

Г. В. ФЕСЕНКО, В. С. ХАРЧЕНКО

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ОБ'ЇЗУ ЗАДАНИХ ТОЧОК ТЕРИТОРІЇ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБ'ЄКТУ ФЛОТОМ БПЛА

Актуальність. Однією з задач моніторингу атомних електростанцій та інших потенційно небезпечних об'єктів із залученням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є обліт заданих точок території таких об'єктів. Пошук оптимальних маршрутів дуже часто передбачає розв'язання різних варіантів задачі комівояжера. Однак, у разі існування кількох стартових позицій виникає необхідність розв'язання задачі комівояжера для кожного варіанту старту БПЛА (кожного варіанту початкової-кінцевої точки маршруту). **Предметом** дослідження є процес мінімізації часу об'їзу заданих точок території потенційно небезпечного об'єкту з урахуванням місць розміщення та використовуваних моделей БПЛА флоту. **Завдання:** розробити алгоритм визначення оптимального маршруту об'їзу заданих точок території потенційно небезпечного об'єкту для флоту, кожен БПЛА якого перебуває на окремій стартовій позиції; показати можливість використання запропонованого алгоритму для мінімізації часу об'їзу постів контролю автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки Запорізької атомної станції. Використовуваними **методами** є: теорія графів, математичні моделі оптимізації, методи розв'язання задачі комівояжера. **Отримані такі результати.** Запропонована фасетна класифікація задач комівояжера для маршрутизації польоту БПЛА. Описані етапи алгоритму визначення оптимального маршруту об'їзу заданих точок території потенційно небезпечного об'єкту флотом БПЛА. Розв'язано задачу визначення найшвидшого об'їзу 11 постів контролю автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки для Запорізької атомної станції для двох випадків: 1) на усіх стартових позиціях знаходяться БПЛА «Лелека-100», 2) на першій стартовій позиції знаходиться БПЛА «Лелека-100», на решті – різні модифікації моделі «R-100». Показані зміни у оптимальному маршруті при зміні моделей і швидкостей БПЛА. **Висновки.** Отримані результати доцільно використовувати під час обґрунтування складу БПЛА флоту, моделювання його застосування, оцінки його цільової ефективності, а також для створення алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованих робочих місць операторів наземного пункту управління. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці моделей, які б враховували можливість дозаправки (підзарядки батареї) БПЛА на стаціонарних або рухомих постах під час руху за маршрутом.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; потенційно небезпечний об'єкт; задача комівояжера; маршрутизація польоту; стартова позиція; автоматизована система контролю радіаційної обстановки; пост контролю

1. Проблеми розв'язання задачі комівояжера під час маршрутизації польоту БПЛА

1.1. Актуальність використання задачі комівояжера для визначення оптимального об'їзу БПЛА заданих точок

Однією із задач моніторингу атомних електростанцій (АЕС) та інших потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) із залученням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є обліт заданих точок (елементів інфраструктури) [1-5]. У якості таких точок можуть розглядатися пости контролю (ПК) автоматизованої системи контролю

радіаційної обстановки (АСКРО) АЕС [6], з якими внаслідок аварії кризовий центр втратив зв'язок. Обліт ПК в такому випадку може бути здійснений для:

- встановлення ступеня їх пошкодження з використанням бортової відеокамери та інфрачервоних давачів;
- прийому даних від ПК про радіаційну обстановку по резервному Wi-Fi (Li-Fi) каналу та забезпечення їх подальшої передачі до кризового центру;
- відбору проб для визначення концентрацій радіоактивних аерозолів у приземному шарі атмосфери у місці розташування ПК з використанням бортового фільтро-ежекційного пристрою;

– вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання у місці розташування ПК з використанням бортового широкодіапазонного інтелектуального блоку детектування гамма-випромінювання. При цьому важливо мінімізувати тривалість польоту за маршрутом, оскільки це забезпечує підвищення оперативності збору інформації для наземного пункту управління (кризового центру) та економить ресурс БПЛА. Рішення може бути подано у вигляді замкнутого маршруту польоту, що зв'яже всі задані точки, причому через кожну точку БПЛА пролітає тільки один раз, тобто маршрут не має петель. Таким чином, мова йде про можливість використання класичної замкнутої задачі комівояжера для БПЛА (ЗКБ).

Однак, у разі існування кількох стартових позицій (СП) виникає необхідність розв'язання ЗКБ для кожного варіанту старту БПЛА (кожного варіанту початкової-кінцевої точки) і обрання маршруту, який забезпечить:

– найшвидший обліт заданих точок для випадку знаходження на СП однакових моделей БПЛА;

– найшвидший обліт заданих точок для випадку знаходження на СП різних моделей БПЛА.

Таким чином існує необхідність використання ЗКБ для визначення оптимального обльоту ПК АСКРО з урахуванням місць розміщення стартових позицій та типів БПЛА, розташованих на них.

