

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-2-58-3>
УДК 629.7.014:519.854.33

Г. В. Фесенко, кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних систем,
мереж і кібербезпеки Національного
аерокосмічного університету
ім. М. Є. Жуковського "Харківський
авіаційний інститут"

МАРШРУТИЗАЦІЯ ПОЛЬОТУ МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ПОВІТРЯНОЇ АВТОМАТИЧНОЇ СЕРВІСНОЇ СТАНЦІЇ ПІД ЧАС МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЇ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБ'ЄКТА

Розроблено підхід до визначення оптимальної маршрутизації польоту мультироторного БПЛА з використанням повітряної автоматичної сервісної станції (ПАСС). Наведено приклад застосування запропонованого підходу для організації моніторингу 11 постів контролю Запорізької АЕС. Розраховано шляхом розв'язання задачі комівояжера та позначено на карті найкоротший маршрут обльоту БПЛА заданих точок моніторингу. Визначено місця заміни батарей та маршрут руху до цих місць ПАСС. Складено спільний графік руху за маршрутом БПЛА та ПАСС, а також окремий графік руху ПАСС.

Ключові слова: мультироторний безпілотний літальний апарат; повітряна автоматична сервісна станція; моніторинг; потенційно небезпечний об'єкт; задача комівояжера.

Разработан подход по определению оптимальной маршрутизации полета мультироторного БПЛА с использованием воздушной автоматической сервисной станции (ВАСС). Приведен пример применения предложенного подхода для организации мониторинга 11 постов контроля Запорожской АЭС. Рассчитан путем решения задачи коммивояжера и обозначен на карте кратчайший маршрут облета БПЛА заданных точек мониторинга. Определены места замены батарей и маршрут движения к этим местам ВАСС. Составлен совместный график движения по маршруту БПЛА и ВАСС, а также отдельный график движения ВАСС.

Ключевые слова: мультироторный беспилотный летательный аппарат; воздушная автоматическая сервисная станция; мониторинг; потенциально опасный объект; задача коммивояжера.

© Г. В. Фесенко, 2019

Multi-rotor UAVs have advantages over other UAVs because of their capability of hovering, which is essential to guarantee more accuracy of the given parameters measurement when performing monitoring missions. However, such UAVs have low battery life and should be able to replace or recharge their batteries on the route. The paper is devoted to the development of an approach to determine the optimal routing of a multi-rotor UAV, which uses an airborne automatic service station (AASS) for its batteries replacement. On the basis of the analysis of the peculiarities of the use of automatic service stations, a faceted classification one of their types – automatic energy recovery stations – was proposed. The following classification features were used: principle of operation, method of replenishment of energy, method of recharging, type of basing, type of construction, number of places for simultaneous UAV service. The example of application of the proposed approach for monitoring of 11 control posts of Zaporizhzhia NPP is given. The DJI Mavic 2 Enterprise Dual UAV, which travels at a speed of 40 km/h and has a battery life of 31 minutes, was selected for the monitoring mission. The AASS based on the SL-231 Scout helicopter, which travels at 100 km/h and is capable of operating in unmanned mode, was used to replace the UAV batteries on the route. The following results were obtained: the shortest flight route to visit all the specified monitoring points calculated by solving the traveling salesman problem and indicated on the map; a compatible UAV and AASS route schedule; a separate AASS route schedule. The total time of the UAV monitoring mission and the total time of the AASS mission to ensure the replacement of the UAV batteries were calculated. The proposed approach and the software developed for its implementation can be used by ground control station operators to develop optimal routes for the joint use of UAVs and AASS while monitoring the specified points of potentially dangerous objects. Further studies should include options for monitoring the specified points of potentially dangerous objects by UAV and AASS fleets for reducing the overall monitoring mission time.

Key words: multi-rotor unmanned aerial vehicle; airborne automatic service station; monitoring; potentially dangerous object; traveling salesman problem.

Постановка проблеми. Останнім часом безпілотні літальні апарати (далі – БПЛА) все частіше розглядаються як ефективний інструмент до- та післяаварійного моніторингу атомних електростанцій (далі – АЕС), інших потенційно небезпечних об'єктів (далі – ПНО). Різноманіття завдань, до виконання яких залучаються БПЛА, варіюється від радіаційних вимірювань та складання карт радіоактивності до створення багатOVERсійної системи післяаварійного моніторингу, яка базується на технології інтернета дронів (Internet-of-Drones) [1–5].

Ряд таких завдань передбачає обліт заданих точок території ПНО, наприклад постів контролю (далі – ПК) автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (далі – АСКРО) АЕС [6], з якими втрачено радіо- та дотовий зв'язок. Метою обльоту в цьому випадку може бути:

– установлення ступеня пошкоджень постів для розрахунку сил і засобів щодо їх відновлення;

– визначення потужності дози гамма-випромінювання в місцях їхнього розташування для розрахунку часу ослаблення радіаційного фону до рівня, необхідного для безпечного проведення аварійно-відновлювальних робіт;

– зчитування інформації, накопиченої постами до моменту втрати з ними зв'язку з метою її подальшої передачі у кризовий центр.

Дуже часто для обльоту заданих точок застосовуються БПЛА мультироторного типу, оскільки порівняно з БПЛА літакового типу вони мають такі переваги:

– можуть зависати над заданою точкою, забезпечуючи якісніше знімання інформації та моніторинг об'єкта контролю;

– не потребують обладнаного спеціального майданчика для злету-посадки, а також застосування спеціальних засобів пуску (катапульт) і посадки (парашутів).

