

DOI:  
УДК 621.039:623.746

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

### **МІНІМІЗАЦІЯ ЧАСУ ПОЧАТКУ ВИКОНАННЯ ФЛОТОМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗАВДАННЯ З РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ В НОВІЙ ЗОНІ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ**

*Запропоновано підхід щодо мінімізації часу очікування початку виконання флотом безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА) завдання з радіаційного моніторингу в новій зоні відповідальності. Наведено приклад реалізації підходу для флоту, що складається з п'яти БПЛА "Фурія" з електричним двигуном і виконує завдання збирання та передачі інформації до кризового центру в п'яти зонах відповідальності (один БПЛА виконує завдання у своїй власній зоні) в межах тридцятикілометрової зони Запорізької АЕС. Розглянуто шість можливих нових зон відповідальності та визначено мінімальний час очікування початку виконання БПЛА флоту завдання у кожній із цих зон.*

*Ключові слова: безпілотний літальний апарат; атомна електростанція; зона відповідальності; радіаційний моніторинг; стартова позиція; проміжна посадка; модель оптимізації.*

*Предложен подход к минимизации времени ожидания начала выполнения флотом беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) задачи по радиационному мониторингу в новой зоне ответственности. Приведен пример реализации подхода для флота, состоящего из пяти БПЛА "Фурия" с электрическим двигателем и выполняет задание по сбору и передаче информации в кризисный центр в пяти зонах ответственности (один БПЛА выполняет задачи в своей собственной зоне) в пределах тридцатикилометровой зоны Запорожской АЭС. Рассмотрены шесть возможных новых зон ответственности и определено минимальное время ожидания начала выполнения задачи БПЛА флота в каждой из этих зон.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; атомная электростанция; зона ответственности; радиационный мониторинг; стартовая позиция; промежуточная посадка; модель оптимизации.*

© Г. В. Фесенко, 2019

---

*The analysis of possible applications of unmanned aerial vehicles for performing radiation monitoring missions was carried out. This paper proposes an approach to minimization of the waiting time to start performing a radiation monitoring mission via a fleet of unmanned aerial vehicles (hereafter UAVs) in the new zone of responsibility. The approach includes the following steps: distribution of UAVs in the zones of responsibility and setting the time for performing a mission for each UAV; determination of the starting position location where UAVs battery can be replaced; defining the new zone of responsibility and time for performing a mission in the zone; construction of an algorithm for calculating parameters necessary for solving the optimization problem; formulation of the optimization problem and constraints. Parameters to be calculated: the UAV flight time from the current mission zone to: a) starting position; b) a new zone (with making the intermediate landing and without making one); a flight time from the new zone to the starting position; the UAV battery life required for performing the mission in the new zone; the waiting time to start performing the mission in the new zone and the current battery life for the UAV at the start of its mission in the new zone for the following cases: a) the UAV reaches the new zone with making the intermediate landing, b) the UAV reaches the new zone without making one. An example of the proposed approach implementation for a fleet, consisting of five Ukrainian electric UAVs “Furiia” and performing missions in five zones of responsibility (one UAV performs a mission in one zone) within the Zaporizhzhia NPP thirty-kilometre radius zone is given. Six possible new zones are considered and the waiting time to start performing a mission in each of these zones is given. It has been get that UAV 5, UAV 4 and UAV 2 can be assigned to three zones, two zones and one zone, respectively. UAV 1 and UAV 2 can not be used in any new zone. Note that the UAV 5 can be used once without making the intermediate landing at the starting position for its battery replacement and twice with making the intermediate landing. Further studies should take into account the following cases: the fleet consists of various UAVs, two or more UAVs should be assigned to the new zone.*

*Key words: unmanned aerial vehicle; nuclear power plant; zone of responsibility; radiation monitoring; starting position; intermediate landing; optimization model.*

**Постановка проблеми.** Після застосування під час аварії на японській атомній електростанції (далі – АЕС) “Фукусіма-1” в Японії безпілотного літального апарату літакового типу Global Hawk для отримання у режимі реального часу зображення руйнувань інфраструктури станції БПЛА стали все частіше використовувати для підвищення ефективності застосування системи радіаційного моніторингу [1; 2] (наприклад, автоматизованої системи

---

контролю радіаційної обстановки (АСКРО) [3]). Залежно від типу бортового обладнання БПЛА можуть залучатися для виконання таких завдань:

- дослідження районів радіаційних аварій, виявлення джерел радіоактивного забруднення та встановлення особливостей руху радіоактивних хмар;
- забезпечення складання карт радіоактивного забруднення;
- відбір проб ґрунту для встановлення ступеня його радіоактивного забруднення;
- пошук постраждалих унаслідок аварії на АЕС та забезпечення їх медикаментами, засобами захисту і продовольством;
- створення бездротового каналу передачі даних від датчиків стаціонарних постів контролю АСКРО до кризового центру;
- дублювання стаціонарних постів контролю АСКРО в частині вимірювання потужності дози гамма-випромінювання;
- дослідження об'єктів ядерної енергетики на предмет відповідності стандартам з ядерної безпеки;
- періодичний контроль радіаційної обстановки у 30-кілометровій зоні.

