

І.М. Ключніков,¹ Г.В. Фесенко²

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Україна

²Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна

БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ ЛІТАЮЧОЇ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ У РАЗІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЧНИХ ОБМІННО-ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ

В статті представлено метод балансування навантаження між безпілотними літальними апаратами, що формують літаючу бездротову мережу та використовують обмінно-зарядну станцію, шляхом корегування маршрутів їх польотів під час кожного наступного циклу чергування. Наведено приклад використання запропонованого методу для балансування навантаження між п'ятьма безпілотними літальними апаратами мультироторного типу під час чотирьох циклів їхнього чергування у складі літаючої бездротової мережі за умови використання однієї обмінно-зарядної станції.

Ключові слова: бездротова літаюча мережа, балансування навантаження, безпілотний літальний апарат, автоматична обмінно-зарядна станція, одномірний масив, упорядкований масив, маршрут польоту.

Постановка проблеми

На сьогодні більшість парку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) складають БПЛА мультироторного типу (МБПЛА), оснащені електричним двигуном.

Переваги такого типу БПЛА над іншими типами полягають у тому, що вони:

- не потребують спеціально обладнаних місць та пристроїв для злету-посадки (наприклад, катапульт);
- можуть злітати вертикально та зависати над заданою точкою;
- є екологічними, недорогими та простими у виготовленні.

Тому саме МПЛА розглядаються у якості ефективного та недорогого інструменту створення літаючих бездротових мереж (ЛБМ).

Такі мережі, наприклад, можуть розгортатися для забезпечення бездротового зв'язку між постом контролю (ПК) автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки та кризовим центром (КЦ) атомної електростанції (АЕС) у разі якщо дротові мережі між ними були пошкоджені [1-2]. Також вони можуть бути складовою багатоверсійної системи моніторингу АЕС, побудованої з використанням технології Інтернету дронів.

Однак суттєвою вадою МБПЛА є їх невеликий час польоту (до 30 хвилин у більшості випадків), що унеможливує їх використання для довготривалої роботи ЛБМ.

Для усунення цієї проблеми доцільно використовувати позмінний графік чергування МБПЛА у складі ЛБМ [2], який дозволяє вільній від чергування зміні МБПЛА використовувати автоматичні обмінно-зарядні станції (АОЗС) [3] для заміни або заряду бортової батареї.

Якщо, наприклад, ми використовуємо одну АОЗС, відстані які долають МБПЛА від місць свого чергування у складі ЛБМ до АОЗС і у зворотному напрямку є різними, що призводить до різного навантаження на кожен МБПЛА окремо.

Це означає, що імовірність відмови МБПЛА з більшим навантаженням (більшим нальотом під час руху до АОЗС та у зворотному напрямку) є більшою, а значить необхідно вирішувати задачу щодо вирівнювання такого навантаження між МБПЛА.

Аналіз останніх досліджень у публікацій

Питанням забезпечення безперебійної роботи формувань БПЛА для виконання поставлених завдань шляхом використання АОЗС приділяється все більше і більше уваги.

Так, зокрема, в роботі [4] запропоновано алгоритм організації заряджання батарей для забезпечення постійного перебування у складі рою заданої кількості МБПЛА. Визначено перелік станів, у яких може перебувати МБПЛА рою, особливості формування черги на заряджання батареї, отримано необхідні аналітичні вирази. Здійснено порівняння результатів, отриманих як з використанням

аналітичних виразів, так і шляхом проведення експериментів. Аналіз проводився для таких моделей МБПЛА як Skyracer-901H, X5SW-V3, Contixo-F18.

Автори [5] розглядають можливість реалізації механізму аукціону для управління графіком зарядки МБПЛА на АОЗС. Часові інтервали зарядки виставляються на аукціон, а їх призначення визначається процедурами торгів. Головною проблемою при розробці цього механізму є відсутність попередніх знань щодо розподілу кількості МБПЛА, що беруть участь в аукціоні.