Утім БПЛА мультироторного типу мають, як правило, менший час тривалого польоту порівняно з БПЛА літакового типу, а отже, часто потребують підзарядки (заміни) батареї під час виконання польотного завдання. Така підзарядка (заміна) може бути здійснена двома основними способами:

1) на стартовій позиції, куди БПЛА повинен повернутися;

2) на визначеній точці маршруту за допомогою автоматичної сервісної станції (далі – АСС).

Перший спосіб унеможливує обліт усього переліку зазначених точок без відхилення від маршруту і потребує значної перерви у виконанні польотного завдання, тоді як другий спосіб дозволяє повністю дотримуватися визначеного маршруту, роблячи невеличкі перерви (близько 2 хв) для підзарядки (заміни) батареї на АСС.

Отже, другий спосіб заміни (підзарядки) батареї більш конкурентний і забезпечить виконання польотного завдання за коротший час.

Крім того, наявність АСС на визначеному місці підзарядки (заміни) батареї дозволяє за потреби забезпечити додатково поточний ремонт БПЛА або заміну БПЛА на новий, а в разі розташування АСС на рухомому транспортному засобі – ще й евакуацію БПЛА.

Таким чином, актуальним є завдання оптимальної маршрутизації польоту мультироторного БПЛА з використанням АСС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дуже детально АСС розглянуто у [7]. Автори приділили значну увагу автоматичним енерговідновлювальним станціям (далі – АЕВС), які є реалізаціями АСС, що не передбачають інших сервісних функцій, крім поновлення енергії живлення силової установки БПЛА.

Базуючись на даних [7], з метою формалізації опису моделей розв'язання задач маршрутизації пропонується фасетна класифікація АЕВС для БПЛА з електричною силовою установкою (табл. 1).

Фасетна класифікація АЕВС як реалізації АСС

№	Код фасета	Розділ фасета	Опис
1	2	3	4
1	A		Класифікація за принципом функціонування
		1	Автоматичні зарядні станції (АЗС) – станції для автоматичної підзарядки бортових акумуляторних батарей без зняття їх з БПЛА
		2	Автоматичні обмінні станції (АОС) – станції для автоматичної заміни відпрацьованих бортових батарей, що не перезаряджаються, або паливних картриджів (балонів) на нові
		3	Автоматичні обмінно-зарядні станції (АОЗС) – станції для автоматичної швидкої заміни бортових батарей, що перезаряджаються, з їх подальшою зарядкою
2	B		Класифікація за способом поповнення енергії
		1	Заміна батарей
		2	Підзарядка батарей
3	C		Класифікація за способом підзарядки
		1	Контактні з роз'ємними з'єднувачами
		2	Контактні з відкритими контактами
		3	Безконтактні зі зв'язаними коливальними контурами
		4	Безконтактні з ємнісним зв'язком
		5	Безконтактні із живленням від ліній електропередач
4	D		Класифікація за типом базування
		1	Стаціонарні
		2	Мобільні
		3	Такі, що розгортаються
5	E		Класифікація за типом конструкції
		1	Відкрита платформа
		2	Закрита конструкція
		3	Окремий термінал
6	F		Класифікація за кількістю місць для одночасного обслуговування БПЛА
		1	Одномісні
		2	Багатомісні

Роботи щодо розв'язання проблеми маршрутизації БПЛА з обмеженою кількістю заряду батареї (палива) можна поділити на дві основні групи:

- 1) роботи, де розглядається використання стаціонарних АСС [8; 9];
- 2) роботи, де розглядається використання як стаціонарних, так і рухомих АСС [10–12].

У статті [8] запропоновано визначити маршрут обльоту одним БПЛА всіх установлених для нього цілей, щоб відвідати якнайменше наземних місць дозаправлення з найменшими витратами палива.

Автори [9] пропонують підхід до визначення мінімальної кількості БПЛА, які, потребуючи періодичного повернення на станцію підзарядки, забезпечили б безперервну роботу бездротової мережі та дистанційний моніторинг місць руйнувань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

У праці [10] автори розробили й порівняли підходи до змішаного цілечислового програмування та динамічного програмування для розв'язання проблеми маршрутизації літального апарата зі встановленою ємністю пального та підмножиною точок, в яких повітряне судно можна поповнити паливом у повітрі. Обидва підходи передбачали мінімізацію зваженої комбінації пройденої відстані та кількості необхідних операцій, що стосуються заправки.

У [11] авторами запропоновано стратегію на основі скупого алгоритму для організації взаємодії мобільної зарядної станції на базі безпілотного наземного транспортного засобу, стаціонарних постів підзарядки батарей і БПЛА з метою успішного виконання завдань на заданому маршруті. Для тестування та підтвердження своєї стратегії автори наводять результати як застосування імітаційної моделі в Matlab, так і польових експериментів із використанням БПЛА мультироторного типу (квадрокоптера).

Праця [12] значно розширює можливості стратегії, запропонованої в [11], оскільки пропонує підхід з використанням декількох безпілотних наземних транспортних засобів із розміщеними на них АСС.

Однак запропоновані стратегії передбачають підзарядку (заправку паливом) або на стаціонарних постах, або за допомогою наземного транспортного засобу. Пропонуємо використовувати мобільну повітряну АСС (ПАСС) на базі вертольота, що може застосовуватись як у пілотованому, так і безпілотному режимах (у разі перевищення допустимого рівня радіоактивного забруднення навколишнього середовища).

Мета статті – розробка підходу до визначення оптимальної маршрутизації польоту мультироторного БПЛА з використанням повітряної автоматичної сервісної станції.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо таку задачу.