Переваги використання БПЛА під час радіаційного моніторингу порівнянно з пілотованими літаками такі: низька вартість, більша маневреність, можливість керування з незабрудненої місцевості, зліт і посадка в обраних для користувача місцях та у визначені користувачем проміжки часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні дослідження показують, що найбільш ефективно використовувати флот БПЛА під час радіаційного моніторингу не автономно, а як рухому складову інтегрованої системи моніторингу аварій на АЕС [4–11].

Так, наприклад, тематична група з радіологічних і ядерних загроз критичній інфраструктурі розробила різні сценарії одночасного застосування флотів БПЛА і груп наземних роботів під час роботи у складі системи радіаційного моніторингу [4].

Детальний аналіз різних концепцій побудови бортового обладнання БПЛА, що відповідає за виконання завдань радіаційного моніторингу, а також перелік різних сценаріїв вимірювання потужності дози гамма-випромінювання залежно від специфіки місцевості та розміщеної на ній інфраструктури містяться у [5].

Мобільна система моніторингу навколишнього середовища АЕС з використанням систем відеоспостереження та вимірювання потужності експозиційної дози з прив'язкою до просторової системи координат на базі безпілотного авіаційного комплексу представлена у [6; 7].

---

Концепція побудови системи післяаварійного моніторингу аварій на АЕС на основі БПЛА, яка передбачає підвищення надійності та стійкості наявної системи моніторингу за рахунок розміщення її мережі зв'язку на базі флоту БПЛА різного типу (БПЛА-датчики, БПЛА-ретранслятори, БПЛА-спостерігачі (оснащені відеокамерою), наведена у [8–10]. У подальшому ця система була вдосконалена за рахунок реалізації у ній технології Інтернету – дронів [11].

Однак, розглядаючи різні концепції побудови систем моніторингу на основі БПЛА, автори часто залишають за рамками досліджень питання особливостей застосування БПЛА під час зміни сценаріїв розвитку радіаційної аварії. Такі зміни можуть потребувати перерозподілу БПЛА флоту після появи нових зон відповідальності. У таких випадках важливо визначити БПЛА, що якнайшвидше зможе почати виконання завдання в новій зоні відповідальності після завершення поточного завдання [12; 13].

**Мета статті** – розробка підходу до мінімізації часу очікування початку виконання флотом БПЛА завдання в новій зоні відповідальності під час радіаційного моніторингу.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо флот БПЛА, в якому кожний БПЛА  $i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) виконує завдання з радіаційного моніторингу у своїй зоні відповідальності  $Z_i$ . В певний момент часу флот БПЛА може отримати заявку на виконання завдання у новій зоні відповідальності  $Z_{n+1}$ .

Оскільки флот не має вільних БПЛА, відправлення будь-якого БПЛА  $i$  у нову зону відповідальності  $Z_{n+1}$  можливе тільки після завершення виконання ним свого поточного завдання у зоні  $Z_i$ .

Задача: мінімізувати час очікування початку виконання флотом завдання у новій зоні відповідальності  $\tau_{n+1}^w$ .

Оберемо такі обмеження та допущення:

- БПЛА флоту є ідентичними;
- виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  потребує залучення одного БПЛА;
- БПЛА може бути залучений для виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  тільки після завершення виконання ним завдання у поточній зоні відповідальності;
- БПЛА після виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  повинен повернутися на стартову позицію;
- БПЛА може дістатися зони  $Z_{n+1}$  або з проміжною посадкою на стартовій позиції для заміни батареї (ресурсу батареї недостатньо для виконання

---

завдання у зоні  $Z_{n+1}$  та повернення на стартову позицію), або без такої посадки (ресурсу батареї достатньо для виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  та повернення на стартову позицію).