Мічіні та ін. [6] пропонує використовувати апаратну платформу для автоматизованої зміни та зарядки батареї для БПЛА, що працюють у складі флоту. Автоматизована станція містить буфер з 8 акумуляторів у новій двобарабанній структурі, яка дозволяє «гарячу» заміну батареї, тим самим дозволяючи кожному БПЛА залишатися включеним протягом усього процесу зміни батареї.

Найбільш близькою за ідеєю до нашого дослідження є робота [7]. У ній пропонується позмінний графік використання МБПЛА для здійснення моніторингу заданих об'єктів. Згідно цього графіку МБПЛА періодично відвідують АОЗС для підзарядки.

Однак, у розглянутих роботах автори, в основному, слідкують за забезпеченням вчасного вирушення МБПЛА на АОЗС та повернення до виконання завдання, залишаючи за рамками своїх досліджень питання балансування навантаження між МБПЛА.

Формулювання мети статті

Метою статті є запропонувати метод балансування навантаження між МБПЛА, що формують ЛБМ та використовують АОЗС, шляхом корегування маршрутів їх польотів під час кожного наступного циклу чергування.

Виклад основного матеріалу

Під час функціонування ЛБМ, МБПЛА, що входять до її складу, можуть повертатися після заміни (зарядки) батарей до попередньої точки свого розташування у ЛБМ (здійснювати польоти за одним і тим же маршрутом), або маршрути кожного разу можуть вибиратись за визначеним правилом.

Розглянемо функціонування ЛБМ, що складається з п'яти МБПЛА, одного БПЛА літакового типу (ЛБПЛА) та однієї АОЗС (рис. 1).

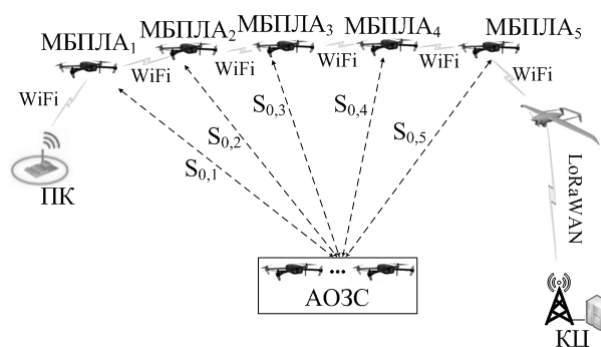


Рис. 1. ЛБМ, побудована з п'яти МБПЛА, одного ЛБПЛА та однієї АОЗС

Завдання цієї ЛБМ полягає у передачі даних моніторингу радіаційної обстановки у разі пошкодження дротового каналу ПК-КЦ шляхом організації наступних каналів:

- WiFi каналу між ПК та ЛБПЛА;
- LoRaWAN каналу між ЛБПЛА та КЦ.

Таким чином, ЛБМ складається з двох сегментів:

1) сегменту Wi-Fi, що включає обладнання WiFi у ПК, обладнання WiFi на борту МБПЛА та обладнання WiFi на борту ЛБПЛА;

2) сегмент LoRaWAN, що включає обладнання LoRaWAN на борту ЛБПЛА та обладнання LoRaWAN у КЦ.

МБПЛА₁, МБПЛА₂, МБПЛА₃, МБПЛА₄, МБПЛА₅ утворюють флот МБПЛА.

Більш детально особливості розгортання подібної мережі розглянуто у [2].

Прийемо наступні припущення.

1. ЛБПЛА має достатній для виконання поставленого завдання час польоту і не потребує використання АОЗС.

2. П'ять МБПЛА періодично відправляються своєю зміною до АОЗС.

Відстань, яку долає і-й МБПЛА за j-й цикл чергування, рухаючись за маршрутом «АОЗС (точка 0) → точка k → АОЗС (точка 0)» позначимо як

$$S_j^{\text{МБПЛА}_i} = S^{0,k,0} = 2S^{0,k}, \quad (1)$$

де $S^{0,k}$ – відстань від точки 0 до точки k;

k – точка розташування i-го МБПЛА у складі ЛБМ під час j-го циклу чергування ($i = 1, n; j = 1, m$).

