



СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

УДК 519.8

В.П. ГОРБУЛІН

НАН України, Київ, Україна, e-mail: horbulin@nas.gov.ua.

Л.Ф. ГУЛЯНИЦЬКИЙ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: leonhul.icyb@gmail.com.

І.В. СЕРГІЄНКО

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: incyb@incyb.kiev.ua.

ПЛАНУВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ МІСІЙ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ «БПЛА+ТРАНСПОРТ»

Анотація. Розглянуто проблему планування місій гібридних транспортних систем — автомобіля чи іншого транспортного засобу, що може переміщуватися від початкового місця базування до інших заданих місць (баз) на заданому маршруті, маючи на борту один безпілотний літальний апарат (БПЛА). Запропоновано змістовну постановку та математичні моделі оптимізаційних проблем розподілу об'єктів по базах, вибору баз та формування маршрутів БПЛА під час обстеження чи обслуговування заданої множини об'єктів за наявності обмежень на польотний ресурс. Розроблено та реалізовано алгоритм розв'язування сформульованих задач комбінаторної оптимізації, який базується на оптимізації мурашиними колоніями. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: планування логістичних місій, динамічні бази, оптимізація маршрутів, транспортний засіб, БПЛА, оптимізація мурашиними колоніями.

ВСТУП

Стрімке розширення сфери застосувань безпілотних літальних апаратів (БПЛА) спричинило появу багатьох нових прикладних оптимізаційних проблем і зумовило потребу у розробленні нових математичних моделей і методів та базованих на них інформаційних технологій. Нині БПЛА застосовують під час моніторингу і спостережень, організації пошуково-рятувальних операцій, для збору даних, на виробництві, у сільському господарстві, логістиці тощо [1, 2]. До того ж, БПЛА стали невід'ємною частиною перспективного озброєння сучасних армій, їх активно використовують у розвідці, патрулюванні, для корегування вогню і ліквідації ворожих цілей [3, 4].

Можна виокремити три основні способи використання БПЛА в логістиці:

- доставлення здійснює лише БПЛА;
- для доставлення задіюють як транспортний засіб, так і один чи декілька БПЛА;
- транспортний засіб лише обслуговує БПЛА.

Близькими до розглянутої тематики є задачі маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP), актуальність яких зумовила появу останнім часом безлічі досліджень [5].

Однією із основних відмінностей задач маршрутизації з використанням БПЛА, які називаються Vehicle Routing Problem with Drones (VRPD) [6, 7], порівняно з класичними VRP є суттєве обмеження на польотний ресурс, а у разі доставлення — і на вантажопідйомність. Водночас наявні певні аналогії із VRP з декількома пунктами базування (депо) — стаціонарними чи динамічними [8–12].

© В.П. Горбулін, Л.Ф. Гуляницький, І.В. Сергієнко, 2023

Суттєвою причиною активізації досліджень і розроблень із цієї тематики, зокрема, є те, що низка великих компаній, таких як Amazon, Google, DHL, UPS, Deutsche Post AG та Walmart оголосили про використання безпілотників у процесі доставлення товарів кінцевим споживачам («доставка останньої милі») [13]. Останнім часом розширюються дослідження задач мінімізації загального споживання енергії під час планування логістичних місій з використанням дронів (Electric Vehicle Routing Problem with Drones), де транспортний засіб — це електричні фургони, з яких БпЛА здійснюють «доставку останньої милі» [14].

Важливими є також задачі планування моніторингу об'єктів критичної інфраструктури групою БпЛА з урахуванням вимог, таких як частота передачі, обсяг переданих даних та час безперервної роботи, планування використання БпЛА та станцій автоматичної заміни акумуляторів [15]. Також зазначимо, що задачі маршрутизації у багатьох випадках пов'язані з моніторингом, зокрема для оперативного виявлення заданих об'єктів чи процесів на певній території, що з математичної точки зору приводить до задач максимального покриття області сукупністю геометричних об'єктів заданої форми та розмірів [16].

Особливістю планування багатьох місій з БпЛА є використання гібридних транспортних систем, у яких БпЛА може транспортуватися автомобілем чи іншим транспортним засобом, злітаючи і приземляючись у певних місцях на маршруті транспортного засобу [5, 6, 17–21]. У першій публікації стосовно можливості взаємодії БпЛА з вантажівкою задачу названо задачею комівояжера з помічниками: Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP) [6, 21]. Окремий клас таких задач складають проблеми планування місій гібридних систем, у яких місця базування транспортного засобу можуть задаватися без прив'язки до об'єктів обслуговування. При цьому місцезнаходження таких баз можуть задаватися апіорі (подібно до задач із динамічними базами [11]) чи визначатися у процесі розв'язування задачі. В [22] пропонується такі задачі називати Drone Routing Problem with Truck (DRP-T). У теоретичному плані формальні постановки зазначених проблем приводять до задач комбінаторної оптимізації підвищеної складності.