Задано:

1. 11 точок моніторингу (обльоту), якими виступають 11 ПК АСКРО Запорізької АЕС (на рис. 1 позначені значком радіації та вказані їхні фактичні найменування відповідно до [6]).

2. Стартова позиція для БПЛА DJI Mavic 2 Enterprise Dual мультироторного типу (рис. 1) позначена значком БПЛА та написом “СП1”).

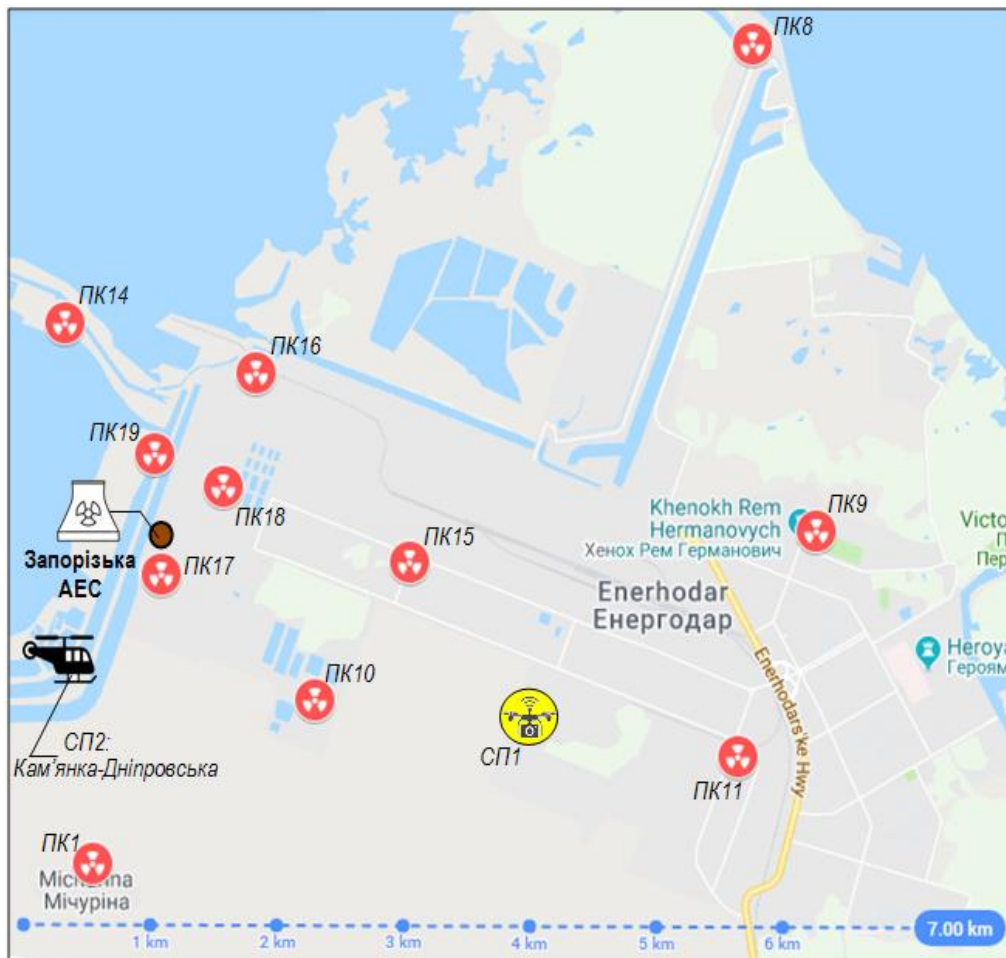


Рис. 1. Точки моніторингу (пости контролю АСКРО Запорізької АЕС) та стартові позиції БПЛА DJI Mavic 2 Enterprise Dual і ПАСС на базі вертольота SL-231 Scout

3. Стартова позиція (СП2) для ПАСС на базі вертольота SL-231 Scout (являє собою АЕВС з кодом А3-В1-С2-Д2-Е2-Ф1 відповідно до фасетної класифікації, поданої в табл. 1), яка розташована у населеному пункті Кам'янка-Дніпровська (на рис. 1 сама СП2 не показана, але разом зі значком “Вертоліт” зазначено її місце розташування за допомогою напису: “СП2: Кам'янка-Дніпровська”).

4. Матриця відстаней між точками маршруту (табл. 2).

Матриця відстаней між точками маршруту, км

Точки	СП1	ПК8	ПК14	ПК16	ПК19	ПК18	ПК15	ПК9	ПК17	ПК10	ПК11	ПК1
СП1	0	5,35	4,69	3,36	3,53	2,94	1,48	2,68	3,06	1,69	1,7	3,59
ПК8	5,35	0	5,85	4,89	5,64	5,34	4,75	3,68	6,16	6,03	5,35	8,07
ПК14	4,69	5,85	0	1,49	1,25	3,77	3,27	6,17	2,05	3,48	6,24	4,04
ПК16	3,36	4,89	1,49	0	0,79	0,71	1,88	6,16	4,48	2,41	4,82	3,7
ПК19	3,53	5,64	1,25	0,79	0	0,56	2,21	5,24	0,91	2,3	5,16	3,12
ПК18	2,94	5,34	3,77	0,71	0,56	0	1,59	4,71	0,85	1,79	4,54	3,03
ПК15	1,48	4,75	3,27	1,88	2,21	1,59	0	3,25	1,96	1,27	2,99	3,39
ПК9	2,68	3,68	6,17	6,16	5,24	4,71	3,25	0	5,23	4,15	1,83	6,26
ПК17	3,06	6,16	2,05	4,48	0,91	0,85	1,96	5,23	0	1,56	4,76	2,27
ПК10	1,69	6,03	3,48	2,41	2,3	1,79	1,27	4,15	1,56	0	3,39	2,16
ПК11	1,7	5,35	6,24	4,82	5,16	4,54	2,99	1,83	4,76	3,39	0	5,17
ПК1	3,59	8,07	4,04	3,7	3,12	3,03	3,39	6,26	2,27	2,16	5,17	0

