

Я. А. Кулик¹
Б. П. Книш¹
М. В. Барабан¹

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

В роботі розглянуто проблеми переміщення значної кількості однотипних вантажів, розміщених на певній території, для групування їх у єдиному місці (складі). До них варто віднести недосконалість інфраструктури, незадовільний стан транспортного обслуговування та зношеність рухомого складу, низька якість транспортних шляхів, їх перевантаженість, віддаленість точок прийому та видачі, погана організація процесу переміщення, непрогнозовані витрати тощо. Для вирішення цих проблем запропоновано використання групи безпілотних літальних апаратів та розв'язання задачі ефективного управління їх рухом, шляхом використання алгоритму стохастичної оптимізації, а саме мурашиного алгоритму ANTS.

Запропоновано вдосконалений метод мурашиного алгоритму ANTS, який використовує функцію зміни інтенсивності цифрового феромону, та, на відміну від існуючих алгоритмів, використовує не лінійне, а кубічне динамічне масштабування зміни цифрового феромону, що дозволяє зосереджуватись на пошуку не лише виключно найкоротших маршрутів, але й враховувати нові.

Проведено експериментальні дослідження з переміщення вантажів за різної кількості безпілотних літальних апаратів шляхом моделювання в середовищі WeBots, використовуючи тестові безпілотні літальні апарати Mavic 2 Pro для переміщення однотипних вантажів масою 150 грамів до єдиного центру (складу). На їхній основі проведено оцінювання ефективності переміщення вантажів, тобто встановлено залежність кількості переміщених вантажів за час виконання переміщення. Встановлено, що ефективність цього процесу збільшується зі збільшенням кількості безпілотних літальних апаратів, оскільки зменшується час виконання переміщення. Також встановлено, що з кожним подальшим збільшенням кількості безпілотних літальних апаратів приріст ефективності стає меншим через очікування в черзі на вивантаження.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, кількість переміщених вантажів, цифровий феромон, мурашиний алгоритм, переміщення вантажів.

Вступ

Логістика, як господарський процес, і як функція управління, передбачає єдину систему переміщення матеріальних, інформаційних і фінансових товарів та послуг. Її невід'ємною складовою є транспорт, який органічно вписується у виробничі й торгові процеси, адже дозволяє здійснювати перевезення людей та переміщення вантажів [1].

Основні проблеми, які виникають в процесі організації переміщення вантажів, полягають у недосконалості інфраструктури, незадовільному стані транспортного обслуговування та зношеності рухомого складу, низькій якості транспортних шляхів, їх перевантаженості, віддаленості точок прийому та видачі, поганій організації процесу переміщення, непрогнозованих витратах тощо [2], [3]. Одним зі способів вирішення вищенаведених проблем є використання як транспорту для переміщення вантажів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та розв'язання задач ефективного управління їхнім рухом [4]. Для цього існують математичні моделі систем переміщення вантажів [5], але вони недостатньо ефективні у разі переміщення значної кількості територіально розподілених однотипних вантажів до єдиного місця (складу) за допомогою групи БПЛА. Для такого роду задач можна використовувати алгоритми стохастичної оптимізації, такі як генетичний алгоритм (GA), диференційна еволюція (DE), оптимізація роєм частинок (PSO), оптимізація колонії мурах

(АСО). Зокрема алгоритм оптимізації колонії мурах або мурашиний алгоритм є оптимальним, оскільки він підходить для нелінійного та динамічного середовища, має високу надійність та гнучкість, хороші можливості для позитивного зворотного зв'язку [6] і його можна легко реалізувати для групи БПЛА [7], [8]. Проте мурашині алгоритми потребують вдосконалення, оскільки мають низьку збіжність та довгий час знаходження шляху [9], [10].

Останніми роками з'явилося багато наукових праць, в яких розв'язуються задачі з переміщення вантажів за допомогою вдосконалених мурашиних алгоритмів [11], серед яких можна виділити *max-min* алгоритм (MMAS) [12], оптимізацію мурашиної колонії з елітними мурахами (EASO) [13], [14], евристики та метаевристики, ANTS алгоритм тощо [7], [8], [15].