Уведемо такі параметри:

$X_i$  (м),  $Y_i$  (м) – географічні координати Гауса–Крюгера центра зони  $Z_i$ ;

$X_{n+1}$  (м),  $Y_{n+1}$  (м) – географічні координати Гауса–Крюгера центра зони  $Z_{n+1}$ ;

$X_{SP}$  (м),  $Y_{SP}$  (м) – географічні координати Гауса–Крюгера центра стартової позиції;

$v_{cr}$  – крейсерська швидкість БПЛА (км/год);

$\tau_i$  – час, який потребує БПЛА  $i$  для завершення виконання свого завдання в зоні  $Z_i$  (хв);

$\tau_{n+1}$  – час, необхідний для виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  (хв);

$\tau_i^{cbl}$  – часовий ресурс батареї БПЛА  $i$  в момент отримання заявки на виконання завдання в зоні  $Z_i$  (хв);

$\tau_{rl}$  – час, необхідний для заміни батареї на стартовій позиції (хв);

$\tau_{bl}$  – часовий ресурс нової батареї (хв).

Алгоритм розрахунку показників, необхідних для формулювання оптимізаційної задачі (мінімізація часу очікування початку виконання флотом завдань у новій зоні відповідальності), включає такі кроки.

1. Розрахунок часу польоту БПЛА із зони  $Z_i$  до зони  $Z_{n+1}$  без проміжної посадки на стартовій позиції для заміни батареї:

$$T_{i,n+1} = \frac{6\sqrt{(X_i - X_{n+1})^2 + (Y_i - Y_{n+1})^2}}{100v_{cr}} \text{ (хв)}. \quad (1)$$

2. Розрахунок часу польоту БПЛА із зони  $Z_{n+1}$  до стартової позиції:

$$T_{n+1,SP} = \frac{6\sqrt{(X_{n+1} - X_{SP})^2 + (Y_{n+1} - Y_{SP})^2}}{100v_{cr}} \text{ (хв)}. \quad (2)$$

---

3. Розрахунок часу польоту БПЛА із зони  $Z_i$  до стартової позиції:

$$T_{i,SP} = \frac{6\sqrt{(X_i - X_{SP})^2 + (Y_i - Y_{SP})^2}}{100v_{cr}} \text{ (хв)}. \quad (3)$$

4. Розрахунок часу польоту БПЛА із зони  $Z_i$  до зони  $Z_{n+1}$  з проміжною посадкою на стартовій позиції для заміни батареї:

$$T_{ri,n+1} = T_{i,SP} + \tau_{rl} + T_{n+1,SP} \text{ (хв)}. \quad (4)$$

5. Розрахунок часу очікування початку виконання завдань БПЛА  $i$  у зоні  $Z_{n+1}$  без проміжної посадки на стартовій позиції для заміни батареї:

$$\tau_i^w = \tau_i + T_{i,n+1} \text{ (хв)}. \quad (5)$$

6. Розрахунок часу очікування початку виконання завдань у зоні  $Z_{n+1}$  з використанням БПЛА  $i$ , який дістається цієї зони, роблячи проміжну посадку на стартовій позиції для заміни батареї:

$$\tau_{ri}^w = \tau_i + T_{ri,n+1} \text{ (хв)}. \quad (6)$$

7. Розрахунок часового ресурсу батареї БПЛА  $i$ , який дістається зони  $Z_{n+1}$ , не роблячи проміжної посадки на стартовій позиції для заміни батареї, на початку виконання завдання у цій зоні:

$$\tau_{i,n+1}^{cbl} = \tau_i^{cbl} - \tau_i^w \text{ (хв)}. \quad (7)$$

8. Розрахунок часового ресурсу батареї БПЛА  $i$ , який дістається зони  $Z_{n+1}$ , роблячи проміжну посадку на стартовій позиції для заміни батареї, на початку виконання завдання у цій зоні:

$$\tau_{ri,n+1}^{cbl} = \tau_{bl} - T_{n+1,SP} \text{ (хв)}. \quad (8)$$

9. Розрахунок часового ресурсу батареї БПЛА, який необхідний для виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$ :

$$\tau_{n+1}^{cbl} = \tau_{n+1} + T_{n+1,SP} \text{ (хв)}. \quad (9)$$

Постановка задачі мінімізації часу очікування початку виконання флотом завдання у новій зоні відповідальності  $Z_{n+1}$  з урахуванням показників, розрахованих за формулами (1)–(9), передбачає такі етапи.

1. Ідентифікація змінних:

$a_i$  – варіант використання БПЛА  $i$  для виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  без проміжної посадки на стартовій позиції для заміни батареї ( $a_i=1$ , якщо цей варіант використовується,  $a_i=0$  – у протилежному випадку);

$a_{ri}$  – варіант використання БПЛА  $i$  для виконання завдання у зоні  $Z_{n+1}$  з проміжною посадкою на стартовій позиції для заміни батареї ( $a_{ri}=1$ , якщо цей варіант використовується,  $a_{ri}=0$  – у протилежному випадку).