1.2. Аналіз підходів щодо розв'язання практичних задач планування оптимального маршруту польоту БПЛА

Останнім часом з'являється все більше статей, у яких з різними варіаціями обговорюються питання передпольотної маршрутизації БПЛА [7-16]. Необхідність обговорення таких питань обумовлена тим, що їх розв'язання необхідне під час складання плану польоту та під час моделювання застосування БПЛА. В зазначених роботах складання маршруту полягає у визначенні послідовності польоту над точками з відомими координатами. Зокрема задача маршрутизації інтерпретується як задача комівояжера, що передбачає введення вимог на безумовний обліт всіх заданих точок з розглядом часу польоту у якості критерію мінімізації. У статті [7] автори для розімкнутого маршруту обльоту розглядають варіанти з наявністю або відсутністю інформації про початкову та кінцеву точки маршруту. При цьому мінімізується тривалість польоту за маршрутом. У якості програмно-алгоритмічної основи вирішення завдань маршрутизації пропонується метод гілок і меж, реалізований функцією `binprog` пакета

MATLAB. Робота [8] розглядає задачу маршрутизації з урахуванням обмеження на час польоту. У такій постановці можливо, що не всі точки з числа заданих будуть включені до оптимального маршруту. Робота [9] присвячена порівняльному аналізу методів оптимізації маршруту обльоту осередків надзвичайних ситуацій БПЛА з ретрансляторами зв'язку. Автори проводили розрахунки, використовуючи: метод повного перебору, метод гілок і меж, «жадібний» алгоритм, а також мурашиний та генетичний алгоритми. У роботах [10, 11] описано розв'язання задачі комівояжера генетичним алгоритмом для мінімізації довжини маршруту БПЛА при зменшенні часу пошуку. Причому, у [10] задачу комівояжера розв'язано для точок, розташованих у тривимірному просторі. В роботі [12] проведено аналіз декількох розроблених автором варіантів програмно-алгоритмічного забезпечення оптимальної маршрутизації польоту легкого безпілотного літального апарату під впливом постійного вітру. Автори [13] пропонують алгоритм групового використання БПЛА на одному маршруті для різних випадків розміщення БПЛА на стартових позиціях. Роботи [14-16], розглядаючи питання мінімізації часу доставки вантажів клієнтам, вирішують задачу комівояжера одночасно для БПЛА і вантажних автомобілів. Підсумовуючи аналіз існуючих підходів, автори цієї статті пропонують восьмикритеріальну фасетну класифікацію ЗКБ, подану у вигляді таблиці 1.

1.3. Постановка задачі

Задачами досліджень є:

– розробити алгоритм визначення оптимального маршруту обльоту заданих точок території ПНО для флоту, кожен БПЛА якого перебуває на своїй окремій стартовій позиції;

– показати можливість використання запропонованого алгоритму для мінімізації часу обльоту постів контролю АСКРО Запорізької АЕС.

Статтю організована наступним чином.

У другому розділі з урахуванням припущень і обмежень описуються етапи реалізації алгоритму визначення оптимального маршруту обльоту заданих точок території ПНО флотом БПЛА.

Третій розділ ілюструє варіант практичної реалізації запропонованого алгоритму для мінімізації часу обльоту постів контролю АСКРО Запорізької АЕС.

Останній розділ підсумовує результати і окреслює напрями подальших досліджень щодо застосування ЗКБ для мінімізації часу обльоту контрольних точок БПЛА флоту.

Таблиця 1

Фасетна класифікація задач комівояжера для маршрутизації польоту БПЛА

№	Код фасета	Розділ фасета	Опис
1	А		Класифікація ЗКБ за маршрутом обльоту заданих точок
		1	Із замкнутим маршрутом обльоту
		2	З розімкнутим маршрутом обльоту
2	В		Класифікація ЗКБ за кількістю БПЛА, що призначаються на один маршрут
		1	З одним БПЛА
		2	З групою (флотом) БПЛА
3	С		Класифікація ЗКБ за місцем розташування БПЛА
		1	Кожен БПЛА розташований на окремій стартовій позиції
		2	З БПЛА, розташованими на одній стартовій позиції
		3	Зі змішаним розташуванням БПЛА на стартових позиціях
4	D		Класифікація ЗКБ за однорідністю використовуваних БПЛА
		1	З однорідними БПЛА
		2	З неоднорідними БПЛА
5	Е		Класифікація ЗКБ за необхідністю дозаправки (підзарядки батареї) на маршруті
		1	Без необхідності дозаправки (підзарядки батареї)
		2	З необхідністю дозаправки (підзарядки батареї)
6	F		Класифікація ЗКБ за наявністю часових вікон на відвідування точок маршруту
		1	Без часових вікон на відвідування точок маршруту
		2	З часовими вікнами на відвідування всіх точок маршруту
		3	З часовими вікнами на відвідування частини точок маршруту
7	G		Класифікація ЗКБ за наявністю обмежень на час польоту за маршрутом
		1	Без обмежень на час польоту за маршрутом
		2	З обмеженнями на час польоту за маршрутом
8	H		Класифікація ЗКБ за методами (алгоритмами) пошуку оптимальних маршрутів
		1	Метод повного перебору
		2	Метод гілок і меж
		3	Метод узагальненого наведеного градієнту
		4	«Жадібний» алгоритм
		5	Мурашиний алгоритм
		6	Генетичний алгоритм
	7	Алгоритм імітації відпалу	

2. Алгоритм визначення оптимального маршруту обльоту заданих точок ПНО

2.1. Припущення та обмеження

Розглянемо загальний алгоритм визначення оптимального маршруту для флоту з ρ БПЛА, кожен з яких розташований на своїй стартовій позиції СПК, ($k = 1, \dots, \rho$). Введемо наступні припущення та обмеження.

1. Маршрут обльоту є замкнутим (початковою та кінцевою точкою маршруту є стартова позиція).

2. На маршрут може бути призначено не більше одного БПЛА флоту.

2. Час на виконання завдань необмежений.

3. Підготовку до вильоту проведено, обліт БПЛА може розпочинатися миттєво.