У алгоритмі оптимізації мурашиної колонії з елітними мурахами через значний вплив позитивного зворотного зв'язку може не лише прискорюватись знаходження оптимального шляху руху БПЛА, а й накопичуватись помилка та підсилюватись зосередження на локальному оптимальному рішенні [12]. Алгоритм *max-min* використовує для підсилення феромону лише найкращу мурашу в глобальному масштабі або найкращу за ітерацією, що покращує продуктивність. Однак цей підхід знаходження оптимального шляху руху БПЛА може швидко призвести до неоптимального рішення. Якщо після низки послідовних ітерацій не досягається покращення результату, тоді виконується переініціалізація феромонів, що може як допомогти знайти нові кращі рішення, так значно зменшити оптимальність поточного рішення [13], [14]. Поєднання мурашиних та генетичних алгоритмів, а також нейронних мереж, є досить часозатратним [16], знижує швидкість роботи та вимагає у БПЛА значних обчислювальних ресурсів, що суттєво підвищує його вартість. На відміну від мурашиних алгоритмів, методи евристики та метаевристики знаходять майже оптимальне рішення для задач великого розміру [17]. Деякі методи власної метаевристики мурашиних алгоритмів [18] дозволяють оптимізувати рух БПЛА в 3D-просторі з перешкодами, проте цей метод є надлишковим за кількістю обчислювальних параметрів.

Порівняно з вищенаведеними алгоритмами ANTS алгоритм є найперспективнішим, оскільки він має вищу точність, але при цьому не набагато меншу швидкодію та може використовуватись для задач різного розміру [19]. Гнучкість при оптимізації алгоритму ANTS краще підходить для змінних умов виконання задачі знаходження оптимального шляху руху БПЛА. Використання алгоритму ANTS також дозволяє отримувати дещо меншу складність обчислень порівняно з іншими методами евристики.

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є використання саме алгоритму ANTS для розв'язання задач переміщення вантажів за допомогою групи БПЛА.

Ефективність переміщення вантажів визначається багатьма чинниками, зокрема часом виконання переміщення, вартістю логістики, впливом на довкілля, надійністю тощо. В роботі розглядається саме час виконання переміщення, оскільки його можна зменшити без додаткових витрат та відповідно зміни апаратної частини. Простій БПЛА призводить до збільшення часу виконання переміщення через очікування в черзі на вивантаження на складі, що призводить до збільшення витрат пального або електроенергії акумуляторів. Збільшення кількості БПЛА може зменшити час переміщення вантажів, але може збільшити час очікування в черзі на вивантаження.

Тому *метою роботи* є підвищення ефективності переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

1. Вдосконалити мурашиний алгоритм згідно з особливостями переміщення вантажів за допомогою групи БПЛА.
2. Розробити віртуальний світ у середовищі симулятора польотів, що дозволяє зосередитись на механізмі координації переміщення вантажів за допомогою групи БПЛА.
3. Провести серію експериментів у середовищі симулятора польотів та встановити залежність кількості переміщених вантажів від часу виконання переміщення.
4. Оцінити ефективність процесу переміщення вантажів за допомогою групи БПЛА.

Удосконалений мурашиний алгоритм ANTS для переміщення вантажів за допомогою групи БПЛА

Для реалізації мурашиного алгоритму для групи БПЛА створюється феромонна карта. БПЛА вивільняє цифровий феромон, який діє як привабливий потенціал для сусідніх БПЛА протягом обмеженого часу, встановленого цифровим коефіцієнтом випаровування. Коли БПЛА знаходиться

над віртуальною клітинкою феромонної карти, він зчитує значення цифрового феромону за допомогою віртуального датчика в певному просторовому діапазоні. Відкладення та використання цифрового феромону виконується миттєво, утворюючи певну просторову форму (усічений конус), градієнт якої діє як привабливий потенціал для наступного БПЛА [15].