2. Запис цільової функції:

$$\tau_{n+1}^w = \sum_{i=1}^n \tau_i^w a_i + \sum_{i=1}^n \tau_{ri}^w a_{ri} \rightarrow \min. \quad (10)$$

3. Уведення необхідних обмежень:

$$\sum_{i=1}^n \tau_{i,n+1}^{cbl} a_i + \sum_{i=1}^n \tau_{ri,n+1}^{cbl} a_{ri} \geq \tau_{n+1}^{cbl}, \quad (11)$$

$$a_i \in \{0,1\}, a_{ri} \in \{0,1\}, i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n a_{ri} = 1. \quad (13)$$

Наведемо приклад реалізації запропонованого підходу.

Припустимо, що флот, який складається з п'яти БПЛА українського виробництва “Фурія” з електричним двигуном, застосовується для виконання завдань з радіаційного моніторингу в межах 30-кілометрової зони Запорізької АЕС (рис. 1). Кожен БПЛА виконує завдання у своїй зоні відповідальності.

У певний момент флот БПЛА отримує заявку на проведення моніторингу в новій зоні відповідальності  $Z_6$ . Розглянемо випадки, коли по чергово, як ця зона, виступають зони 6(1), 6(2), 6(3), 6(4), 6(5) та 6(6) (рис. 1). Необхідно мінімізувати час очікування початку виконання флотом завдання у кожній із цих зон, тобто визначити параметри  $\tau_{6(1)}^w, \tau_{6(2)}^w, \tau_{6(3)}^w, \tau_{6(4)}^w, \tau_{6(5)}^w, \tau_{6(6)}^w$ .

Параметри, необхідні для проведення розрахунків за формулами (1)–(9), подано в табл. 1.