У роботі розглядаються оптимізаційні задачі маршрутизації, які виникають під час планування використання гібридних транспортних систем, що можуть включати наземний чи надводний транспортний засіб, місця можливого базування якого задаються на маршруті, та один БпЛА чи інший дрон.

У наявних позначеннях розглядувану задачу можна віднести до класу «Dron Routing Problem with Vehicle, DRP+V».

ЗМІСТОВНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ З РУХОМИМИ БАЗАМИ

Розглядається ситуація, коли є гібридна транспортна система: автомобіль чи інший транспортний засіб, що може послідовно переміщуватися від початкового місця базування (бази) до інших заданих на маршруті баз, маючи на борту один БпЛА. Завдання БпЛА, який може злітати з транспортного засобу і повертатися на нього (чи поруч з ним), — облетіти задану сукупність цільових пунктів (цілей, місць розташування споживачів), враховуючи часові обмеження на польотний ресурс та умови синхронізації з рухом транспортного засобу за заданим маршрутом. Поповнення польотного ресурсу шляхом заміни або дозаряджання акумулятора чи заправлення паливом БпЛА (як і його дозавантаження за потреби) у процесі виконання місії відбувається тільки у зазначених базах на маршруті транспорту.

Отже, за потреби у поповненні польотного ресурсу БпЛА повинен повернутися на певну базу на маршруті транспортного засобу. У такому разі відповідний фрагмент маршруту (підмаршрут) БпЛА завершується цією базою, враховується час обслуговування БпЛА для відновлення ресурсу (та дозавантаження за потреби) і продовжується процес формування наступного підмаршруту чи переміщення транспортного засобу до наступної бази.

Конкретніше, мають місце такі припущення.

1. Кожну ціль БпЛА відвідує один і тільки один раз. Транспортний засіб в обстеженні чи обслуговуванні цілей поза базами не використовується.
2. Місцеположення баз на заданому маршруті транспортного засобу вважаються фіксованими, а транспортний засіб може відвідувати їх послідовно без повернень, починаючи із першої бази, з якої уже може стартувати БпЛА.
3. БпЛА має обмеження на польотний ресурс.
4. Поповнення польотного ресурсу БпЛА здійснюється на базах (зупинках транспортного засобу) чи під час переїзду між базами.
5. Вважається, що засобів і запасів для поповнення польотного ресурсу БпЛА достатньо (акумулятори, паливо).
6. Вважається, що споживання енергії БпЛА відбувається за лінійним законом, тобто не враховуються можливі перевищення витрат під час зльоту чи приземлення БпЛА.
7. Маршрут БпЛА може складатися з підмаршрутів, кожен із яких починається і закінчується на заданій базі маршруту транспортного засобу, а час обстеження включених у кожний підмаршрут цілей не порушує обмеження на польотний ресурс. При цьому вибір баз та цілей для включення у підмаршрут здійснюється у ході виконання місії.
8. Транспортний засіб може прибувати на чергову базу раніше БпЛА і очікувати на нього.
9. Транспортний засіб починає рух до наступної бази, якщо вона не остання на його маршруті, від поточної бази відразу після повернення БпЛА з останнього із запланованих на цій базі підмаршрутів.
10. Розглядаються задачі, у яких вантажопідйомність БпЛА не є обмежувальним чинником.

Отже, маємо транспортний засіб, один БпЛА, задану множину цілей для обстеження та місцеположення послідовності баз на маршруті транспортного засобу. БпЛА стартує з транспортного засобу, що стоїть у цей момент на певній базі (починаючи з першої), а сам транспортний засіб після проходження підмаршруту залишається на місці, якщо не всі заплановані підмаршрути пройдено, чи вирушає до наступної бази, якщо вона не є кінцевою.

Зауважимо, що виконання припущення 9 дає змогу модифікувати список цілей для подальшого обслуговування на основі аналізу отриманих на поточний момент результатів.

Планування місії полягає у такому визначенні підмаршрутів загального маршруту БпЛА із усіх чи частини баз на маршруті та часових інтервалів його обслуговування на цих базах, щоб провести обстеження цілей за мінімальний час.