5. Значення інших параметрів, необхідних для проведення подальших розрахунків (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри, необхідні для проведення розрахунків

Назва параметра, його позначення та розмірність	Значення параметра
Час відбуття БПЛА і СП1 (точки 1) $T_{e(1)}^{БПЛА}$ (год/хв)	11:00
Тривалість моніторингу t_m , (хв)	3
Тривалість заміни батареї $t_{зб}$, (хв)	2
Швидкість БПЛА DJI Mavic 2 Enterprise Dual $V_{БПЛА}$, км/год	40
Швидкість ПАСС на базі вертольота SL-231 Scout $V_{ПАСС}$, км/год	100
Ресурс батареї БПЛА в момент вильоту і СП1 (точки 1) $t_{прб(1)}^{БПЛА}$, хв	31

Необхідно:

1. Визначити і позначити на карті найкоротший маршрут обльоту БПЛА заданих точок моніторингу з початковою/кінцевою точкою маршруту на СП1.

2. Визначити і позначити на карті місця заміни батарей (далі – МЗБ) з використанням ПАСС.

3. Визначити і позначити на карті маршрут руху ПАСС з початковою/кінцевою точкою маршруту на СП2.

4. Скласти матрицю відстаней між СП2 та визначеними МЗБ.

5. Скласти спільний графік руху за маршрутом БПЛА та ПАСС та окремий графік руху для ПАСС.

6. Визначити загальний час руху за маршрутом БПЛА.

7. Визначити загальний час руху за маршрутом ПАСС.

Приймемо такі припущення та обмеження.

1. Найкоротший маршрут обльоту заданих точок визначається шляхом розв'язання задачі комівояжера методом узагальненого наведеного градієнта.

2. Місця для заміни батареї обладнуються виключно на точках моніторингу (постах контролю).

3. Батарея замінюється тільки після виконання БПЛА моніторингу поточної точки маршруту.

4. Алгоритм визначення місць заміни батареї показано на рис. 2:

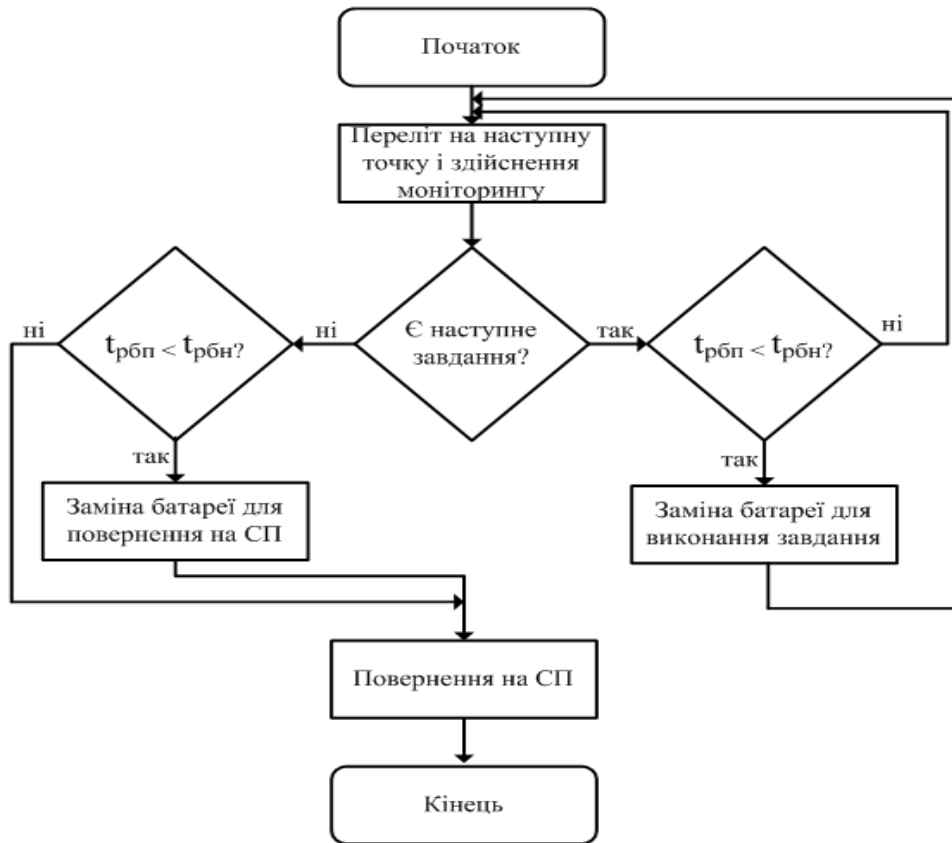


Рис. 2. Алгоритм визначення місць заміни батареї

де $t_{р\text{обн}}$ – поточний часовий ресурс батареї в момент закінчення моніторингу поточної точки, хв;

$t_{р\text{бн}}$ – часовий ресурс батареї, необхідний для перельоту до іншої точки маршруту і здійснення її моніторингу або для повернення на СП1, хв.

5. ПАСС повинна прибувати до потрібної точки, тобто МЗБ, щонайменше за 2 хв до закінчення виконання БПЛА її моніторингу.