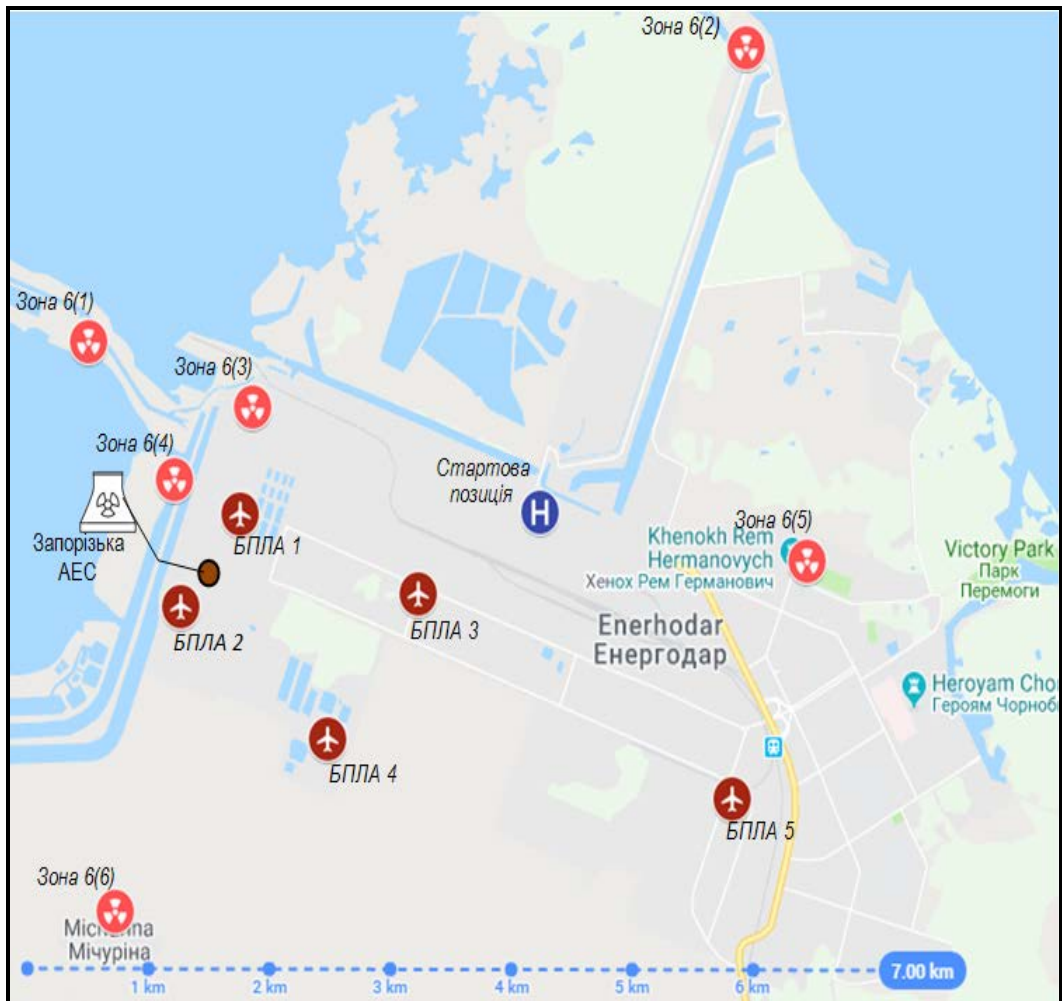


Рис. 1. Флот БПЛА, який здійснює радіаційний моніторинг у межах 30-кілометрової зони Запорізької АЕС, поточні та нові зони його відповідальності



**Параметри, необхідні для проведення розрахунків за формулами (1)–(9)**

Назва параметра, його позначення і розмірність	Значення параметра
крейсерська швидкість БПЛА $v_{cr}$ (км/год)	40
час, необхідний для заміни батареї на стартовій позиції $\tau_{rl}$ (хв)	7
часовий ресурс нової батареї $\tau_{bl}$ (хв)	150
час, який потребує БПЛА 1 для завершення виконання свого завдання у зоні 1 $\tau_1$ (хв)	14
часовий ресурс батареї БПЛА 1 на момент отримання заявки на виконання завдання у новій зоні $\tau_1^{cbl}$ (хв)	36
час, який потребує БПЛА 2 для завершення виконання свого завдання у зоні 2 $\tau_2$ (хв)	11
часовий ресурс батареї БПЛА 2 на момент отримання заявки на виконання завдання у новій зоні $\tau_2^{cbl}$ (хв)	32
час, який потребує БПЛА 3 для завершення виконання свого завдання у зоні 3 $\tau_3$ (хв)	13
часовий ресурс батареї БПЛА 3 на момент отримання заявки на виконання завдання у новій зоні $\tau_3^{cbl}$ (хв)	35
час, який потребує БПЛА 4 для завершення виконання свого завдання у зоні 4 $\tau_4$ (хв)	11
часовий ресурс батареї БПЛА 4 на момент отримання заявки на виконання завдання у новій зоні 4 $\tau_4^{cbl}$ (хв)	36
час, який потребує БПЛА 5 для завершення виконання свого завдання у зоні 5 $\tau_5$ (хв)	10
часовий ресурс батареї БПЛА 5 на момент отримання заявки на виконання завдання у новій зоні 5 $\tau_5^{cbl}$ (хв)	41

Використовуючи формули (1)–(9) та параметри, задані табл. 1, визначимо необхідні показники й отримаємо відповідно до формули (10) цільову функцію, а відповідно до формули (11) – обмеження і подамо їх у вигляді табл. 2.

Обмеження, отримані з використанням виразів (12) і (13), загальні для всіх випадків, що розглядаються, і можуть бути записані так:

$$a_i \in \{0,1\}, a_{ri} \in \{0,1\}, i = \overline{1,5}; \quad \sum_{i=1}^5 a_i + \sum_{i=1}^5 a_{ri} = 1.$$

**Цільова функція та обмеження для визначення  
мінімального часу очікування початку виконання флотом БПЛА  
завдання у відповідній новій зоні відповідальності**