4. Заряду батареї (запасу палива) достатньо для виконання завдання без підзарядки (дозаправки).

5. Швидкість руху БПЛА є постійною і відповідає нижній межі діапазону швидкості, вказаній у льотно-технічних характеристиках на відповідний БПЛА.

2.2. Етапи реалізації алгоритму

З урахуванням обмежень та припущень алгоритм буде складатися з наступних етапів розрахунків.

Етап 1. Визначається оптимальний маршрут обльоту для кожного БПЛА та його протяжність R_k ($k = 1, \dots, \rho$) шляхом розв'язання замкнутої задачі комівояжера, яка передбачає знаходження $n(n-1)$ булевих змінних, котрі мінімізують маршрут обльоту, тобто забезпечують

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, i \neq j, \quad (1)$$

де d_{ij} – відстань між точками i та j маршруту.

Якщо $x_{ij} = 1$, то, рухаючись за маршрутом, БПЛА перелітає з точки i безпосередньо у точку j . Якщо $x_{ij} = 0$, то такий переліт не передбачений.

При цьому повинні бути виконані обмеження:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n; i \neq j, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n; i \neq j. \quad (3)$$

Обмеження встановлюють вимогу, що БПЛА повинен відвідати кожен з заданих точок тільки один раз.

Для отримання маршруту, що поєднує n точок маршруту, необхідно доповнити обмеження (1) – (3) умовами, що забезпечують зв'язність циклу:

$$u_i - u_j + px_{ij} \leq n - 1; u_i \geq 0; i, j = 1, \dots, n; i \neq j, \quad (4)$$

де u_i та u_j – додаткові змінні, які вказують номери відвідуваних точок маршруту.

Етап 2. Визначається час руху за кожним зі знайдених маршрутів:

$$T_k = \frac{R_k}{v_k}, \quad (5)$$

де v_k – швидкість руху за маршрутом БПЛА, для якого початковою-кінцевою точкою маршруту є СП $_k$.

Етап 3. Визначається мінімальний час руху серед усіх розрахованих часів руху:

$$T_{\min} = \min\{T_1, T_2, \dots, T_p\}. \quad (6)$$

Етап 4. Записується маршрут руху, що відповідає T_{\min} та наноситься на карту.

3. Результати застосування запропонованого алгоритму

3.1. Вихідні дані

Розглянемо практичне застосування запропонованого алгоритму.

Нехай у якості точок обльоту визначено 11 ПК АСКРО (на рис. 1 показані значком радіації, а у дужках вказані їх найменування у відповідності до [6]). Флот, що складається з 5 БПЛА, кожен з яких перебуває на своїй стартовій позиції СП $_k$, $k = 1, \dots, 5$ (показані у вигляді значка літака на рис. 1), повинен виділити один БПЛА, який найшвидше здійснить обліт заданих точок.

Пошук оптимального маршруту будемо здійснювати за допомогою методу узагальненого наведеного градієнту.

При цьому розглянемо два випадки:

1) на усіх п'яти стартових позиціях розташовані БПЛА однакової моделі «Лелека-100» (код ЗКБ згідно фасетної класифікації у таблиці 1: А.1–В.1–С.1–D.1–E.1–F.1–G.1–H.3);

2) розташування БПЛА на стартових позиціях задано таблицею 2. Для модифікацій моделі «R-100» перша цифра у дужках вказує кількість циліндрів, а друга – потужність двигуна у кінських силах (код ЗКБ згідно фасетної класифікації у таблиці 1: А.1–В.1–С.1–D.2–E.1–F.1–G.1–H.3).

Таблицею 3 задана матриця відстаней для маршруту з початковою-кінцевою точкою на СП1. Для решти маршрутів матриця відстаней буде відрізатися тільки першими двома рядками, тому для них таблиця подається у скороченій формі (таблиці 4-7).

Таблиця 2

Вихідні дані для другого випадку розташування БПЛА на стартових позиціях

Стартова позиція	Модель БПЛА	Швидкість, км/год
СП1	Лелека-100	40
СП2	R-100 (1; 2,5)	45
СП3	R-100 (2; 12)	70
СП4	R-100 (2; 3,5)	50
СП5	R-100 (1; 6)	60

3.2. Результати розрахунків та їх аналіз

Результати розрахунків подані:

- для випадку 1 – у таблиці 8 та на рис. 2;
- для випадку 2 – у таблиці 9 та на рис. 3.

На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки.

У разі використання БПЛА однієї моделі, або різних моделей з однаковою швидкістю польоту, найоптимальнішим за критерієм швидкості є найкоротший маршрут руху. Для запропонованих вихідних даних таким є маршрут з початковою-кінцевою точкою на СП1 (див. табл. 8). Час обльоту ПК складає 35,01 хвилин. Найгірші показники у часі подолання маршруту показує БПЛА, розташований на СП3 – 40,56 хвилин.

У разі використання флотом різних моделей БПЛА ключовим параметром, який у значній мірі впливає на визначення оптимального маршруту, є швидкість польоту БПЛА.

У випадку 2, як ми можемо бачити з таблиці 9, ситуація у порівнянні з випадком 1 (див. табл. 8) кардинально протилежна. Найшвидше (за 23,18 хвилин та за найдовшим маршрутом) обліт здійснює БПЛА, що стартує і повертається на СП3, а найповільніше (за 35,01 хвилин та за найкоротшим маршрутом) – БПЛА, що стартує і повертається на СП1. Тобто БПЛА «R-100 (2; 12)», переважаючи БПЛА «Лелека-100» за швидкістю на 30 км/год, долає на 3,7 км більш довший маршрут на 11,83 хвилин швидше.