Точка розташування МБПЛА у складі ЛБМ під час кожного наступного циклу чергування може змінюватися (рис. 2).

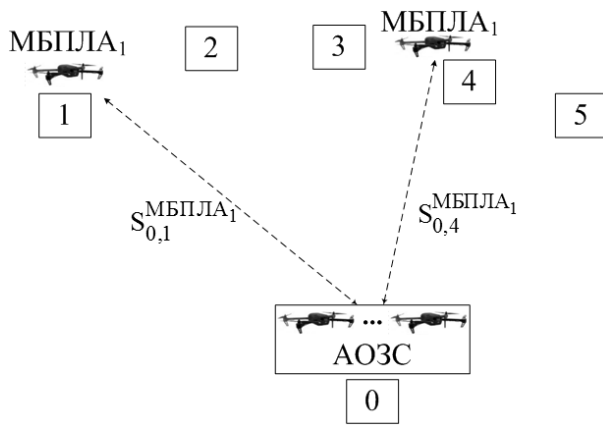


Рис. 2. Приклад зміни точки розташування МБПЛА у ЛБМ

Наприклад, МБПЛА₁, який рухався за «маршрутом точка 0 → точка 1 → точка 0» у першому циклі чергування, у другому циклі рухається за маршрутом «точка 0 → точка 4 → точка 0».

Відстані, що подолав МБПЛА₁ під час першого та другого циклів чергування можуть бути розраховані за (2) та (3) відповідно.

$$S_1^{МБПЛА_1} = S_{0,1,0} = 2S_{0,1}. \quad (2)$$

$$S_2^{МБПЛА_1} = S_{0,4,0} = 2S_{0,4}. \quad (3)$$

Сумарна відстань, яку долає БПЛА₁ протягом 2-х циклів чергування може бути розрахована за наступною формулою:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma}^{МБПЛА_1} &= S_1^{МБПЛА_1} + S_2^{МБПЛА_1} = \\ &= 2S_{0,1} + 2S_{0,4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким чином, формула для визначення сумарної відстані, яку долає і-й БПЛА за m циклів чергування може бути представлена у загальному вигляді так:

$$S_{\Sigma}^{МБПЛА_i} = \sum_{j=1}^m S_j^{МБПЛА_i}. \quad (5)$$

У якості правила при плануванні маршрутів польотів МБПЛА при функціонуванні ЛБМ пропонується використовувати критерій максимуму – вибір точок розташування МБПЛА у складі ЛБМ має здійснюватися з дотриманням умови

$$\begin{cases} \max \left(\sum_{j=1}^m S_j^{МБПЛА_{\alpha}} - \sum_{j=1}^m S_j^{МБПЛА_{\beta}} \right) \rightarrow \min, \\ \forall \alpha, \beta (\alpha \neq \beta); \alpha = \overline{1, n}; \beta = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (6)$$

Ця задача може бути зведена до задачі про пошук найкоротшого шляху для кожного окремого МБПЛА із забезпеченням балансування навантаження між МБПЛА в ході виконання поставлених завдань.

Існує велика кількість методів пошуку найкоротшого шляху [8-11], які базуються на аналізі графів. Суттєвим недоліком цих методів є пошук найкоротшого шляху без урахування циклічних повторювань маршрутів.

Тому для вирішення цієї задачі пропонується застосовувати наступний метод.

Припустимо, що під час першого циклу чергування кожен з п'яти МБПЛА, що входять до складу ЛБМ, рухається з АОЗС до визначеного довільним чином місця в ЛБМ та повертається на АОЗС (рис. 2).

Починаючи з другого циклу здійснюється балансування навантаження між МБПЛА, яке полягає у корегуванні маршруту, що передбачає наступну послідовність дій.