№ нової зони	Цільова функція та обмеження для визначення часу очікування початку виконання флотом БПЛА завдання у відповідній зоні відповідальності
6(1)	$\tau_{6(1)}^w = 19a_1 + 14a_2 + 20a_3 + 24a_4 + 28a_5 + 38a_{r1} + 49a_{r2} + 39a_{r3} + 34a_{r4} + 44a_{r5} \rightarrow \min.$ $19a_1 + 18a_2 + 17a_3 + 20a_4 + 22a_5 + 144(a_{r1} + a_{r2} + a_{r3} + a_{r4} + a_{r5}) \geq 21.$
6(2)	$\tau_{6(2)}^w = 22a_1 + 20a_2 + 20a_3 + 20a_4 + 18a_5 + 30a_{r1} + 28a_{r2} + 27a_{r3} + 27a_{r4} + 26a_{r5} \rightarrow \min.$ $14a_1 + 10a_2 + 15a_3 + 26a_4 + 23a_5 + 145(a_{r1} + a_{r2} + a_{r3} + a_{r4} + a_{r5}) \geq 24.$
6(3)	$\tau_{6(2)}^w = 15a_1 + 13a_2 + 16a_3 + 15a_4 + 17a_5 + 9a_{r1} + 27a_{r2} + 26a_{r3} + 26a_{r4} + 25a_{r5} \rightarrow \min.$ $21a_1 + 17a_2 + 19a_3 + 21a_4 + 24a_5 + 146(a_{r1} + a_{r2} + a_{r3} + a_{r4} + a_{r5}) \geq 16.$
6(4)	$\tau_{6(2)}^w = 15a_1 + 12a_2 + 16a_3 + 14a_4 + 18a_5 + 0a_{r1} + 28a_{r2} + 27a_{r3} + 27a_{r4} + 26a_{r5} \rightarrow \min.$ $21a_1 + 18a_2 + 19a_3 + 22a_4 + 23a_5 + 145(a_{r1} + a_{r2} + a_{r3} + a_{r4} + a_{r5}) \geq 21.$
6(5)	$\tau_{6(2)}^w = 21a_1 + 19a_2 + 18a_3 + 17a_4 + 13a_5 + 28a_{r1} + 26a_{r2} + 25a_{r3} + 25a_{r4} + 24a_{r5} \rightarrow \min.$ $15a_1 + 11a_2 + 17a_3 + 19a_4 + 28a_5 + 147(a_{r1} + a_{r2} + a_{r3} + a_{r4} + a_{r5}) \geq 29.$
6(6)	$\tau_{6(2)}^w = 19a_1 + 14a_2 + 18a_3 + 14a_4 + 18a_5 + 32a_{r1} + 30a_{r2} + 29a_{r3} + 29a_{r4} + 28a_{r5} \rightarrow \min.$ $17a_1 + 16a_2 + 17a_3 + 22a_4 + 23a_5 + 143(a_{r1} + a_{r2} + a_{r3} + a_{r4} + a_{r5}) \geq 20.$

Результати розв'язку оптимізаційних задач, поданих у табл. 2, наведено в табл. 3 та проілюстровано за допомогою рис. 2.

№ нової зони	Час, необхідний для виконання завдання у новій зоні, хв	БПЛА, що виконуватиме завдання	Час очікування початку виконання БПЛА завдань у новій зоні, хв	Проміжна посадка для заміни батареї
6(1)	15	БПЛА 5	19	–
6(2)	19	БПЛА 5	26	+
6(3)	12	БПЛА 2	13	–
6(4)	16	БПЛА 4	14	–
6(5)	26	БПЛА 5	24	+
6(6)	13	БПЛА 4	14	–

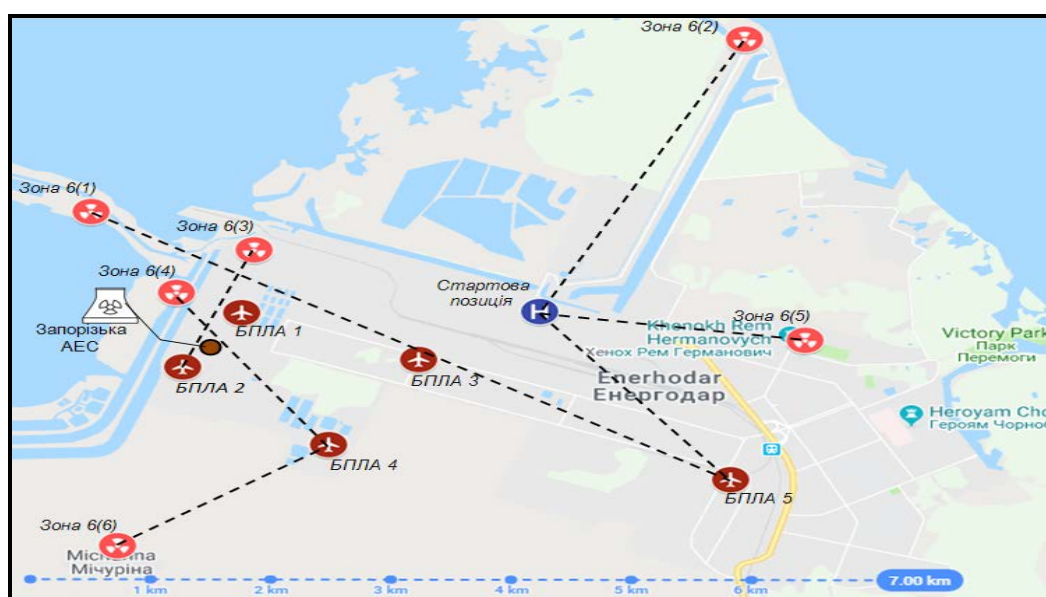


Рис. 2. Маршрути руху БПЛА до нових зон відповідальності

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки.