ЦІЛОЧИСЛОВА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ З РУХОМИМИ БАЗАМИ

Загальна схема розв'язування задачі полягає у розбитті множини цілей і призначенні їх наявним базам з подальшим таким їхнім розбиттям на підмаршрути, які починаються і закінчуються на призначеній базі і при цьому не порушують обмеження на польотний ресурс БпЛА.

Відомо, що розбиттям довільної множини називається сім'я непорожніх диз'юнктивних її підмножин, об'єднання яких дає всю множину. Такі підмножини називаються блоками розбиття (БР) [23].

Розглядається планарна задача, тобто цілі і бази розташовані на площині (двовимірне розташування на місцевості).

Вхідні дані (вважаються заданими):

B — множина заданих на маршруті баз транспортного засобу;

b — кількість баз на маршруті;

Z — множина цілей;
 n — кількість цілей;
 T — ресурс БпЛА у часовому вимірі (час у польоті без поповнення польотного ресурсу);

Θ — час відновлення польотного ресурсу (обслуговування) БпЛА;

v — швидкість БпЛА;

w — швидкість транспортного засобу;

D — матриця відстаней між цілями, базами та між цілями і базами.

Вихідні дані:

— час виконання місії на основі оптимізації загального маршруту БпЛА, що складається із підмаршрутів, зумовлених вибором тієї чи іншої бази, та наявного польотного ресурсу БпЛА;

— часовий розклад руху транспортного засобу та БпЛА (відвідування баз і вильоти з них, поповнення ресурсу).

Зазначимо, що час прибуття транспортного засобу на кожную базу не заданий, а може визначатися у ході планування місії. Припускається, що можуть виникати ситуації, коли доречно задіювати не всі бази, тобто на деяких базах БпЛА може не використовуватися.

Далі перенумеруємо елементи множин Z та B .

Верхній рівень ієрархічного розбиття цілей по базах задаватимемо матрицею $X = (x_{ij})_{b \times n}$, де $x_{ij} \in \{0, 1\}$ і визначається так:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо ціль } j \text{ призначена на базу } i \\ 0 & \text{в іншому разі,} \end{cases}$$

де $i = 1, \dots, b, j = 1, \dots, n$.

Урахування обмеження на польотний ресурс спричиняє те, що призначені на певну базу цілі можуть не бути відвіданими БпЛА за один раз, тому може виникати потреба у поповненні ресурсу на цій базі, а отже, — у плануванні декількох вильотів (підмаршрутів).

Для відображення цієї ситуації введемо тензор $U = (u_{lj}^i)_{n \times n \times b}$, де

$$u_{lj}^i = \begin{cases} 1, & \text{якщо на базі } i \text{ ціль } j \text{ включена в підмаршрут } l, \\ 0 & \text{в іншому разі,} \end{cases}$$

$i = 1, \dots, b, j = 1, \dots, n, l \in \{1, \dots, n\}$. Тоді обмеження задачі можна записати так:

$$\sum_{i=1}^b x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\sum_{l=1}^n u_{lj}^i = x_{ij}, j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, b, \quad (2)$$

$$\frac{S_{il}(X, U)}{v} \leq T, i = 1, \dots, b, l = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Тут $S_{il}(X, U)$ — це довжина підмаршруту як розв'язок задачі комівояжера для підмаршруту l на базі i , якщо

$$\sum_{j=1}^n u_{lj}^i \neq 0, l = 1, \dots, n, i = 1, \dots, b, \quad (4)$$

або $S_{il}(X, U) = 0$ в іншому разі, тобто коли база не задіяна (їй не приписані цілі).

Цільова функція задачі визначається часом виконання місії, який складається із часів задіяння транспортного засобу та БпЛА.

Зробимо природне припущення, яке виконується на практиці (особливо, якщо поповнення ресурсу БпЛА — це заміна акумулятора):

$$\Theta < d(b_{i,i+1}) + d(b_{i+1,i+2}) \text{ для всіх } i \in \{1, \dots, b-2\}.$$

Той факт, що база i є задіяною, визначається нерівністю

$$\sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n u_{lj}^i \neq 0, \quad i=1, \dots, b. \quad (5)$$

Позначимо I максимальний номер бази, задіяної для заданого варіанта розподілу цілей:

$$I = \max_{1 \leq i \leq b} \{i: \text{виконується умова (5)}\}. \quad (6)$$

Тоді час руху транспортного засобу t_T із урахуванням можливої наявності незадіяних баз визначається так:

$$t_T = \sum_{i=1}^{I-1} t_{i,i+1}, \quad (7)$$

де

$$t_{i,i+1} = \begin{cases} \max \left\{ \frac{d(b_i, b_{i+1})}{w}, \Theta \right\}, & \text{якщо для бази } i \text{ виконується нерівність (5),} \\ \frac{d(b_i, b_{i+1})}{w} & \text{в іншому разі.} \end{cases} \quad (8)$$