1. Будуються два одномірних масиви:

– відстаней, пройдених кожним МБПЛА за перший цикл чергування (для наступних циклів – сумарних відстаней, пройдених кожним МБПЛА за всі попередні цикли)

$$S^{МБПЛА} = \left| S_{\Sigma}^{МБПЛА_i} \right|, i = \overline{1, 5}; \quad (7)$$

– довжин маршрутів від АОЗС до кожної з можливих точок розташування МБПЛА у складі ЛБМ та у зворотному напрямку

$$S^{маршр} = \left| S_{0,k,0} \right|, k = \overline{1, 5}. \quad (8)$$

2. Здійснюється упорядкування отриманих масивів:

– $S^{МБПЛА}$ – за зменшенням значень елементів із отриманням нового одномірного масиву $S^{МБПЛА}(\downarrow)$;

– $S^{маршр}$ – за збільшенням значень елементів з отриманням нового одномірного масиву $S^{маршр}(\uparrow)$.

3. Зіставляючи елементи масивів $S^{МБПЛА}(\downarrow)$ та $S^{маршр}(\uparrow)$, що перебувають на однакових рядках, отримуємо точку розташування k для МБПЛА_i, до

якої він прямує з АОЗС (точки 0) і з якої знову повертається до АОЗС (точки 0).

Наведена послідовність дій повторюється у кожному циклі чергування протягом всього часу функціонування ЛБМ.

Розглянемо, як працює запропонований метод для ЛБМ, поданої на рис. 1.

Задамо наступні вихідні дані.

1. Відстані від можливих точок розташування МБПЛА у ЛБМ до АОЗС дорівнюють:

$$S_{0,1} = 0,54 \text{ км};$$

$$S_{0,2} = 0,51 \text{ км};$$

$$S_{0,3} = 0,50 \text{ км};$$

$$S_{0,4} = 0,51 \text{ км};$$

$$S_{0,4} = 0,54 \text{ км}.$$

2. Кількість циклів чергування $m = 4$.

Прийmemo припущення про те, що в першому циклі чергування номера точок відповідають номерам МБПЛА, які їх відвідують. Ці маршрути показані у табл. 1.

Таблиця 1

Маршрути польоту для кожного МБПЛА у другому циклі чергування

МБПЛА	Маршрут польоту
МБПЛА ₁	«точка 0 → точка 1 → точка 0»
МБПЛА ₂	«точка 0 → точка 2 → точка 0»
МБПЛА ₃	«точка 0 → точка 3 → точка 0»
МБПЛА ₄	«точка 0 → точка 4 → точка 0»
МБПЛА ₅	«точка 0 → точка 5 → точка 0»

Далі розрахунки проведемо у наступному порядку.

Визначення маршрутів для другого циклу чергування.

1. Відповідно до (7, 8) будуються одинірні масиви:

– відстаней, пройдених МБПЛА за перший цикл чергування

$$S^{\text{МБПЛА}} = \begin{pmatrix} 1,08 \\ 1,02 \\ 1,00 \\ 1,02 \\ 1,08 \end{pmatrix};$$

– довжин маршрутів від АОЗС до кожної з можливих точок розташування МБПЛА у складі ЛБМ та у зворотному напрямку

$$S^{\text{маршр}} = \begin{pmatrix} 1,08 \\ 1,02 \\ 1,00 \\ 1,02 \\ 1,08 \end{pmatrix}.$$

2. Здійснюється упорядкування:

– масиву $S^{\text{МБПЛА}}$ за зменшенням значень елементів із отриманням нового одинірного масиву

$$S^{\text{МБПЛА}}(\downarrow) = \begin{pmatrix} S^{\text{МБПЛА}_1} \\ S^{\text{МБПЛА}_5} \\ S^{\text{МБПЛА}_2} \\ S^{\text{МБПЛА}_4} \\ S^{\text{МБПЛА}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,08 \\ 1,08 \\ 1,02 \\ 1,02 \\ 1,00 \end{pmatrix};$$

– масиву $S^{\text{маршр}}$ за збільшенням значень елементів із отриманням нового одинірного масиву

$$S^{\text{маршр}}(\uparrow) = \begin{pmatrix} S_{0,3,0} \\ S_{0,2,0} \\ S_{0,4,0} \\ S_{0,1,0} \\ S_{0,5,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,00 \\ 1,02 \\ 1,02 \\ 1,08 \\ 1,08 \end{pmatrix}.$$

Відзначимо, що процедура формування масивів $S^{\text{маршр}}$ та $S^{\text{маршр}}(\uparrow)$ здійснюється один раз під час другого циклу чергування. Надалі завжди використовується отриманий під час другого циклу масив $S^{\text{маршр}}(\uparrow)$.