Безпосередній вибір наступної точки польоту здійснюється з використанням «колеса рулетки». Тобто вибір точки польоту рівнозначний вибору числа з інтервалу $[a;b] = [0,100]$, де a та b позначають початок і кінець фрагмента кола, який відповідає сектору кола рулетки. Якщо БПЛА ще не закінчив маршрут, тобто не відвідав всі вершини графа феромонної карти, то ймовірність переходу з вершини i у вершину j за списком точок польоту M визначається за допомогою ймовірнісного рівняння. В алгоритмі ANTS використовується модифіковане «псевдовипадкове-пропорційне» правило переходу [20]—[22]:

$$j = \begin{cases} \arg \max_{j \in M} \{ \eta_{i,j} \tau_{i,j} \}, & rand \leq r_0, \\ J, & rand > r_0, \end{cases}$$

де $rand$ — незалежне дійсне випадкове число, рівномірно розподілене на інтервалі $[0;1]$; $r_0 = [0;1]$ — деяке число задане оператором БПЛА; τ_{ij} — рівень цифрового феромону для ребра (i, j) ; η_{ij} — видимість для ребра (i, j) ; J — точка польоту, знайдена за використання ймовірнісного переходу по колесу рулетки [23]

$$p = \begin{cases} \frac{\alpha \tau_{i,j} + (1-\alpha) \eta_{i,j}}{\sum_{j=1}^{length(M)} (\alpha \tau_{i,j} + (1-\alpha) \eta_{i,j})} \cdot 100\%, & j \in M, \\ 0\%, & j \notin M, \end{cases}$$

де α — коефіцієнт інтенсивності цифрового феромону.

Цей варіант, порівняно з моделлю оптимізації мурашиної колонії [23], не потребує використання коефіцієнта видимості β . Крім того, слід зазначити, що БПЛА переміщується тільки невідвіданими точками графа. Параметр r_0 використовується для регулювання балансу між пошуком хороших рішень та нових: якщо $rand \leq r_0$, то алгоритм вибирає найкращий шлях, а коли $rand > r_0$, то алгоритм розширює простір пошуку.

Для кожного з маршрутів розраховується його загальна довжина (цільова функція $f(x_k)$). Для її пошуку варто зосереджуватись не лише виключно на найкоротших маршрутах, але й враховувати нові. Пошук виключно найкоротших маршрутів часто призводить до швидких результатів, але вони зазвичай виявляються субоптимальними. Пошук усіх маршрутів також може призводити до оптимальних рішень, але займає значно більше часу. Тому потрібно виконати пошук так, щоб враховувались усі маршрути, при цьому коротшим маршрутам надавався б вищий пріоритет.

Пошук маршруту БПЛА здійснюється з використанням «колеса рулетки» залежно від кількості цифрового феромону на ребрах між вершинами графа. Після завершення маршруту БПЛА залишає деяку кількість цифрового феромону на ребрах, тобто концентрація цифрового феромону ко-регується [20]

$$\Delta \tau_{ij,k} = \begin{cases} \tau_0 \left(1 - \frac{f_t(x_k) - \varepsilon}{\bar{f} - \varepsilon} \right), & (i, j) \in x_k, \\ 0, & (i, j) \notin x_k, \end{cases}$$

де τ_0 — початковий рівень цифрового феромону на ребрі (i, j) ; x_k — послідовність вершин, пройдених k -м БПЛА на t -й ітерації; ε — мінімальна бажана довжина шляху, яку знаходять довільним чином, наприклад, за допомогою жадібного алгоритму; \bar{f} — середнє значення останніх глобально найкращих рішень $f^{gb}(x_k)$ за l ітерацій

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^l f_i^{gb}(x_k) / l,$$

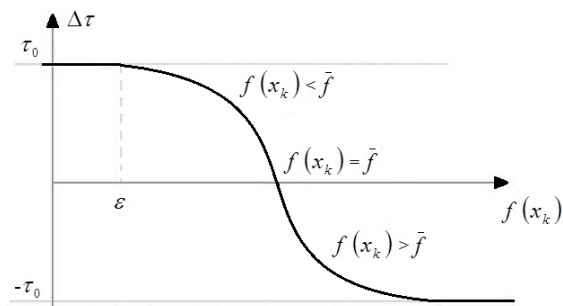


Рис. 1. Лінійне динамічне масштабування цифрового феромону

де $f^{gb}(x_k) = x_k^3$.