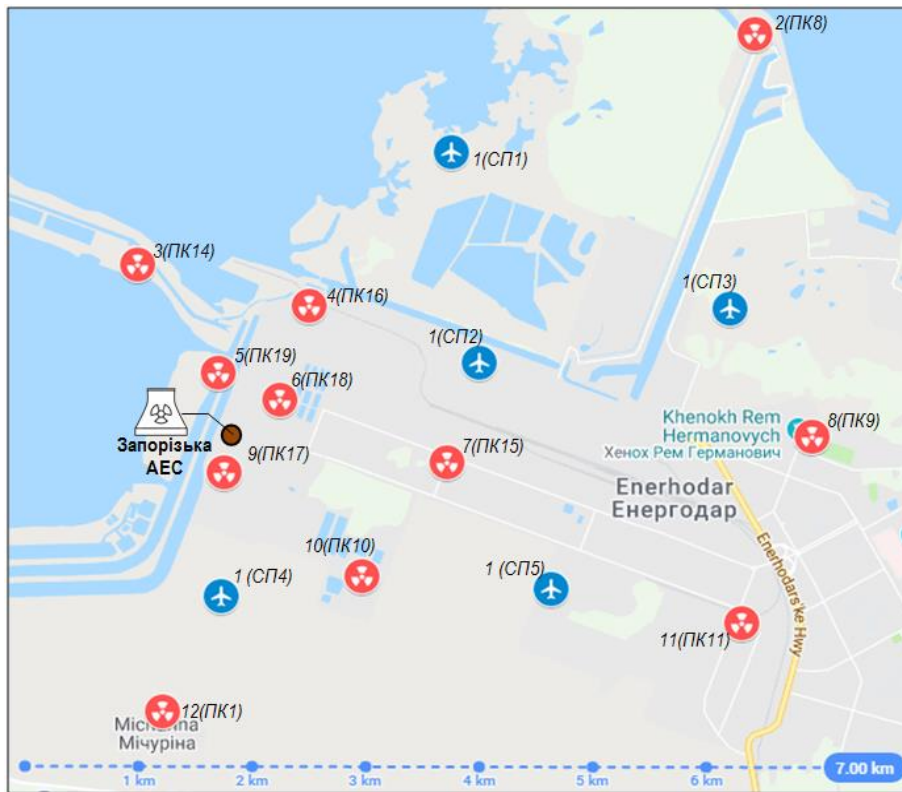


Рис. 1. Розташування постів контролю АСКРО Запорізької АЕС та стартових позицій БПЛА

Таблиця 3

Матриця відстаней (у кілометрах) для маршруту з початковою-кінцевою точкою на СП1

ij	1(СП1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1(СП1)	0	2,91	2,98	2,08	2,89	2,74	2,82	4,08	3,52	3,93	4,94	5,21
2	2,91	0	5,85	4,89	5,64	5,34	4,75	3,68	6,16	6,03	5,35	8,07
3	2,98	5,85	0	1,49	1,25	3,77	3,27	6,17	2,05	3,48	6,24	4,04
4	2,08	4,89	1,49	0	0,79	0,71	1,88	6,16	4,48	2,41	4,82	3,7
5	2,89	5,64	1,25	0,79	0	0,56	2,21	5,24	0,91	2,3	5,16	3,12
6	2,74	5,34	3,77	0,71	0,56	0	1,59	4,71	0,85	1,79	4,54	3,03
7	2,82	4,75	3,27	1,88	2,21	1,59	0	3,25	1,96	1,27	2,99	3,39
8	4,08	3,68	6,17	6,16	5,24	4,71	3,25	0	5,23	4,15	1,83	6,26
9	3,52	6,16	2,05	4,48	0,91	0,85	1,96	5,23	0	1,56	4,76	2,27
10	3,93	6,03	3,48	2,41	2,3	1,79	1,27	4,15	1,56	0	3,39	2,16
11	4,94	5,35	6,24	4,82	5,16	4,54	2,99	1,83	4,76	3,39	0	5,17
12	5,21	8,07	4,04	3,7	3,12	3,03	3,39	6,26	2,27	2,16	5,17	0

Таблиця 4

Матриця відстаней (у кілометрах) для маршруту з початковою-кінцевою точкою на СП2

ij	1(СП2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1(СП2)	0	3,84	3,14	1,59	2,31	1,79	0,95	3,03	2,46	2,23	3,31	4,22

Таблиця 5

Матриця відстаней (у кілометрах) для маршруту з початковою-кінцевою точкою на СП3

ij	1(СП3)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1(СП3)	0	2,48	5,23	3,71	4,53	4,05	2,86	1,37	4,71	4,04	2,85	6,19

Таблиця 6

Матриця відстаней (у кілометрах) для маршруту з початковою-кінцевою точкою на СП4

ij	1(СП4)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1(СП4)	0	6,92	3,16	2,75	2,02	1,86	2,31	5,39	1,12	1,27	4,57	1,16

Таблиця 7

Матриця відстаней (у кілометрах) для маршруту з початковою-кінцевою точкою на СП5

ij	1(СП5)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1(СП5)	0	5,35	4,69	3,36	3,53	2,94	1,48	2,68	3,06	1,69	1,7	3,59

Таблиця 8

Оптимальні маршрути руху з кожної стартової позиції, розташовані за швидкістю подолання маршруту, для першого варіанту розташування та використовуваних моделей БПЛА