Найбільш затребуваним є БПЛА 5, який швидше за інших БПЛА може розпочати виконання завдання у нових зонах 6(1), 6(2) та 6(5). При цьому переліт до зон 6(2) і 6(5) можливий лише з проміжною посадкою на стартовій позиції для заміни батареї.

Незатребуваними є БПЛА 1 та БПЛА 3.

Розрахунки показали, що не завжди географічна близькість БПЛА до нової зони відповідальності робить його найоптимальнішим для спрямування

---

в цю зону. Це пояснюється тим, що, крім часу польоту з поточної зони відповідальності до нової зони, враховуються ще такі часові показники, як час, що потребує БПЛА для завершення виконання свого завдання у поточній зоні, а також часовий ресурс батареї БПЛА на момент отримання заявки на виконання завдання в новій зоні. Велике значення першого часового показника та мале значення другого можуть не дозволити географічно ближче розташованому до нової зони відповідальності БПЛА мати перевагу над іншими. Так, наприклад, до зони 6(1) за наявних вихідних даних мав спрямовуватись найдальше розташований від неї БПЛА 5. Однак за умови завершення виконання всіма БПЛА своїх поточних завдань на момент отримання заявки та з достатнім часовим ресурсом батареї у кожного з них для її обслуговування для виконання завдання у зоні 6(1) було б обрано БПЛА 1.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.** Проведено аналіз можливих застосувань БПЛА під час радіаційного моніторингу. Запропоновано підхід до мінімізації часу очікування початку виконання флотом БПЛА завдання з радіаційного моніторингу в новій зоні відповідальності. Цей підхід передбачає розгляд таких питань: розподіл БПЛА за зонами відповідальності та встановлення часу на виконання завдання кожним із них; визначення місця розташування стартової позиції зі створенням на ній умов для заміни батареї; отримання флотом заявки на виконання завдання у новій зоні відповідальності та визначення часу на виконання цього завдання; побудова алгоритму розрахунку параметрів, необхідних для розв'язання оптимізаційної задачі; формулювання оптимізаційної задачі (мінімізація часу очікування початку виконання флотом БПЛА завдання з радіаційного моніторингу в новій зоні відповідальності) та обмежень. Параметри, що розраховуються: час польоту БПЛА із зони виконання завдання до: а) стартової позиції; б) нової зони (з проміжною посадкою та без проміжної посадки); час польоту з нової зони до стартової позиції; часовий ресурс батареї БПЛА, необхідний для виконання завдання у новій зоні; час очікування початку виконання завдання в новій зоні та часовий ресурс батареї БПЛА на початку виконання завдань у новій зоні для випадків: 1) БПЛА дістається цієї зони, роблячи проміжну посадку; 2) БПЛА не робить проміжної посадки.

Наведено приклад реалізації запропонованого підходу для флоту, що складається з п'яти БПЛА українського виробництва “Фурія” з електричним двигуном і застосовується для виконання завдань з радіаційного моніторингу в межах 30-кілометрової зони Запорізької АЕС (один БПЛА виконує завдання у своїй власній зоні). Розглянуто шість можливих нових зон відповідальності та визначено час очікування початку виконання БПЛА флоту завдання у кожній із цих зон. Установлено, що БПЛА 5, БПЛА 4 та БПЛА 2 можуть бути залучені до виконання завдання у трьох, двох та одній зоні відповідно. БПЛА 1 та БПЛА 2 не залучаються для виконання завдання

---

у жодній із розглянутих нових зон. Зазначимо, що БПЛА 5 один раз дістається своєї нової зони відповідальності без проміжної посадки на стартовій позиції для заміни батареї та двічі зі здійсненням такої посадки.

Запропонований підхід і розроблене для його реалізації програмне забезпечення можуть використовуватися операторами наземного пункту управління та персоналом кризового центру для відпрацювання оптимальних управлінських рішень щодо використання флоту БПЛА як складової частини системи моніторингу під час реагування на радіаційні аварії.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення підходів щодо застосування під час радіаційного моніторингу флоту різнотипних БПЛА з можливістю спрямування до нової зони відповідальності двох та більше БПЛА.

### Список використаних джерел:

1. *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.

2. Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chernobyl nuclear accident site / *Volodymyr Burtniak, Yurii Zabulonov, Maksym Stokolos, Leonid Bulavin and oth* // Journal of Applied Remote Sensing. 2018. № 12. P. 046007. DOI: 10.1117/1.JRS.12.046007.

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

4. *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.

5. *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.

6. *Babak S.* Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex // The Advanced Science Journal. 2014. Vol. 12. P. 41–44.