Графік залежності концентрації цифрового феромону від загальної довжини маршруту показаний на рис. 1.

Як видно з рисунку, використання процедури кубічного динамічного масштабування зміни цифрового феромону дозволяє зосереджуватись з більшим пріоритетом на хороших рішеннях, враховуючи пошук нових. Це дозволить в цілому підвищити ефективність пошуку короткого маршруту та уникнути його субоптимальності.

Найвища імовірність руху БПЛА буде спостерігатися по найінтенсивнішим феромонним доріжкам, що визначає короткий маршрут від місця вантажу до складу. Це, зокрема, зменшує час переміщення вантажу, а також сумарний час переміщення вантажу, причому вантаж для спрощення береться однотипним, тобто однакої маси та розміру, а вплив його маси на характеристики БПЛА вважається несуттєвим.

Таким чином, БПЛА здійснює рух в напрямі з урахуванням місць з найвищою інтенсивністю цифрових феромонів. Коли їх концентрація стає високою, для забезпечення ефективного руху БПЛА назад задається коефіцієнт нюхового звикання, тобто час, після якого БПЛА тимчасово не може сприймати цифрові феромони. Вони можуть накопичуватися на феромонних доріжках, які з часом випаровуються, тобто їх інтенсивність лінійно зменшується на задану величину випаровування. Якщо швидкість випаровування дорівнює 1 або радіус просторової форми цифрового феромону дорівнює 0, то це буде означати відсутність впливу феромону взагалі [24], [25].

Моделювання переміщення вантажів за допомогою групи БПЛА в середовищі WeBots

Моделювання переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА проводилося в середовищі WeBots. Це середовище не є симулятором польоту, тобто не зосереджується на логіці керування самого БПЛА та на реакції на зовнішні фактори (турбулентність, вітер, хмарність, опади, повітряні потоки тощо). WeBots є симулятором пристроїв, що дозволяє зосередитись на механізмі координації, вважаючи вплив зовнішніх факторів несуттєвим, оскільки вони вважаються як керовані. Під час моделювання для уніфікації досліджень використовуються нормальні погодні умови з мінімальними змінами.

Для експериментальної перевірки ефективності переміщення вантажів на основі вдосконаленого мурашиного алгоритму ANTS за допомогою групи БПЛА проведено моделювання такої системи у середовищі WeBots. Створено середовище у вигляді віртуального світу (рис. 2), вплив якого на характеристики БПЛА незначний.



Рис. 2. Віртуальний світ, створений в середовищі WeBots, для експериментальної перевірки ефективності переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА

Як модель БПЛА вибрано Mavic 2 Pro, оскільки він має підсистему уникнення зіткнень з іншими об'єктами, яка виконує зупинку та необхідне маневрування у разі занадто близького наближення до об'єкта, який виявляють датчики. Також ця модель має хорошу камеру, що допомагає відлагодженню системи та дозволить у майбутньому тестувати систему з використанням розпізна-

вання образів. У віртуальному світі на деякій території розміщені умовні однотипні вантажі вагою 150 грам (оскільки вантажопідйомність Mavic 2 Pro складає 200 грам), склад, тобто невелика компактна територія для кінцевого переміщення всіх вантажів (квадратна металева основа, яка легко розпізнається БПЛА за допомогою машинного зору) та 5...20 БПЛА, які виконують переміщення територіально розподілених вантажів на склад.

Середовище WeBots дозволяє в створеному віртуальному світі запускати програму переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА (рис. 3).