№	Оптимальний маршрут обльоту	Модель БПЛА	Швидкість, км/год	Довжина маршруту, км	Час обльоту, хвилини
1	1(СП1)→2→8→11→7→10→12→9→6→5→3→4→1(СП1)	Лелека-100	40	23,34	35,01
2	1(СП2)→7→3→5→4→6→9→10→12→11→8→2→1(СП2)	Лелека-100	40	25,13	37,70
3	1(СП4)→7→4→3→5→6→9→10→12→11→8→2→1(СП4)	Лелека-100	40	25,65	38,48
4	1(СП5)→7→3→5→4→6→9→10→12→11→8→2→1(СП5)	Лелека-100	40	25,66	38,49
5	1(СП3)→7→3→5→4→6→9→10→12→11→8→2→1(СП3)	Лелека-100	40	27,04	40,56

Таблиця 9

Оптимальні маршрути руху з кожної стартової позиції, розташовані за швидкістю подолання маршруту, для другого варіанту розташування та використовуваних моделей БПЛА

№	Оптимальний маршрут обльоту	Модель БПЛА	Швидкість, км/год	Довжина маршруту, км	Час обльоту, хвилини
1	1(СП3)→7→3→5→4→6→9→10→12→11→8→2→1(СП3)	R-100 (2; 12)	70	27,04	23,18
2	1(СП5)→7→3→5→4→6→9→10→12→11→8→2→1(СП5)	R-100 (1; 6)	60	25,66	25,66
3	1(СП4)→7→4→3→5→6→9→10→12→11→8→2→1(СП4)	R-100 (2; 3,5)	50	25,65	30,78
4	1(СП2)→7→3→5→4→6→9→10→12→11→8→2→1(СП2)	R-100 (1; 2,5)	45	25,13	33,51
5	1(СП1)→2→8→11→7→10→12→9→6→5→3→4→1(СП1)	Лелека-100	40	23,34	35,01

4. Висновки

4.1. Результати

Ця стаття, узагальнюючи результати попередніх досліджень, пропонує восьмикритеріальну фасетну класифікацію задачі комівояжера з використанням БПЛА. Запропоновано алгоритм визначення оптимального маршруту обльоту постів контролю АСКРО як для випадку використання флотом однорідних, так і неоднорідних БПЛА. У першому випадку оптимальним є найкоротший маршрут з початковою-стартовою позицією на СП1. Для прийнятих вихідних даних у другому випадку оптимальним маршрутом обльоту постів контролю АСКРО є найдовший маршрут. Такий результат став можливим за рахунок значної переваги у швидкості (30 км/год) розташованого на СП3 БПЛА «R-100 (2; 12)» над БПЛА «Лелека-100», що розташований на СП1. Отримані результати

доцільно використовувати під час обґрунтування складу БПЛА флоту, моделювання його застосування, оцінки його цільової ефективності, а також для створення алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованих робочих місць операторів наземного пункту управління.

4.2. Напрями подальших досліджень

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробленні моделей на основі ЗКБ, які б враховували можливість дозаправки (підзарядки батареї) БПЛА на стаціонарних або рухомих постах під час руху за маршрутом. Крім того, однією із задач подальших досліджень може бути модифікація алгоритмів розв'язування описаних задач з урахуванням відмов внаслідок дії факторів агресивного середовища або активної протидії антидронів.

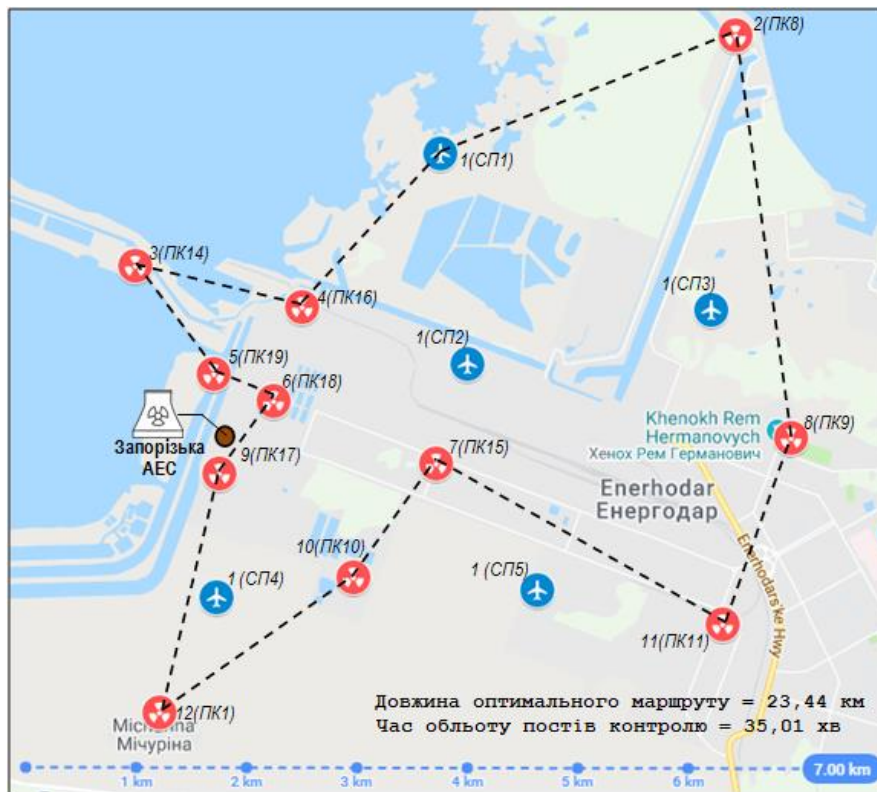


Рис. 2. Оптимальний маршрут руху для першого варіанту розташування та використовуваних моделей БПЛА