Обчислення часу t_A^i використання БпЛА на базі i визначиться так:

$$t_A^i = \left(\sum_{l=1}^n \prod_{j=1}^n u_{lj}^i - 1 \right) \Theta + \frac{S_{il}(X, U)}{v}. \quad (9)$$

Цільову функцію задачі можна записати так:

$$f(X, U) = \sum_{i=1}^I \left[t_{i,i+1} + \left(\sum_{l=1}^n \prod_{j=1}^n u_{lj}^i - 1 \right) \Theta + \frac{S_{il}(X, U)}{v} \right]. \quad (10)$$

Рівняння (1) гарантує, що кожна ціль розподілена на одну і тільки одну базу. Рівняння (2) визначає, що розподілена на базу i ціль j включена в один із підмаршрутів l і не входить у підмаршрути на цій базі в іншому випадку. Нерівність (3) відображає обмеження на польотний ресурс БпЛА. Рівняння (4) виокремлює ті підмаршрути l на базі i , для яких розв'язується задача оптимізації маршрутів. Умова, що база задіяна, тобто їй приписана хоча б одна ціль, подана нерівністю (5). Співвідношення (6)–(9) детально описують принципи обчислення компонент цільової функції задачі, яка визначає час виконання місії.

Задача планування місії гібридної системи «БпЛА+Транспорт» полягає у пошуку мінімуму функції (10) з урахуванням обмежень та позначень (1)–(9).

КОМБІНАТОРНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ З РУХОМИМИ БАЗАМИ

Опишемо у термінах комбінаторних конфігурацій простір розв'язків V , підмножину допустимих розв'язків $E \subseteq V$, яка визначається обмежувальними умовами, та цільову функцію.

Простір розв'язків. Для опису розв'язків позначимо $s, s \in \{1, \dots, b\}$, кількість баз, які будуть фактично задіяні, і розглянемо розбиття множини Z на s БР. Щоб врахувати факт незадіяності деяких баз для $s < b$, доповним це розбиття порожніми множинами, які назвемо фіктивними БР (ФБР), їхня кількість буде $b - s$. Таким чином отримуємо узагальнене розбиття множини Z на b підмножин, яке містить БР і, можливо, ФБР. Нехай $Y = (Y_1, \dots, Y_b)$ — певне упорядкування такого узагальненого розбиття, тоді його компоненти будемо приписувати відповідним базам, тобто базі b_i буде відповідати БР чи ФБР Y_i , $i=1, \dots, b$.

Отже, за рахунок різних способів упорядкування елементів блоків узагальненого розбиття воно може бути використане для опису декількох варіантів розв'язку задачі.

Враховуючи, що ресурсу БпЛА може не вистачити для обслуговування за один обліт цілей із конкретного БР $Y_i \neq \emptyset$, введемо до розгляду розбиття цієї множини Y_i на непорожні підмножини Y_i^j , $j \in \{1, \dots, k_i\}$, $k_i = ||Y_i||$, порядок обльоту цілей у кожній із яких назвемо підмаршрутом, а самі підмножини — підрозбиттями Y_i . Якщо $Y_i = \emptyset$, тобто це ФБР, то покладемо $k_i = 0$.

Позначимо $\bar{Y}_i^j$ таке упорядкування елементів (цілей) із Y_i^j , яке відповідає розв'язку замкненої задачі комівояжера, сформованої цими цілями і тією базою, до якої приписано множину Y_i^j . Конкретніше, упорядкування елементів блока $\bar{Y}_i^j$ зробимо відповідним упорядкуванню точок у розв'язку задачі комівояжера у такій постановці: точки (база та цілі) вибираються із пари (b_i, Y_i^j) , маршрут має починатися і завершуватися у точці (базі) b_i та проходити один раз через всі цілі із Y_i^j , $j = 1, \dots, k_i$, $i = 1, \dots, b$. Якщо еквівалентних розв'язків декілька, то можна використати будь-який із них. Зрозуміло, що використання для упорядкування розв'язку цієї спеціальної задачі комівояжера дає змогу відразу відкинути множину недопустимих варіантів розв'язків.