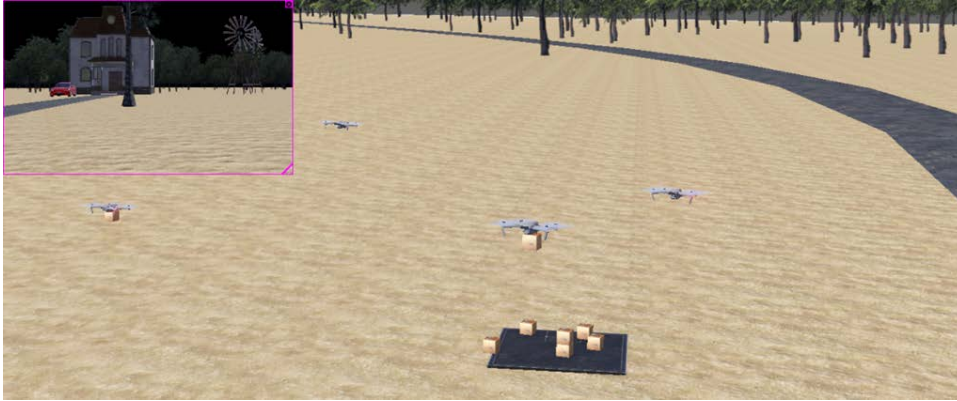


Рис. 3. Процес переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА в середовищі WeBots на склад (квадратна площадка)

Також можна проводити оцінку ефективності цього процесу, тобто встановити залежність кількості переміщених вантажів за час виконання переміщення. Оцінка ефективності відбувається без матеріальних затрат, процес проходить значно швидше та в значно більших кількостях, не маючи фізичних обмежень у реальному середовищі.

Результати моделювання показано на рис. 4, а саме залежності кількості переміщених вантажів за час виконання переміщення для 5 (рис. 4а), 10 (рис. 4б), 15 (рис. 4в) та 20 БПЛА (рис. 4г).

