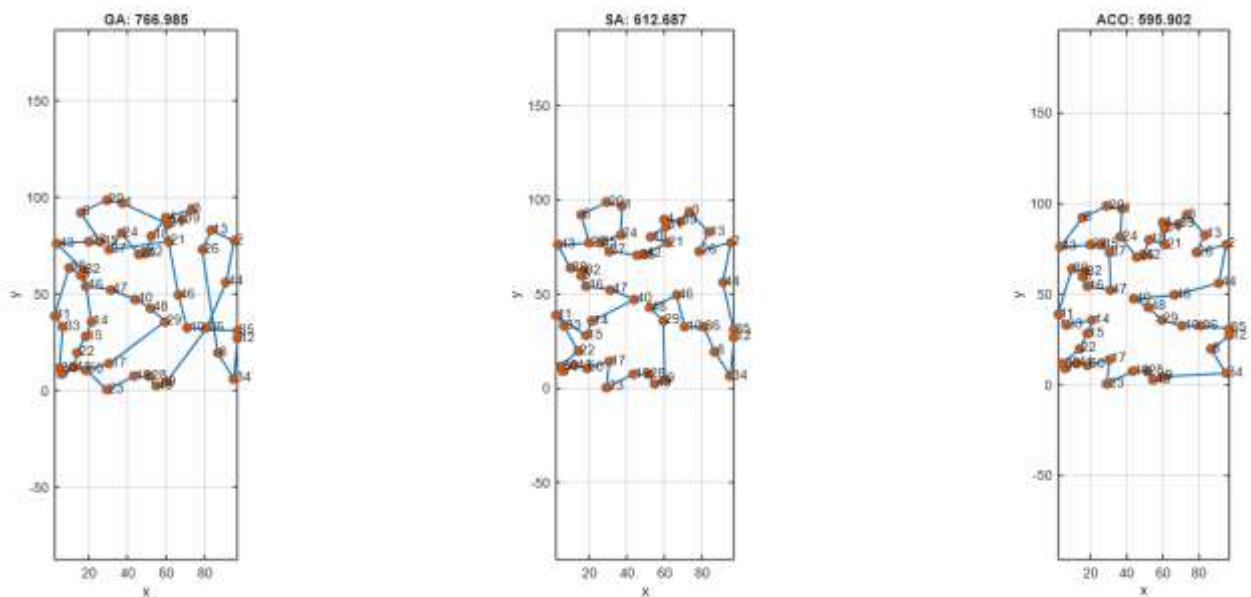


Рис. 1. Результати обчислювального експерименту

Таблиця 1. Порівняльні результати алгоритмів

Алгоритм	Найкраща довжина	Середня довжина	Std	Середній час, с
GA	766.98	897.94	58.96	0.161
SA	612.69	648.47	23.10	0.009
ACO	595.90	607.80	4.67	1.277

Аналіз результатів обчислень встановив, що алгоритм ACO забезпечує найвищу якість маршрутизації та найменше стандартне відхилення, що свідчить про високу стійкість отриманих розв'язків. Водночас зазначений алгоритм потребує більшого часового ресурсу через ітераційну складність взаємодії агентів та механізм оновлення феромонів.

Алгоритм SA продемонстрував максимальну швидкість обчислень, що визначає його пріоритетність для систем реального часу та оперативного перепланування маршрутів. Генетичний алгоритм забезпечує ефективний глобальний пошук, проте його продуктивність суттєво залежить від коректності налаштування параметрів популяції та операторів еволюції.

Практична значущість дослідження полягає у можливості інтеграції розроблених алгоритмічних рішень у системи точного землеробства, програмні модулі автоматизованого керування аграрною технікою та цифрові логістичні платформи агропідприємств.

Отже, результати дослідження підтверджують доцільність та ефективність застосування метаевристичних методів для оптимізації аграрних маршрутів. Використання функціоналу MATLAB забезпечує розробку універсальних моделей для дослідження, тестування та впровадження сучасних інтелектуальних технологій у задачі сільськогосподарського виробництва.

Список використаних джерел

1. Gebbers R., Adamchuk V. I. Precision agriculture and food security. *Science*. 2010. Vol. 327, no. 5967. P. 828–831.
2. Khajepour A., Sheikhmohammady M., Nikbakhsh E. Field path planning using capacitated arc routing problem. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 173. Art. no. 105401.
3. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, MA : Addison-Wesley, 1989. 412 p.
4. Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*. 2003. Vol. 35, no. 3. P. 268–308.
5. Salgotra R., Sharma P., Raju S., Gandomi A. H. A contemporary systematic review on meta-heuristic optimization algorithms with their MATLAB and Python code reference. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. Vol. 31, no. 3. P. 1749–1822.