Тоді конкретний розв'язок задачі, відповідний певному узагальненому розбиттю та зазначеним підрозбиттям, задамо так:

$$x(Y, k_1, \dots, k_b) = (b_1, \bar{Y}_1(k_1), \dots, b_b, \bar{Y}_b(k_b)), \quad (11)$$

де $Y = (Y_1, \dots, Y_b)$ — упорядковане узагальнене розбиття множини Z на БР та ФБР; $\bar{Y}_i(k_i) = (\bar{Y}_i^1, \dots, \bar{Y}_i^{k_i})$, якщо $||Y_i|| > 0$, причому $\bar{Y}_i^j$, $j = 1, \dots, k_i$, — це БР на підмаршрути, елементи (цілі) кожного із яких впорядковані згідно з розв'язком зазначеної спеціальної задачі комівояжера, інакше $\bar{Y}_i^j = \emptyset$, $k_i = 0$, $i = 1, \dots, b$; b_i — база, $b_i \in B$, $i = 1, \dots, b$.

Зауважимо, що за сформульованих умов підмаршрути в упорядкуванні $\bar{Y}_i(k_i)$, якщо $k_i > 1$, можемо записувати у довільному порядку. Якщо, наприклад, задаються важливості цілей чи враховуються затрати ресурсу на кожному підмаршруті, то потрібна додаткова процедура упорядкування, що враховувала б такі фактори.

Простір розв'язків задачі V — це множина всіх варіантів, які можна утворити варіацією способів узагальненого розбиття Y та розподілом його компонентів по базах, розбиття та упорядкування його БР, що визначають підмаршрути $V = \{x(Y, k_1, \dots, k_b)\}$.

Позначимо t'_i час початку виконання першого вильоту БпЛА з бази b_i , якщо $k_i > 0$, а t''_i — час прильоту БпЛА з останнього підмаршруту, запланованого з цієї бази. Ці величини можна обчислити так:

$$t'_1 = 0; \quad (12)$$

$$t'_{i+1} = t'_i + \delta_{i,i+1}, \quad i = 1, \dots, b-1, \quad (13)$$

де

$$\delta_{i,i+1} = \begin{cases} \max \left\{ \frac{d(b_i, b_{i+1})}{w}, \Theta \right\}, & \text{якщо } k_i > 0, \\ \frac{d(b_i, b_{i+1})}{w} & \text{в іншому разі,} \end{cases}$$

$d(b_i, b_{i+1})$ — відстань між відповідними базами;

$$t''_i = t'_i + \Delta_i + \Theta \cdot (q_i - 1), \quad i = 1, \dots, b, \quad (14)$$

де

$$\Delta_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{L(b_i, \bar{Y}_i^j)}{v}, & \text{якщо } Y_i \neq \emptyset, \\ 0 & \text{в іншому разі,} \end{cases}$$

$L(b_i, \bar{Y}_i^j)$ — довжина підмаршруту згідно з розв'язком зазначеної задачі комівояжера, $q_i = \begin{cases} k_i, & \text{якщо } Y_i \neq \emptyset, \\ 1 & \text{в іншому разі,} \end{cases} \quad j=1, \dots, k_i, \quad i=1, \dots, b; \Delta_i$ — сумарний час польотів БпЛА по всіх підмаршрутах, які починаються і закінчуються на базі $b_i, i=1, \dots, b$, якщо їй не приписаний ФБР.

Отже, транспортний засіб може чекати на БпЛА, доки той не виконає обліт всіх призначених цій базі підмаршрутів.

Завершення місії визначається часом прильоту БпЛА на останню задіяну базу, номер якої обчислюється так:

$$I = \max \{Y_i \neq \emptyset : 1 \leq i \leq b\}. \quad (15)$$

Обмежувальні умови, які визначають область допустимих розв'язків $E \subseteq X$, мають вигляд

$$\frac{L(b_i, \bar{Y}_i^j)}{v} \leq T, \quad j=1, \dots, k_i, \quad i=1, \dots, b. \quad (16)$$

Формальна постановка задачі. Потрібно знайти такий $x^* \in E \subseteq V$, що

$$x_* = \arg \min_{x(Y, k_1, \dots, k_b) \in E \subseteq V} t'' \quad (17)$$

за умов (16) з використанням формул (11)–(15).

Таким чином, шукається такий загальний маршрут БпЛА, що складається із підмаршрутів, які визначаються розбиттям множини цілей та вибором задіяних баз, який мінімізує час завершення місії (17).

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Для розв'язування сформульованої задачі пропонується підхід, який базується на використанні оптимізації мурашиними колоніями (ОМК) [24].

Схема розв'язування містить такі два основних етапи:

- 1) розподіл цілей по базах (задача кластеризації);
- 2) формування підмаршрутів для кожної бази, якщо не вдається обслужити всі цілі із деякої бази за один політ БпЛА.