6. ПАСС повинна залишати точку, що є МЗБ, через 2 хв після вильоту БПЛА з неї.

7. Після виконання всіх завдань БПЛА та ПАСС повинні повернутися на свої стартові позиції (СП1 та СП2 відповідно).

Наведемо та проаналізуємо результати розрахунків.

1. Найкоротший маршрут обльоту заданих точок моніторингу (пронумеровані у порядку їх проходження) з початковою/кінцевою точкою маршруту БПЛА на СП1 зображено на рис. 3 пунктирними стрілками.

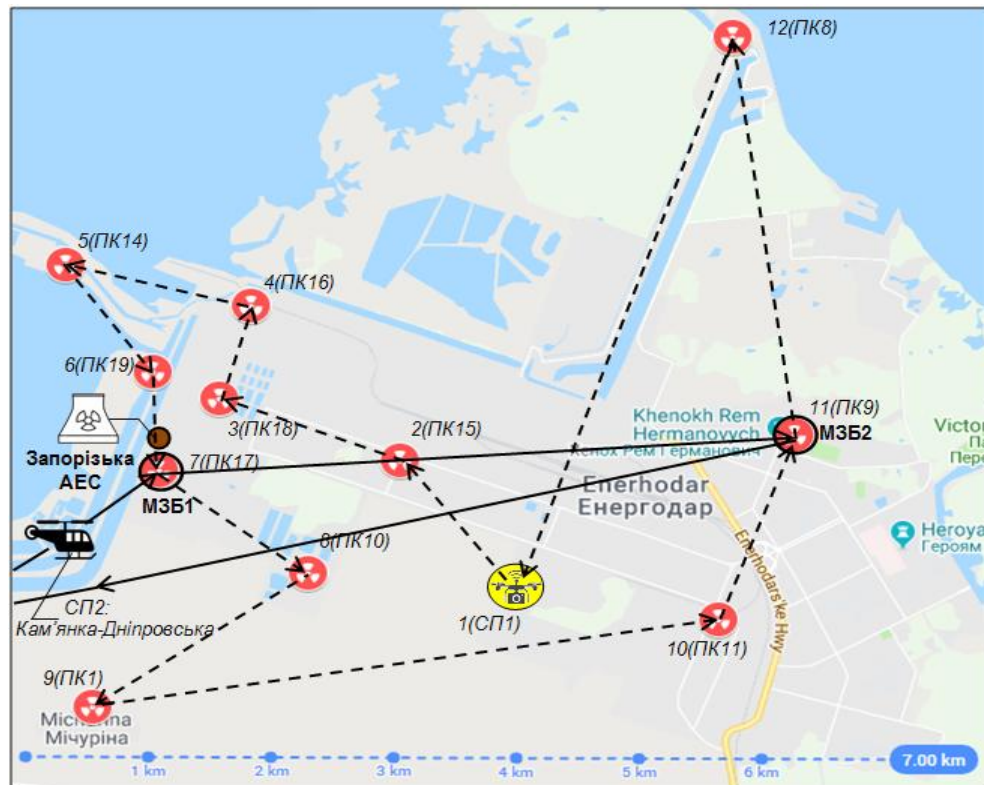


Рис. 3. Найкоротший маршрут обльоту БПЛА заданих точок моніторингу з початковою/кінцевою точкою маршруту на СП1, місця заміни батарей та маршрут руху ПАСС

2. Місця заміни батарей, що визначені згідно із запропонованим алгоритмом (рис. 2), позначені на рис. 3 значком радіації, обведеним суцільною лінією, та підписані “МЗБ” з відповідним номером.

3. Маршрут руху ПАСС із початковою/кінцевою точкою маршруту на СП2 зображено на рис. 3 суцільними стрілками.

4. Матрицю відстаней між СП2 та визначеними МЗБ подано в табл. 4.

Таблиця 4

Матриця відстаней між СП2 та визначеними МЗБ, км

Точки	МЗБ1	МЗБ2
СП2	14,7	18,8

5. Спільний графік руху за маршрутом БПЛА та ПАСС подано у вигляді табл. 5, а окремий графік для ПАСС – у табл. 6.

Таблиця 5

Спільний графік руху за маршрутом БПЛА та ПАСС

№ точки (i)	Літальний апарат	$T_{n(i)}^{БПЛА}$ ($T_{n(i)}^{ПАСС}$), год/хв	t_m , хв	$t_{зб}$, хв	$t_{\Sigma(i)}^{БПЛА}$ ($t_{\Sigma(i)}^{ПАСС}$), хв	$T_{e(i)}^{БПЛА}$ ($T_{e(i)}^{ПАСС}$), год/хв	$t_{нрб(1)}$, хв
1(СП1)	БПЛА	–	–	–	–	11:00	31
2(ПК15)	БПЛА	11:02	3	0	3	11:05	26
3(ПК18)	БПЛА	11:07	3	0	3	11:10	21
4(ПК16)	БПЛА	11:11	3	0	3	11:14	17
5(ПК14)	БПЛА	11:16	3	0	3	11:19	12
6(ПК19)	БПЛА	11:21	3	0	3	11:24	7
7(ПК17) (МЗБ1)	БПЛА	11:25	3	2	5	11:30	3→31
	ПАСС	11:26	–	–	6	11:32	–
8(ПК10)	БПЛА	11:33	3	0	3	11:35	26
9(ПК1)	БПЛА	11:38	3	0	3	11:41	20
10(ПК11)	БПЛА	11:49	3	0	3	11:52	9
11(ПК9) (МЗБ2)	БПЛА	11:55	3	2	5	12:00	3→31
	ПАСС	11:35	–	–	27	12:02	–
12(ПК8)	БПЛА	12:06	3	0	3	12:09	22
1(СП1)	БПЛА	12:17	–	–	–	–	14