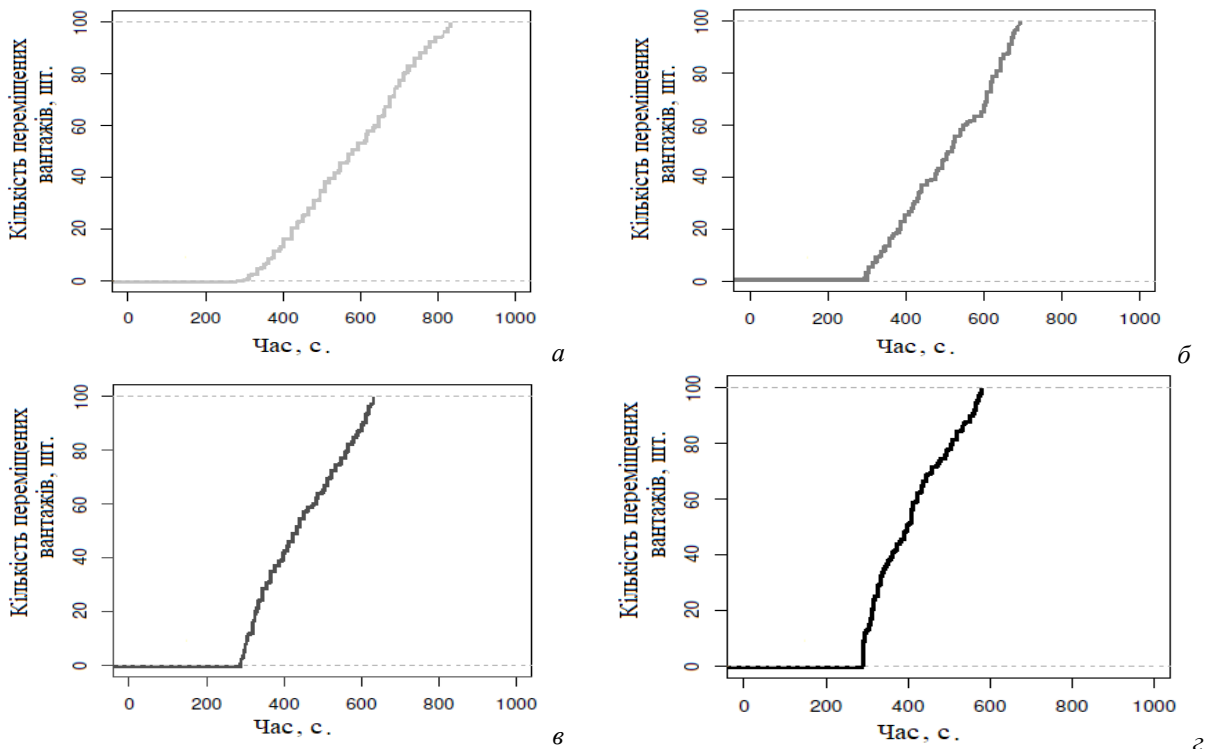


Рис. 4. Залежність кількості переміщених вантажів за час виконання переміщення для: а — 5 БПЛА; б — 10 БПЛА; в — 15 БПЛА; г — 20 БПЛА

Моделювання показує, що існує деякий початковий час, необхідний для виконання певних дій (відправлення за першими вантажами), після чого на складі почнуть з'являтися вантажі. Зі збільшенням кількості БПЛА залежність кількості переміщених вантажів за час виконання переміщення

стає рівномірнішою та все більше відповідає параметрам системи масового обслуговування.

На рис. 4 помітно скорочення часу виконання переміщення зі збільшенням кількості БПЛА. Для п'яти БПЛА він складає 550 с, для десяти БПЛА — 440 с, для п'ятнадцяти БПЛА — 400 с, для двадцяти БПЛА — 350 с. Варто зазначити, що це скорочення не пропорційне зміні кількості БПЛА, оскільки зі збільшенням кількості БПЛА вони можуть заважати один одному через сповільнення та маневрування для уникнення зіткнення. Водночас зі зростанням кількості БПЛА загальна кількість необхідних рейсів за вантажами залишається незмінною, оскільки вони лише розподіляються між різними БПЛА.

Таким чином, ефективність переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА збільшується зі збільшенням кількості БПЛА, оскільки зменшується час виконання переміщення, але з кожним подальшим збільшенням кількості БПЛА приріст ефективності стає все меншим через очікування в черзі на вивантаження.

Висновки

В роботі розглянуто проблеми переміщення значної кількості однотипних вантажів, розміщених на певній території, для групування їх у єдиному місці. Для вирішення цих проблем запропоновано використання групи БПЛА та розв'язання задачі ефективного управління їх рухом, шляхом використання алгоритму стохастичної оптимізації, а саме мурашиного алгоритму ANTS.

Запропоновано вдосконалений метод мурашиного алгоритму ANTS, який використовує функцію зміни інтенсивності цифрового феромону, та, на відміну від існуючих, використовує не лінійне, а кубічне динамічне масштабування зміни цифрового феромону.