Для розв'язування задачі кластеризації на етапі 1 можна використати один із відомих алгоритмів, починаючи із розподілу згідно з матрицею відстаней. Також результатом виконання цього етапу повинен стати перелік незадіяних баз.

Розглянемо схему розв'язування задач формування підмаршрутів на етапі 2, яка базується на спеціальному алгоритмі ОМК [11].

Псевдокод обчислювальної схеми запропонованого алгоритму можна записати так:

```

procedure Формування підмаршрутів ()
   $g := 0;$  {лічильник поколінь мурах}
   $P_0 :=$  початкове покоління мурах;
  while не виконується умова завершення do
    розподіл мурах із  $P_g$  по базах;
    while не всі задіяні бази опрацьовано do
      вибирається чергова незадіяна база;
      кожна із розподілених із  $P_g$  на цю базу мурах розв'язує задачу формування
      допустимих підмаршрутів, які охоплюють всі призначені цілі;
      здійснюється модифікація матриці мурашиних маршрутів;
    endwhile
     $g := g + 1;$ 
     $P_g :=$  наступне покоління;
  endwhile
  return {повертається кращий із знайдених розв'язків}
end

```

Ключові аспекти реалізації обчислювальної схеми:

- розподіл мурах із чергового покоління по базах;
- вибір чергової бази;
- розв’язування задач формування оптимальних підмаршрутів для баз.

Для кожної задіяної бази під час формування оптимальних підмаршрутів виникає задача комівояжера із обмеженнями, фактично, на довжину маршруту, для розв’язування якої і розроблено алгоритм ОМК. У процесі його реалізації насамперед вимагається конкретизувати правила вибору мурахами чергової вершини графу моделі задачі і принципу оновлення матриці мурашиних маршрутів [24, 25].

Мурахи чергового покоління із m мурах розподіляються по задіяних базах рівномірно.

Імовірність p_{ij}^k переходу від вершини i , яка є останньою на поточний момент у фрагменті розв’язку, що будується мурахою k із чергового покоління, до довільної припустимої сусідньої вершини $j \in N_i^k$ як функції від значень на ребрі $(i, j) \in E$ (E — множина ребер графу моделі задачі) рівня феромону τ_{ij} та евристичної інформації η_{ij} обчислюється так:

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{r \in N_i^k} [\tau_{ir}(t)]^\alpha [\eta_{ir}(t)]^\beta},$$

де N_i^k — множина допустимих для мурахи k вершин графу задачі, сусідніх до вершини i ; α, β — параметри алгоритму, які відображають ступінь значимості феромонного сліду та евристичної інформації ($\alpha, \beta > 0$).

Застосовано онлайнове відстрочене оновлення феромону на ребрі (i, j) графу моделі задачі, яке визначається з урахуванням якості знайденого розв’язку:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij},$$

де $\Delta \tau_{ij}$ — сума вкладів всіх m мурашок покоління, $\Delta \tau_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k$, а вклад

конкретної мурахи $k, k = 1, \dots, m$,

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q / f(x^k), & \text{якщо ребро } (i, j) \text{ належить розв’язку } x^k, \\ 0 & \text{в іншому разі.} \end{cases}$$

Тут Q — параметр алгоритму, а $f(x^k)$ — довжина (під)маршруту у знайденому мурахою розв’язку x^k .

Таке оновлення здійснюється лише для найкращого із знайдених розв’язків.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ПІДХОДУ

Для оцінювання застосовності запропонованого підходу до планування у реальному часі проведено обчислювальний експеримент із розв’язування низки задач, сформованих на базі використання реальних даних для задач комівояжера із відомої бібліотеки TSPLIB [26], деякі із точок в яких вибиралися як бази, а також нові задачі, дані для яких сформовано на основі реальних геокоординат.

Обчислення проводилися на персональному комп’ютері Macbook Pro з такими параметрами: Macbook Pro 16-inch 2019, процесор 2,6 GHz 6-Core Intel Core i7. Графічна підтримка: AMD Radeon Pro 5300M 4 GB, Intel UHD Graphics 630 1536 MB. Операційна система Mac OS: 13.2.1 (22D68), RAM: 16 GB 2667 MHz DDR4.

Таблиця 1

Номер задачі	n	b	t_{rec}	t_{avr}	S_{rec}
1	14	3	45.73	45.90	91.45
2	22	3	240.02	245.11	480.04
3	42	6	76.90	77.28	153.81
4	52	4	97.63	98.11	195.26
5	15	3	160.62	161.58	321.24
6	19	4	88.18	88.53	176.37
7	20	5	158.23	158.69	316.45
8	22	4	70.23	70.30	140.46
9	22	3	164.88	165.20	329.75
10	29	5	107.58	108.32	215.15

Вибиралися такі параметри алгоритму ОМК: $\alpha = 0.8$, $\beta = 4$, $\rho = 0.1$. Значення Q покладалося рівним знайденому на поточний момент рекорду, а швидкість БпЛА — рівною 120 км/год. Критерієм завершення алгоритму розв’язування вибрано перевищення заданого ліміту часу обчислень у задачі, який складав 20 с.