Окремий графік для ПАСС

Точка маршруту	Літальний апарат	$T_{n(МЗБj)}^{ПАСС}$ ($T_{n(СП2)}^{ПАСС}$), год/хв	$t_{\Sigma(МЗБj)}^{ПАСС}$, хв	$T_{\epsilon(СП2)}^{ПАСС}$ ($T_{\epsilon(МЗБj)}^{ПАСС}$), год/хв
СП2	ПАСС	–	–	11:17
7 (МЗБ1)	ПАСС	11:26	6	11:32
11 (МЗБ2)	ПАСС	11:35	27	12:02
СП2	ПАСС	12:13	–	–

Для розрахунку параметрів, поданих у табл. 5 та 6, було використано формули (1–11), які наведено нижче.

5.1. Фактичний час прибуття БПЛА у точку маршруту $i+1$ ($i = 1, \dots, n$; n – кількість точок моніторингу (постів контролю); у нашому випадку $n = 11$):

$$T_{n(i+1)}^{БПЛА} = T_{\epsilon(i)}^{БПЛА} + \frac{R_{i,i+1}}{v_{БПЛА}} \text{ (хв)}, \quad (1)$$

де $R_{i,i+1}$ – відстань між точками маршруту i та $i+1$, визначена за табл. 2.

5.2. Фактичний час вильоту ПАСС з СП2:

$$T_{\epsilon(СП2)}^{ПАСС} = T_{n(МЗБ1)}^{БПЛА} + t_m - 2 - 60 \frac{R_{СП2,МЗБ1}}{v_{ПАСС}} \text{ (год/хв)}, \quad (2)$$

де: $T_{n(МЗБ1)}^{БПЛА} = T_{n(7)}^{БПЛА}$ – фактичний час прибуття БПЛА до МЗБ1 (у точку 7 (ПК17)), розрахований за формулою (1);

$R_{СП2,МЗБ1}$ – відстань між СП2 та МЗБ1, визначена за табл. 4.

5.3. Фактичний час прибуття ПАСС до МЗБ1:

$$T_{n(МЗБ1)}^{ПАСС} = T_{\epsilon(СП2)}^{ПАСС} + 60 \frac{R_{СП2,МЗБ1}}{v_{ПАСС}} \text{ (год/хв)}. \quad (3)$$

5.4. Тривалість перебування ПАСС на МЗБ j ($j=1, \dots, k$; k – кількість МЗБ; у нашому випадку $k = 2$):

$$t_{\Sigma(MZBj)}^{ПАСС} = t_m + t_{зб} + 4 \text{ (хв)}. \quad (4)$$

5.5. Фактичний час вильоту ПАСС з МЗБ j

$$T_{в(MZBj)}^{ПАСС} = T_{n(MZBj)}^{ПАСС} + t_{\Sigma}^{ПАСС} \text{ (хв)}. \quad (5)$$

5.6. Фактичний час прибуття ПАСС до МЗБ($j+1$):

$$T_{n(MZB(j+1))}^{ПАСС} = T_{в(MZBj)}^{ПАСС} + 60 \frac{R_{MZBj, MZB(j+1)}}{v_{ПАСС}} \text{ (ГОД/ХВ)}, \quad (6)$$

де: $R_{MZBj, MZB(j+1)}$ – відстань між МЗБ j та МЗБ($j+1$), визначена за табл. 2 (відстань між ПК17 і ПК9).

5.7. Тривалість перебування БПЛА у точці маршруту $i+1$:

$$t_{\Sigma(i+1)}^{БПЛА} = \begin{cases} t_m, \text{ якщо } (i+1) \neq MZBj; \\ t_m + t_{зб}, \text{ якщо } (i+1) = MZBj. \end{cases} \text{ (хв)}. \quad (7)$$

5.8. Поточний ресурс батареї БПЛА на момент відбуття з точки маршруту $i+1$:

$$t_{рбн(i+1)} = \begin{cases} t_{рбн(i)} - \left(\frac{R_{i,i+1}}{v_{БПЛА}} + t_m \right), \text{ якщо } (i+1) \neq MZBj; \\ 31, \text{ якщо } (i+1) = MZBj. \end{cases} \text{ (хв)}. \quad (8)$$

5.9. Фактичний час відбуття БПЛА з точки маршруту $i+1$:

$$T_{в(i+1)}^{ПАСС} = T_{n(i+1)}^{ПАСС} + t_{\Sigma(i+1)}^{БПЛА} \text{ (ГОД/ХВ)}. \quad (9)$$

5.10. Фактичний час повернення БПЛА на СП1:

$$T_{n(1(СП1))}^{БПЛА} = T_{в(n+1)}^{БПЛА} + 60 \frac{R_{n+1,1(СП1)}}{v_{БПЛА}} \text{ (ГОД/ХВ)}, \quad (10)$$

де: $R_{n+1,1(СП1)}$ – відстань між останньою точкою маршруту $n+1$ і точкою 1 (СП1), визначена за табл. 2.

5.11. Фактичний час повернення ПАСС на СП2:

$$T_{n(СП2)}^{ПАСС} = T_{\epsilon(МЗБк)}^{ПАСС} + 60 \frac{R_{МЗБк,СП2}}{v_{ПАСС}} \text{ (год/хв)}, \quad (11)$$

де: $R_{МЗБк,СП2}$ – відстань між та МЗБк та СП2, визначена за табл. 4.