Проведено експериментальні дослідження переміщення вантажів за різної кількості БПЛА шляхом моделювання в середовищі WeBots. Встановлено, що ефективність переміщення вантажів на основі мурашиного алгоритму за допомогою групи БПЛА збільшується зі збільшенням кількості БПЛА, оскільки зменшується час виконання переміщення. Для п'яти БПЛА він складає 550 с, для десяти БПЛА — 440 с, для п'ятнадцяти БПЛА — 400 с, для двадцяти БПЛА — 350 с. Водночас з кожним подальшим збільшенням кількості БПЛА приріст ефективності стає все меншим через очікування в черзі на вивантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. І. Перебийніс, і О. В. Перебийніс, *Транспортно-логістичні системи підприємств: формування та функціонування*. Полтава, Україна: ПВВ ПУСКУ, 2005, 207 с.
- [2] Xin-She Yang, Slawomir Koziel, and Leifur Leifsson, "Computational optimization, modeling and simulation: Past, present and future," in *International Conference on Computational Science*, 2014, no. 29, pp. 754-758.
- [3] Xueping Zhu, Zhengchun Liu, and Jun Yang, "Model of Collaborative UAV Swarm Toward Coordination and Control Mechanisms Study," in *International Conference On Computational Science*, 2015, vol. 51, pp. 493-502.
- [4] Б. П. Книш, Я. А. Кулик, і М. В. Барабан, «Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів,» *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 246-252, 2018.
- [5] О. Б. В'юненко, і Л. П. Воронець, *Дослідження операцій. Системи масового обслуговування*. Суми, Україна: СНАУ, 2008, 370 с.
- [6] H. Wang, and W. Chen, "Multi-Robot Path Planning with Due Times," *IEEE Robot*, vol. 7, pp. 4829-4836, 2022.
- [7] T. Cimino, I. Tanev, and K. Shimohara, "Superadditive effect of multirobot coordination in the exploration of unknown environments via stigmergy," *Neurocomputing*, vol. 148, pp. 83-90, 2015.
- [8] S. D. Shtovba, "Ant Algorithms: Theory and Applications," *Programming and Computer Software*, vol. 31, pp. 167-178, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11086-005-0029-1>.
- [9] W. Deng, H. M. Zhao, L. Zou, G. Y. Li, X. H. Yang, and D. Q. Wu, "A novel collaborative optimization algorithm in solving complex optimization problems," *Soft Comput.*, vol. 21, pp. 4387-4398, 2017.
- [10] J. Yu, X. M. You, and S. Liu, "Ant colony algorithm based on magnetic neighborhood and filtering recommendation," *Soft Comput.*, vol. 25, pp. 8035-8050, 2021.
- [11] Z. Gao, J. Zhu, H. Huang, Y. Yang, and X. Tan, "Ant Colony Optimization for UAV-based Intelligent Pesticide Irrigation System," in *2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*. 2021, pp. 720-726. doi: 10.1109/CSCWD49262.2021.9437825.
- [12] Hb. Duan, Xy. Zhang, and J. Wu, "Max-Min Adaptive Ant Colony Optimization Approach to Multi-UAVs Coordinated Trajectory Replanning in Dynamic and Uncertain Environments," *J. Bionic Eng.*, vol. 6, pp. 161-173, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(08\)60113-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(08)60113-4).
- [13] X. Meng, X. Zhu, and J. Zhao, "Obstacle Avoidance Path Planning Using the Elite Ant Colony Algorithm for Parameter Optimization of Unmanned Aerial Vehicles," *Arab J Sci Eng*, vol. 5, pp. 159-167, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07204-7>.
- [14] Meng, Xiaoling, and Zhu Xijing, "Autonomous Obstacle Avoidance Path Planning for Grasping Manipulator Based on Elite Smoothing Ant Colony Algorithm," *Symmetry*, vol. 9, pp. 195-207, 2022. <https://doi.org/10.3390/sym14091843>.
- [15] M. G. Cimino, A. Lazzeri, and G. Vaglini, "Using differential evolution to improve pheromone-based coordination of swarms of drones for collaborative target detection," *ICPRAM*, vol. 18, pp. 605-610, 2016.