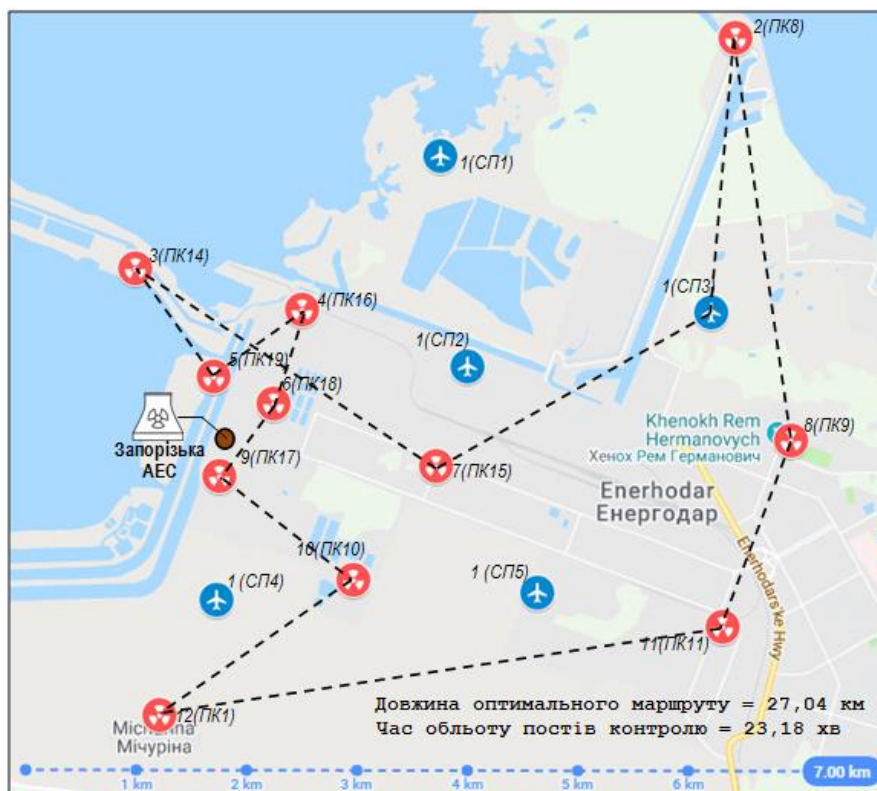


Рис. 3. Оптимальний маршрут руху для другого варіанту розташування та використовуваних моделей БПЛА

Література

1. Система послеварійного моніторингу АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения [Текст] / А. А. Саченко, В. В. Кочан, В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко, М. Э. Яновский // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017. – № 1(73). – С. 24–29.

2. Система послеварійного моніторингу АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: модели надежности [Текст] / В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко, А. А. Саченко, В. В. Кочан // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017. – № 4(76). – С. 50–55.

3. Fesenko, H. Optimal redistribution of UAVs in case of changing monitoring zones after a NPP accident [Text] / H. Fesenko // Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT) : Proc. 9th IEEE Int. Conf., Kyiv, Ukraine, 5-7 Jun. 2018. – Kyiv, 2018. – P. 48–52.

4. Фесенко, Г. В. Мінімізація часу початку виконання флотом безпілотних літальних апаратів завдання з радіаційного моніторингу в новій зоні відповідальності [Текст] / Г. В. Фесенко // Системи та технології. – 2019. – № 1(57). – С. 5–20.

5. Фесенко, Г. В. Модели надійності угруповань флотів БПЛА з ковзним резервуванням для моніторингу потенційно небезпечних об'єктів [Текст] / Г. В. Фесенко, В. С. Харченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – № 2(90). – С. 147–146. DOI: 10.32620/reks.2019.2.14.

6. Вестрон. АСКРО ЗАЭС. Техническое задание. ТЗ – ВН 702.410.34 [Текст]. – Харьков, 2011. – 22 с.

7. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разнородности задачи коммивояжера [Электронный ресурс] / Д. В. Моисеев, В. М. Чинь, Л. А. Мозолев, С. Г. Моисеева, Ф. С. Куен // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2015. – № 79. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55782>. – 10.08.2019.

8. Моисеев, Д. В. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра с учетом ограничения на продолжительность полета [Текст] / Д. В. Моисеев, В. М. Чинь // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – № 3 (17). – С. 206–209. DOI: 10.17587/mai/17.206-210.

9. Дмитриев, В. И. Оптимизация маршрута перемещения беспилотных летательных аппаратов с ретрансляторами радиосвязи [Текст] / В. И. Дмитриев, С. А. Грушевой // Вестник РГРТУ. – 2018. – № 63. – С. 64–67. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-64-68.

10. Иванов, А. А. Генетический алгоритм решения задачи коммивояжера для планирования маршрута беспилотного летательного аппарата [Текст] / А. А. Иванов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2016. – № 71. – С. 202–205.

11. Аллилуева, Н. В. Задача маршрутизации БПЛА на графе реперных точек [Текст] / Н. В. Аллилуева, Э. М. Руденко // I-methods. – 2018. – № 1 (10). – С. 5–18.

12. Минь, Ч. В. Планирование маршрута полета легкого беспилотного летательного аппарата с учетом действия ветра [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Чинь Ван Минь ; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва, 2017. – 22 с.