7. *Бабак С. В.* Мониторинг окружающей среды АЭС с использованием систем видеонаблюдения и измерения мощности экспозиционной дозы на базе беспилотного авиационного комплекса // Системи обробки інформації. 2015. Вип. 7 (132). С. 190-194.

8. Концепція побудови мобільних систем пост-аварійного моніторингу АЕС з використанням флоту квадрокоптерів / *Саченко А. О., Кочан В. В., Харченко В. С., Якуів В. В. та ін.* // Радіоелектронні комп'ютерні системи. 2016. № 5 (79). С. 207–214.

---

9. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения / А. А. Саченко, В. В. Кочан, В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий и др. // Ядерна та радіаційна безпека. 2017. №1 (73). С. 24–29.

10. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: модели надежности / В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко, А. А. Саченко и др. // Ядерна та радіаційна безпека. 2017. №4 (76). С. 50–55.

11. An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability / Fesenko H., Kharchenko V., Sachenko A., Hiromoto R. // 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

12. Мусеев В. С., Гущина Д. С., Мусеев Г. В. Основы теории создания и применения информационных беспилотных авиационных комплексов: монография. Казань. 2010. 196 с.

13. Fesenko H. Optimal redistribution of UAVs in case of changing monitoring zones after a NPP accident // Dependable systems, services and technologies: proceedings of 2018 IEEE 9th international conference. Kyiv, 2018. P. 49–53. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409097.

### References

1. 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].

2. Burtniak V., Zabulonov Yu., Stokolos M., Bulavin L. Krasnoholovets V. (2018), “Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chernobyl nuclear accident site”, Journal of Applied Remote Sensing, 2018, vol. 12. P. 046007. DOI: 10.1117/1.JRS.12.046007.

3. Vestron. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya radiatsionnoy obstanovki ZAES. Tehnicheskoe zadanie. TZ - VN. 702.410.34 [Westron. Automated system for Radiation situation monitoring. Technical Task. TZ - VN. 702.410.34] (2011). Kharkiv, 124 p. [Ukraine].

4. Schneider F., Gaspers B., Peräjärvi K. and Gårdestig 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.

5. 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.

---

6. Babak S. (2014), “Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex”, *The Advanced Science Journal*, vol. 12, pp. 41–44.

7. Babak S. V. (2015), “*Monitoring okruzhayuschey sredey AES s ispol'zovaniem sistem videonablyudeniya i izmereniya moschnosti ekspozitsionnoy dozyi na baze bespilotnogo aviatsionnogo kompleksa*” [“Monitoring of NPP environment using video surveillance and exposure dose measurement systems on the basis of unmanned aerial complex”], *Journal Systemy obrobky informatsii* [Information Processing Systems], vol. 7 (132), pp. 190–194 [Ukraine].

8. Kochan V. V., Sachenko A. A., Kharchenko V. S., Yatskiv V. V., Chernyshov M. A., Bykovyi P. Ye., Roshchupkin O. Yu. and Koval V. S. (2016), “*Kontsepsiia pobudovy mobilnykh system post-avariinoho monitorynhu AES z vykorystanniam flotu kvadropteriv*” [“Concept of building of NPP post-emergency monitoring mobile systems using quadcopter fleet”], *Journal Radioelektronni i komp'uterni systemy* [Radioelectronic and Computer Systems], vol. 5(79), pp. 207–214 [Ukraine].

9. Sachenko A. A., Kochan V. V., Kharchenko V. S., Jastrebenckij M. A., Fesenko H. V. and Janovskij M. Je. (2017), “*Sistema posleavarijnogo monitoringa AJeS s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: koncepcija, principy postroeniya*” [“NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: Reliability models”], *Journal Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and Radiation Safety], vol. 1 (73), pp. 24–29 [Ukraine].

10. Kharchenko V. S., Jastrebenckij M. A., Fesenko H. V., Sachenko A. A. and Kochan V. V. (2017), “*Sistema posleavarijnogo monitoringa AJeS s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: modeli nadezhnosti*” [“NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: Concept, design principles”], *Journal Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and Radiation Safety], vol. 4 (76), pp. 50–55 [Ukraine].

11. 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, The Netherlands, pp. 197–217.

12. Moiseev V. S., Gushina D. S. and Moiseev G. V. (2010), *Osnovy teorii sozdaniya i primeneniya informacionnykh bespilotnykh aviacionnykh kompleksov* [Fundamentals of the theory of creation and use of information unmanned aircraft complexes], Monograph, Kazan', 196 p. [Russia].

13. Fesenko H. (2018), “Optimal redistribution of UAVs in case of changing monitoring zones after a NPP accident”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, Kyiv, pp. 49–53. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409097 [Ukraine].