- [16] Yu. Bin, Yang Zhong-Zhena, and Yao Baozhen, "An Improved Ant Colony Optimization for Vehicle Routing Problem," *European Journal of Operational Research*, pp. 171-176, 2009. doi: 10.1016/j.ejor.2008.02.028 .
- [17] S. C. Ho, and D. Haugland, "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries," *Comput. Oper. Res.*, vol. 31, pp. 1947-1964, 2004.
- [18] C. Zhang, C. Hu, J. Feng, Z. Liu, Y. Zhou, and Z. Zhang, "A Self-Heuristic Ant-Based Method for Path Planning of Unmanned Aerial Vehicle in Complex 3-D Space With Dense U-Type Obstacles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 150775-150791, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946448 .
- [19] M. Vittorio, and C. Antonella, "An ANTS heuristic for the frequency assignment problem," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, issue 8, pp. 927-935, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-739X\(00\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00046-7) .
- [20] V. Maniezzo, and A. Carbonaro, "An ANTS Heuristic for the Assignment Problem," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16(8), pp. 927-935, 2000.
- [21] V. Maniezzo, A. Carbonaro, and H. Hildmann, "An ANTS Heuristic for the Long-Term Car Pooling Problem," *New Optimization Techniques in Engineering. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, vol. 141, pp. 411-430, 2004.
- [22] V. Maniezzo, M. A. Boschetti, and T. Stutzle, *Matheuristics. Algorithms and Implementations*. Berlin, Germany: Springer, 2021, 212 p.
- [23] M. Dorigo, and L. M. Gambardella, "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem," *IEEE Transactions of Evolutionary Computing*, vol. 1(1), pp. 53-66, 1997.
- [24] S. Singh, S. Lu, M. M. Kokar, P. A. Kogut, and L. Martin, "Detection and classification of emergent behaviors using multi-agent simulation framework (wip)," *Proceedings of the Symposium on Modeling and Simulation of Complexity in Intelligent, Adaptive and Autonomous Systems*, vol. 3, pp. 1-8, 2017.
- [25] D. Bloembergen, K. Tuyls, D. Hennes, and M. Kaisers, "Evolutionary dynamics of multi-agent learning: a survey," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 53, pp. 659-697, 2015.

Рекомендована кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.09.2022

Кулик Ярослав Анатолійович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: Yaroslav_Kulik@i.ua ;

Книш Богдан Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, e-mail: tutmos-3@i.ua ;

Барабан Марія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: baraban87@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Ya. A. Kulyk¹
B. P. Knysh¹
M. V. Baraban¹

Modeling of Goods Movement by a Group of Unpiloted Aerial Vehicles Based on the Ant Colony Algorithm

¹Vinnitsia National Technical University

This article is about issues that happen during moving a large number of similar goods that are located on a certain site and concentrating them in one place (warehouse). These issues include imperfect conditions of facilities, unsatisfactory state of transport service, exhausted rolling stocks, low quality or overloading of transport routs, remote sites of goods' reception and delivery points, poor managing of goods moving, unexpected outcomes, etc. In order to solve these problems the authors recommend using of a group of unpiloted air vehicles (UAV) and solving the issues related to an efficient managing of their moving by the means of stochastic optimization algorithm, namely the ANTS ant algorithm. Authors propose the improved methods of an ant algorithm ANT that uses the function of changing the intensity of the digital phenomenon, and, unlike existing algorithms, uses not linear, but cubic dynamic scaling of the change of the digital phenomenon that allow us to focus on searching not only the short routes of shipping but also on consideration of a new one. The experiments on goods movement by the different quantities of involved UAV have been conducted using the modeling in WeBots and the test Mavic 2Pro UAVs for shipping 150 g typical loads to the one site (storehouse). The assessment of efficiency of loads shipping was conducted on the base of its results and a relation between a quantity of shipped loads and a time of shipping was defined. It was found that the efficacy of this process increases with increase in the number of UAV because the time of moving decreases. Also, it was found that the every next increase in the number of involved UAVs causes the smaller increase in efficiency due to the waiting in a line for a load's disembarking.

Keywords: unmanned aerial vehicles, number of moved loads, digital pheromone, ant algorithm, moving loads.

Kulyk Yaroslav A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automation and Intelligent Information Technologies, e-mail: Yaroslav_Kulik@i.ua ;

Knysh Bohdan P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of General Physics, e-mail: tutmos-3@i.ua ;

Baraban Mariia V. — Cand. Sc. (Chem.), Associate Professor of the Chair of Automation and Intelligent Information Technologies, e-mail: baraban87@gmail.com