6. Загальний час руху за маршрутом БПЛА розраховувався за формулою:

$$t_{\Sigma}^{БПЛА} = 60 \left(\frac{R_{n+1,1(СП1)}}{v_{БПЛА}} + \sum_{i=1}^n \frac{R_{i,i+1}}{v_{БПЛА}} \right) + \sum_{i=1}^n t_{\Sigma(i+1)}^{БПЛА} \text{ (хв)}. \quad (12)$$

У нашому випадку:

$$\begin{aligned} t_{\Sigma}^{БПЛА} &= 60 \left(\frac{\sum_{i=1}^{11} R_{i,i+1} + R_{12,1(СП1)}}{v_{БПЛА}} \right) + \sum_{i=1}^{11} t_{\Sigma(i+1)}^{БПЛА} = \\ &= 60 \left(\frac{5,35 + 21,83}{40} \right) + 37 = 77 \text{ хв.} \end{aligned}$$

7. Загальний час руху за маршрутом ПАСС розраховувався за формулою:

$$t_{\Sigma}^{ПАСС} = 60 \left(\frac{R_{СП2,МЗБ1} + \sum_{j=1}^{k-1} R_{МЗБj,j+1} + R_{МЗБk,СП2}}{v_{ПАСС}} \right) + \sum_{j=1}^k t_{\Sigma(МЗБj)}^{ПАСС} \text{ (хв)}. \quad (13)$$

У нашому випадку:

$$\begin{aligned} t_{\Sigma}^{ПАСС} &= 60 \left(\frac{R_{СП2,МЗБ1} + \sum_{j=1}^1 R_{МЗБj,j+1} + R_{МЗБ2,СП2}}{v_{ПАСС}} \right) + \sum_{j=1}^2 t_{\Sigma(МЗБj)}^{ПАСС} = \\ &= 60 \left(\frac{14,7 + 5,23 + 18,8}{100} \right) + 33 = 56 \text{ хв.} \end{aligned}$$

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки:

1. Обліт постів контролю за допомогою БПЛА необхідно здійснювати у такій послідовності: СП1→ПК15→ПК18→ПК16→ПК14→ПК19→ПК17→ПК10→ПК1→ПК11→ПК9→ПК8→СП1.

2. Місця для заміни батарей БПЛА із залученням ПАСС необхідно обладнати у точках маршруту 7 (ПК17) та 11 (ПК9), оскільки згідно із запропонованим алгоритмом:

– поточного ресурсу батареї БПЛА на 3 хв недостатньо для перельоту з точки 7 (ПК17) до точки 8 (ПК10) і проведення там моніторингу (необхідно мати ресурс щонайменше на 6 хв);

– поточного ресурсу батареї БПЛА на 3 хв недостатньо для перельоту з точки 11 (ПК9) до точки 12 (ПК8) і проведення там моніторингу (необхідно мати ресурс щонайменше на 9 хв).

3. БПЛА на виконання свого завдання потребує 77 хв, тоді як ПАСС – 56 хв, тобто на 21 хв менше. Цей вииграш у часі досягається за рахунок того, що умови виконання ПАСС свого завдання дозволяють їй вилітати зі своєї стартової позиції на 17 хв пізніше за БПЛА, а повертатися на 3 хв раніше.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. На підставі аналізу особливостей використання автоматичних сервісних станцій було запропоновано фасетну класифікацію їх різновиду – автоматичних енерговідновлювальних станцій.

Використано такі ознаки класифікації: принцип функціонування, спосіб поповнення енергії, спосіб підзарядки, тип базування, тип конструкції, кількість місць для одночасного обслуговування БПЛА.

Наведено приклад застосування запропонованого підходу для моніторингу 11 постів контролю Запорізької АЕС. Для здійснення моніторингу обрано БПЛА DJI Mavic 2 Enterprise Dual, який рухається зі швидкістю 40 км/год та має ресурс батареї 31 хв. Для організації заміни батарей БПЛА на маршруті використано ПАСС на основі вертольота SL-231 Scout, що рухається зі швидкістю 100 км/год і здатний працювати у безпілотному режимі.

Розраховано шляхом розв’язання задачі комівояжера та позначено на карті найкоротший маршрут обльоту БПЛА заданих точок моніторингу. Визначено місця заміни батарей (МЗБ) та маршрут руху до цих місць ПАСС відповідно до розробленого алгоритму. Складено спільний графік руху за маршрутом БПЛА та ПАСС, а також окремий графік руху ПАСС. Розраховано загальний час виконання завдань з моніторингу з використанням БПЛА і загальний час руху ПАСС для забезпечення заміни батарей БПЛА.

Запропонований підхід та розроблене для його реалізації програмне забезпечення може бути використано операторами наземного пункту управління для розробки оптимальних маршрутів спільного застосування БПЛА та ПАСС під час моніторингу заданих точок потенційно небезпечних об'єктів.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці варіантів проведення моніторингу заданих точок потенційно небезпечних об'єктів флотами БПЛА та флотами ПАСС, що дозволить зменшити загальний час моніторингу.

Результати досліджень отримані в рамках науково-дослідних робіт “Методологічні засади та технології оцінювання та забезпечення безпеки (захисту) критичних інформаційних інфраструктур” (державний реєстраційний номер: 0119U100979) і “Методологія сталого розвитку та інформаційні технології зеленого комп'ютерингу та комунікацій” (державний реєстраційний номер: 0118U003822), які виконуються Національним аерокосмічним університетом ім. М. Є. Жуковського.