13. Sebbane, Y. B. Intelligent autonomy of UAVs: advanced missions and future use [Text] / Y. B. Sebbane. – CRC Press, 2018. – 404 p.

14. Murray, C. C. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery [Text] / C. C. Murray, A. G. Chu // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2015. – Vol. 54. – P. 86–109. DOI: 10.1016/j.trc.2015.03.005.

15. On the min-cost traveling salesman problem with drone [Text] / M. Q. Ha, Y. Deville, D. G. Pham, M. H. Hà // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2018. – Vol. 86. – P. 597–621. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.015.

16. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach [Text] / P. Kitjacharoenchai, M. Ventresca, M. Moshref-Javadi, S. Lee, J. A. Tanchoco, P. A. Brunese // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 129. – P. 14–30. DOI: 10.1016/j.cie.2019.01.020.

References

1. Sachenko, A. A., Kochan, V. V., Kharchenko, V. S., Yastrebenetskiy, M. A., Fesenko, G. V., Yanovskii, M. E. Sistema posleavariinogo monitoringa AES s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: kontseptsiya, printsipy postroeniya [NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: concept, design principles]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and Radiation Safety*, 2017, vol. 73, no. 1, pp. 24–29.

2. Kharchenko, V. S., Yastrebenetskiy, M. A., Fesenko, G. V., Sachenko, A. A., Kochan, V. V. Sistema posleavariinogo monitoringa AES s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: modeli nadezhnosti [NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: reliability models]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and Radiation Safety*, 2017, vol. 76, no. 4, pp. 50–55.

3. Fesenko, H. Optimal redistribution of UAVs in case of changing monitoring zones after a NPP accident. *9th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine, 5-7 June, 2018, pp. 48–52.

4. Fesenko, H. V. Minimizatsiya chasu pochatku vykonannya flotom bezpilotnykh lital'nykh aparativ zavdannya z radiatsiynoho monitorynhy v noviy zoni vidpovidal'nosti [Minimization of the waiting time to start performing a radiation monitoring mission via a fleet of unmanned aerial vehicles in the new zone of

responsibility]. *Systemy ta tekhnolohiyi – Systems and Technologies*, 2019, vol. 57, no. 1, pp. 5–20.

5. Fesenko, H. V., Kharchenko, V. S. Modeli nadiynosti uhrupovan' flotiv BPLA z kovzным rezervuvanniam dlya monitorynhu potentsiyno nebezpechnykh ob'yektiv [Reliability models of UAV fleet groups with k-out-of-n redundancy for monitoring of potentially dangerous objects]. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy – Radioelectronic and Computer Systems*, 2019, vol. 90, no. 2, pp. 147–146. DOI: 10.32620/reks.2019.2.14.

6. Vestron. ASKRO ZAES. Tekhnicheskoe zadanie. TZ – VN 702.410.34 [Vestron. ZNPP ARSMS. Technical decision. TZ – VN 702.410.34]. Kharkiv, 2011. 22 p.

7. Moiseev, D. V., Chin', V. M., Mozolev, L. A., Moiseeva, S. G., Kuen, F. S. Marshrutizatsiya poleta legkogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v pole postoyannogo vetra na osnove resheniya raznovidnosti zadachi kommivoyazhera [Flight routing of lightweight unmanned aerial vehicle in a constant wind field on the basis of the decision of species of the traveling salesman problem]. *Elektronnyi zhurnal «Trudi MAI» – Electronic journal of Moscow Aviation Institute Transactions*, 2015, no. 79. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55782> (accessed 10.08.2019).

8. Moiseev, D. V., Chin', V. M. Marshrutizatsiya poleta legkogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v pole postoyannogo vetra s uchetom ogranicheniya na prodolzhitel'nost' poleta [Flight routing of a light unmanned aerial vehicle in a constant wind field with account of constraint on the flight duration]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 206–209. DOI: 10.17587/mau/17.206-210.

9. Dmitriev, V. I., Grushevoi, S. A. Optimizatsiya marshruta peremeshcheniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov s retranslyatorami radiosvyazi [Optimizing the route of unmanned aerial vehicles with

radiorepeaters]. *Vestnik RGRU – RSRU Bulletin*, 2018, no. 63, pp. 64–67. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-64-68.

10. Ivanov, A. A. Geneticheskii algoritm resheniya zadachi kommivoyazhera dlya planirovaniya marshruta bespilotnogo letatel'nogo apparata [The genetic algorithm for solving the traveling salesman problem for UAV flight routing]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii – Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2016, no. 71, pp. 202–205.

11. Allilueva, N. V., Rudenko, E. M. Zadacha marshrutizatsii BPLA na grafe repernykh tochek [A UAV routing problem on the graph of reference points]. *I-methods*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 5–18.

12. Min', Ch. V. Planirovanie marshruta poleta legkogo bespilotnogo letatel'nogo apparata s uchetom deistviya vetra. Avtoref. Kand. Diss. [Light unmanned aerial vehicle flight planning taking into account wind action. PhD Diss. Rep.]. Moscow, 2017. 22 p.

13. Sebbane, Y. B. *Intelligent autonomy of UAVs: advanced missions and future use*, CRC Press, 2018. 404 p.

14. 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, pp. 86–109. DOI: 10.1016/j.trc.2015.03.005

15. Ha, M. Q., Deville, Y., Pham, D. G., Ha, M. H. On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, vol. 86, pp. 597–621. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.015.