Оскільки акумулятор у БпЛА з електродвигуном замінюють швидко, часом обслуговування у цьому випадку порівняно із часом переїзду між базами можна було знехтувати. Кожна задача розв’язувалася з використанням трьох запусків запропонованого алгоритму. Основні результати експерименту наведено у табл. 1, де використано такі позначення: t_{rec} — найкращий час (у хвилинах) виконання місії серед всіх запусків (значення цільової функції задачі); t_{avr} — розрахований середній час виконання місії; S_{rec} — сумарна довжина (у кілометрах) найкоротшого знайденого маршруту БпЛА.

Задачі 1–4 (див. табл. 1) сформовано на базі задач комівояжера із згаданої бібліотеки визначенням окремих точок як баз на маршруті транспортного засобу. Задача 1 сформована на базі задачі *burma14*, задача 2 — на базі задачі *ulysses22*, задача 3 — на базі задачі *dantzig42*, а задача 4 — на базі задачі *berlin52* [26].

Вхідні дані для нових сформованих задач 5–10 (див. табл. 1) розміщено на сайті [27].

ВИСНОВКИ

Запропоновано підхід на основі використання ройового інтелекту, який дав змогу агрегувати в єдину оптимізаційну задачу етапи розбиття цілей по базах, вибору задіяних баз на маршруті транспортного засобу та формування маршрутів БпЛА з урахуванням обмеження на польотний ресурс.

Отримані результати підтверджують практичну застосовність розробленого алгоритму розв’язування задач комбінаторної оптимізації, які виникають під час планування місій гібридних систем «БпЛА+Транспорт» у реальних умовах. Навіть за задані 20 с отримано задовільну стійкість. Це демонструють невеликі відхилення середніх значень цільової функції від рекордних у проведених запусках алгоритму.

У подальших дослідженнях доречно передбачити можливість врахування у математичних моделях проблеми важливості цілей, а також специфіку використання інших гібридних транспортних систем насамперед таких, що складаються із надводних засобів чи морських дронів. Окремий тип задач виникає тоді, коли місця баз на маршруті формуються у процесі планування місії [22].

Актуальним напрямом є постановка і розв’язування задач маршрутизації з урахуванням наявних перешкод на місцевості — заборонених зон, які описуються геометричними фігурами, що зумовлює потребу в розробленні і застосуванні спеціальних методів Евклідової оптимізації [28].

Розширення масштабів застосування гібридних транспортних систем з дронами вводить в коло інтересів розроблення оптимізаційних алгоритмів у випадку використання не одного, а декількох дронів. Дотичними до розглянутих проблем є питання проєктування і захисту спеціальних мереж, які зв'язують групу дронів, що діють як команда під час обслуговування заданої множини цілей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Thibbotuwawa A., Bocewicz G., Nielsen P., Banaszak Z. Unmanned aerial vehicle routing problems: A literature review. *Applied sciences*. 2020. Vol.10, Issue 13. 4504. <https://doi.org/10.3390/app10134504>.
2. Macrina G., Di Puglia Pugliese L., Guerriero F., Laporte G. Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 120. 102762. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102762>.
3. Liu W., Zhang T., Huang S., Li K. A hybrid optimization framework for UAV reconnaissance mission planning. *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Vol. 173. 108653. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108653>.
4. Ahn N., Kim S. Optimal and heuristic algorithms for the multi-objective vehicle routing problem with drones for military surveillance operations. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 2022. Vol. 18, Issue 3. P. 1651–1663. <https://doi.org/10.3934/jimo.2021037>.
5. Golden B., Wang X., Wasi E. The Evolution of the Vehicle Routing Problem — A Survey of VRP Research and Practice from 2005 to 2022. In: *The Evolution of the Vehicle Routing Problem. Synthesis Lectures on Operations Research and Applications*. Cham: Springer, 2023. P. 1–64. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18716-2_1.
6. Murray C.C., Chu A.G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 54. P. 86–109. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.005>.
7. Huang S.-H., Huang Y.-H., Blazquez C.A., Chen C.-Y. Solving the vehicle routing problem with drone for delivery services using an ant colony optimization algorithm. *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 51. 101536. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101536>.
8. Montoya-Torres J.R., Franco J.L., Isaza S.N., Jimenez H.F., Herazo-Padilla N. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Vol. 79. P. 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>.
9. Koc C., Laporte G. Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers & Operations Research*. 2018. Vol. 91. P. 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.003>.
10. Jayarathna N., Lanel J., Juman Z.A.M.S. Five years of multi-depot vehicle routing problems. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2020. Vol. 5, N 2. P. 109–123. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2020.5-2.10>.
11. Horbulin V.P., Huliantskyi L.F., Sergienko I.V. Optimization of UAV team routes in the presence of alternative and dynamic depots. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 2. P. 195–203. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00235-8>.
12. Ramos T.R.P., Gomes M.I., Pova A.P.B. Multi-depot vehicle routing problem: A comparative study of alternative formulations. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2020. Vol. 23, Issue 2. P. 103–120. <https://doi.org/10.1080/13675567.2019.1630374>.
13. Yoo W., Yu E., Jung J. Drone delivery: Factors affecting the public's attitude and intention to adopt. *Telematics and Informatics*. 2018. Vol. 35, Issue 6. P. 1687–1700. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.04.014>.
14. Kyriakakis N.A., Stamadianos T., Marinaki M., Marinakis Y. The electric vehicle routing problem with drones: An energy minimization approach for aerial deliveries. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2022. Vol. 4. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100041>.