Список використаних джерел:

1. *Schneider F., Gaspers B., Peräjärvi K., Gårdestig M.* Current state of the art of unmanned systems with potential to be used for radiation measurements and sampling. Report EUR 27224 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. 63 p.

2. *Connor D. T., Martin P. G., Scott T. B.* Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37. P. 5953–5987. DOI: 10.1080/01431161.2016.12524.

3. *Al Rashdan A. Y., St Germain S. W.* Automation of data collection methods for online monitoring of nuclear power plants. Idaho Falls, Idaho: Idaho National Laboratory, 2018. 19 p.

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

5. An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability / *Fesenko H., Kharchenko V., Sachenko A., Hiromoto R., Kochan V.* // *Dependable IoT for human and industry modeling, architecting, implementation* (V. Kharchenko, A. Kor, A. Rucinski eds). Denmark, The Netherlands: River Publishers, 2018. P. 197–217.

6. ООО Вестрон. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки ЗАЭС. Техническое задание. ТЗ - ВН. 702.410.34. Харьков, 2011. 124 с.

7. Фетисов В. С., Артемьев А. Е., Муфаззалов Д. Ф. Автоматические сервисные станции для обслуживания электрических беспилотных летательных аппаратов: монография. Москва: “Инновационное машиностроение”, 2017. 253 с.

8. Sundar K., Rathinam S. Algorithms for routing an unmanned aerial vehicle in the presence of refueling depots // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11. P. 287–294. DOI: 10.1109/TASE.2013.2279544.

9. On the continuous coverage problem for a swarm of UAVs / Shakhathreh H., Khreishah A., Chakareski J., Salameh H. B., Khalil I. // Proceedings of 2016 IEEE 37th Sarnoff Symposium. Newark, NJ, USA, 2016. P. 130–135. DOI: 10.1109/SARNOF.2016.7846742

10. Kannon T. E., Nurre S. G., Lunday B. J., Hill R. R. The aircraft routing problem with refueling // Optimization Letters. 2015. Vol. 9. P. 1609–1624. DOI: 10.1007/s11590-015-0849-8.

11. Maini P., Sujit P. B. On cooperation between a fuel constrained UAV and a refueling UGV for large scale mapping applications // Unmanned aircraft systems: proceedings of 2015 IEEE International Conference. Denver, CL, USA, 2015. P. 1370–1377. DOI: 10.1109/ICUAS.2015.7152432.

12. Yu K., Kumar A., Spencer B., Tokekar B. P. Algorithms and experiments on routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations // Journal of Field Robotics. 2019. Vol. 36. P. 602–616. DOI: 10.1002/rob.21856.

References:

1. Schneider F., Gaspers B., Peräjärvi K. and Gärdestig M. (2015), Current state of the art of unmanned systems with potential to be used for radiation measurements and sampling. Report EUR 27224 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 63 p.

2. Connor D. T., Martin P. G. and Scott T. B. (2016), “Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems”. International journal of remote sensing, vol. 37, pp. 5953-5987. DOI: 10.1080/01431161.2016.12524.

3. Al Rashdan A. Y. and St Germain S. W. (2018), Automation of data collection methods for online monitoring of nuclear power plants, Press Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho, 19 p. [USA].

4. Fesenko H. V. (2019), “*Minimizatsiya chasu pochatku vykonannya flotom bezpilotnykh lital'nykh aparativ zavdannya z radiatsiynoho monitorynhu 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”], Journal *Systemy ta tekhnolohiyi* [Systems and Technologies], vol. 1 (57), pp. 5–20 [Ukraine].

5. Fesenko H., Kharchenko V., Sachenko A., Hiromoto R. and Kochan V. (2018), “An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability”. *Dependable IoT for Human and Industry Modeling, Architecting, Implementation*, River Publishers, Denmark, pp. 197–217. [Netherlands].

6. Vestron (2011), *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya radiatsionnoy obstanovki ZAES. Tehnicheskoe zadanie. TZ - VN. 702.410.34*, Kharkiv, 124 p. [Ukraine].

7. Fetisov V. S., Artem'ev A. E. and Mufazzalov D. F. (2017), *Avtomaticheskije servisnye stantsii dlya obsluzhivaniya elektricheskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Automatic service stations for servicing electric unmanned aerial vehicles], Monograph, Moscow, 253 p. [Russia].

8. Sundar K. and Rathinam S. (2014), “Algorithms for routing an unmanned aerial vehicle in the presence of refueling depots”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, pp. 287–294. DOI: 10.1109/TASE.2013.2279544.

9. Shakhatreh H., Khreishah A., Chakareski J., Salameh H. B. and Khalil I. (2016), “On the continuous coverage problem for a swarm of UAVs”, *Proceedings of 2016 IEEE 37th Sarnoff Symposium*, Newark, NJ, pp. 130–135. DOI: 10.1109/SARNOF.2016.7846742 [USA].

10. Kannon T. E., Nurre S. G., Lunday B. J. and Hill R. R. (2015), “The aircraft routing problem with refueling”, *Optimization Letters*, vol. 9, pp. 1609–1624. DOI: 10.1007/s11590-015-0849-8.

11. Maini P. and Sujit P. B. (2015), “On the continuous coverage problem for a swarm of UAVs”, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Denver, CL, pp. 1370–1377. DOI: 10.1109/ICUAS.2015.7152432 [USA].

12. Yu K., Kumar A., Spencer B. and Tokekar B. P. (2019), “Algorithms and experiments on routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations”, *Journal of Field Robotics*, vol. 36, pp. 602–616. DOI: 10.1002/rob.21856