16. Kitjacharoenchai, P., Ventresca, M., Moshref-Javadi, M., Lee, S., Tanchoco, J. A., Brunese, P. A. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, vol. 129, pp. 14–30. DOI: 10.1016/j.cie.2019.01.020.

Надійшла до редакції 7.09.2019, розглянута на редколегії 23.09.2019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ОБЛЕТА ЗАДАНЫХ ТОЧЕК ТЕРРИТОРИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО ОБЪЕКТА ФЛОТОМ БПЛА

Г. В. Фесенко, В. С. Харченко

Актуальность. Одной из задач мониторинга атомных электростанций и других потенциально опасных объектов с привлечением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является облет заданных точек территории таких объектов. Поиск оптимальных маршрутов очень часто предполагает решение различных вариантов задачи коммивояжера. Однако, в случае существования нескольких стартовых позиций возникает необходимость решения задачи коммивояжера для каждого варианта старта БПЛА (каждого варианта начальной-конечной точки маршрута). **Предметом** исследования является процесс минимизации времени облета заданных точек территории потенциально опасного объекта с учетом мест размещения и используемых моделей БПЛА флота. **Задачи:** разработать алгоритм определения оптимального маршрута облета заданных точек территории потенциально опасного объекта для флота, каждый БПЛА которого находится на своей отдельной стартовой позиции; показать возможность использования предложенного алгоритма для минимизации времени облета постов контроля автоматизированной системы контроля радиационной обстановки Запорожской атомной станции. Используемыми **методами** являются: теория графов, математические модели оптимизации, методы решения задачи коммивояжера. Получены следующие **результаты.** Предложена фасетная классификация задач коммивояжера для маршрутизации полета БПЛА; описаны этапы алгоритма определения оптимального маршрута облета заданных точек территории потенциально опасного объекта флотом БПЛА; решена задача определения самого быстрого облета 11 постов контроля автоматизированной системы контроля радиационной обстановки Запорожской

атомной станции для двух случаев: 1) на всех стартовых позициях находятся БПЛА «Лелека-100», 2) на первой стартовой позиции находится БПЛА «Лелека-100», на остальных - различные модификации модели «R-100». Показаны изменения в оптимальном маршруте при изменении моделей и скоростей БПЛА. **Выводы.** Полученные результаты целесообразно использовать при обосновании состава БПЛА флота, моделировании его применения, оценки его целевой эффективности, а также для создания алгоритмического и программного обеспечения автоматизированных рабочих мест операторов наземного пункта управления. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке моделей, которые бы учитывали возможность дозаправки (подзарядки батареи) БПЛА на стационарных или подвижных постах во время движения по маршруту.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; потенциально опасный объект; задача коммивояжера; маршрутизация полета; стартовая позиция; автоматизированная система контроля радиационной обстановки; пост контроля.

DETERMINATION OF AN OPTIMAL ROUTE FOR FLIGHT OVER OF SPECIFIED POINTS OF A POTENTIALLY DANGEROUS OBJECT TERRITORY BY UAV FLEET

H. V. Fesenko, V. S. Kharchenko

Motivation. One of the tasks of nuclear power plants and other potentially dangerous objects monitoring employing unmanned aerial vehicles (UAV) is flying over specified points of the territory of such objects. Finding the optimum routes often involves different options for the traveling salesman problem solving. However, if there are multiple starting positions, there is a need to solve the traveling salesman problem for each variant of the UAV start (for each variant of the start-end point of the route). The **subject matter** of the paper is the process of minimizing the flight time of visiting the specified points of the potentially dangerous object territory, taking into account the locations and models of the UAV fleet. **The tasks to be solved** are: to develop an algorithm for determining the optimal route for flight over of the given points of the potentially dangerous object territory for the fleet, each UAV of which is at its separate starting position; to show the possibility of using the proposed algorithm to minimize the flight time for visiting all of the appointed control posts of the automated radiation situation monitoring system for Zaporizhzhia nuclear power plant. **The methods used** are: graph theory, mathematical optimization models, methods for solving the traveling salesman problem. The following **results** were obtained. The faceted classification of the traveling salesman problem for UAV flight routing is offered. The steps of the algorithm for determining the optimal route of flight over of the specified points of the potentially dangerous object territory by the UAV fleet are described. The problem of determining the fastest flight over of 11 control posts of the automated radiation monitoring system for Zaporizhzhia nuclear power plant is solved for two cases: 1) UAV "Leleka-100" are at all starting positions, 2) UAV "Leleka-100" is at the first starting position, various modifications of the model "R-100" are at the rest starting position. Changes in the optimal route when changing UAV models and speeds are shown. **Conclusions.** The results obtained should be used to justify the composition of the UAV fleet, simulate its application, evaluate its target effectiveness, as well as to create algorithmic support and software for ground control station operators' work places. Further research should focus on developing models that take into account the possibility of refueling UAVs or recharging their batteries at stationary or moving posts while being on a route.

Keywords: unmanned aerial vehicle; potentially dangerous object; traveling salesman problem; flight routing; starting position; automated radiation monitoring system; control post.

Фесенко Герман Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Харченко Вячеслав Сергійович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Fesenko Herman Viktorovych – PhD, Associate Professor at the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: h.fesenko@csn.khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-4084-2101, Scopus Author ID: 57190123735, ResearcherID: H-7875-2018, <https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=Pz4v4UIAAAAJ>

Kharchenko Vyacheslav Serhiiovych – DrS on Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-5352-077X, Scopus Author ID: 22034616000, ResearcherID: A-7719-2017, <https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=FQ4dH4EAAAAJ>