15. Kliushnikov I., Fesenko H., Kharchenko V., Illiashenko O., Morozova O. UAV fleet based accident monitoring systems with automatic battery replacement systems: Algorithms for justifying composition and use planning. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. Vol. 11, N 4. P. 319–328. <https://doi.org/10.18280/ijssse.110404>.
16. Yakovlev S., Kartashov O., Mumrienko A. Formalization and solution of the maximum area coverage problem using library Shapely for territory monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2022. N 2. P. 35–48. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.03>.
17. Gonzalez-R P.L., Canca D., Andrade-Pineda J.L., Calle M., Leon-Blanco J.M. Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 114. P. 657–680. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.030>.
18. Poikonen S., Golden B. Multi-visit drone routing problem. *Computers & Operations Research*. 2020. Vol. 113. 104802. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104802>.
19. Tamke F., Buscher U. The vehicle routing problem with drones and drone speed selection. *Computers & Operations Research*. 2023. Vol. 152. 106112. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106112>.
20. Wang Z., Sheu J.B. Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 122. P. 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005>.
21. Murray C.C., Raj R. The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 110. P. 368–398. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.003>.
22. Jeong H.Y., Lee S. Collaborative hybrid delivery system: Drone routing problem assisted by truck. In: *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2021 (Nantes, France, Sept. 5–9, 2021). Proc., Part III*. Springer Int. Publ, 2021. P. 33–42.
23. Loehr N.A. Combinatorics. Discrete Mathematics and its Applications (2nd Ed.). New York: Chapman and Hall/CRC, 2017. 642 p.
24. Stützle T., Dorigo M. Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances. *Handbook of Metaheuristics. Third Edition*. Gendreau V., Potvin J.-Y. (Eds). Cham: Springer, 2019. P. 311–351.
25. Гуляницький Л.Ф., Мулеса О.Ю. Прикладні методи комбінаторної оптимізації. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. 142 с.
26. Reinelt G. TSPLIB 95. Technical report, Universität Heidelberg. 1995. URL: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/tsp95.pdf>. Accessed 12 Feb 2023.
27. Обчислювальні експерименти. URL: <https://icyb180.org.ua/experiments/> Accessed 22 Feb 2023.
28. Stoyan Y.G., Yakovlev S.V. Theory and methods of euclidian combinatorial optimization: Current status and prospects. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 3. P. 366–379. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00253-6>.

V.P. Horbulin, L.F. Hulianytskyi, I.V. Sergienko

PLANNING OF LOGISTICS MISSIONS OF THE «UAV+VEHICLE» HYBRID SYSTEM

Abstract. This paper considers the planning of logistics missions for hybrid transport systems, which include a car or other vehicle that can move from a base to other locations along a designated route, carrying one unmanned aerial vehicle (UAV). A meaningful formulation and mathematical models of optimization problems of distributing objects to bases, selecting bases, and generating UAV routes during the inspection or maintenance of a given set of objects in the presence of flight resource constraints are proposed. We have developed an algorithm based on ant colony optimization to solve the resulting combinatorial optimization problems. We present the results of a computational experiment.

Keywords: logistics mission planning, dynamic bases, route optimization, vehicle, UAV, ant colony optimization.

Надійшла до редакції 19.04.2023