3. Зіставляючи елементи масивів $S^{\text{МБПЛА}}(\downarrow)$ та $S^{\text{маршр}}(\uparrow)$, отримуємо

$$\begin{pmatrix} S^{\text{МБПЛА}_1} \\ S^{\text{МБПЛА}_5} \\ S^{\text{МБПЛА}_2} \\ S^{\text{МБПЛА}_4} \\ S^{\text{МБПЛА}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{3,0} \\ S_{2,0} \\ S_{4,0} \\ S_{1,0} \\ S_{5,0} \end{pmatrix}.$$

Звідки визначаємо маршрути польоту у другому циклі чергування і подаємо їх у вигляді табл. 2.

Таблиця 2

Маршрути польоту для кожного МБПЛА у другому циклі чергування

МБПЛА	Маршрут польоту
МБПЛА ₁	«точка 0 → точка 3 → точка 0»
МБПЛА ₂	«точка 0 → точка 4 → точка 0»
МБПЛА ₃	«точка 0 → точка 5 → точка 0»
МБПЛА ₄	«точка 0 → точка 1 → точка 0»
МБПЛА ₅	«точка 0 → точка 2 → точка 0»

Визначення маршрутів польоту у третьому циклі.

1. Відповідно до (7) будується одномірний масив відстаней, пройдених МБПЛА сумарно за перший та другий цикл чергування

$$S^{МБПЛА} = \begin{pmatrix} 1,08 \\ 1,02 \\ 1,00 \\ 1,02 \\ 1,08 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1,00 \\ 1,02 \\ 1,08 \\ 1,08 \\ 1,02 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,08 \\ 2,04 \\ 2,08 \\ 2,10 \\ 2,10 \end{pmatrix}.$$

2. Здійснюється упорядкування отриманого масиву $S^{МБПЛА}$ за зменшенням значень елементів із отриманням нового одномірного масиву

$$S^{МБПЛА}(\downarrow) = \begin{pmatrix} S^{МБПЛА_4} \\ S^{МБПЛА_5} \\ S^{МБПЛА_1} \\ S^{МБПЛА_3} \\ S^{МБПЛА_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,10 \\ 2,10 \\ 2,08 \\ 2,08 \\ 2,04 \end{pmatrix}.$$

3. Зіставляючи елементи масивів $S^{МБПЛА}(\downarrow)$ та $S^{маршр}(\uparrow)$, отримуємо

$$\begin{pmatrix} S^{МБПЛА_4} \\ S^{МБПЛА_5} \\ S^{МБПЛА_1} \\ S^{МБПЛА_3} \\ S^{МБПЛА_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{3,0} \\ S_{2,0} \\ S_{4,0} \\ S_{1,0} \\ S_{5,0} \end{pmatrix}.$$

Звідки визначаємо маршрути польоту у третьому циклі і подаємо їх у вигляді табл. 3.

Таблиця 3

Маршрути польоту для кожного МБПЛА у другому циклі чергування

МБПЛА	Маршрут польоту
МБПЛА ₁	«точка 0 → точка 4 → точка 0»
МБПЛА ₂	«точка 0 → точка 5 → точка 0»
МБПЛА ₃	«точка 0 → точка 1 → точка 0»
МБПЛА ₄	«точка 0 → точка 3 → точка 0»
МБПЛА ₅	«точка 0 → точка 2 → точка 0»

Визначення маршрутів польоту у четвертому циклі.

1. Відповідно до (7) будується одномірний масив відстаней, пройдених МБПЛА сумарно під час першого-третього циклів чергування

$$S^{МБПЛА} = \begin{pmatrix} 2,08 \\ 2,04 \\ 2,08 \\ 2,10 \\ 2,10 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1,02 \\ 1,08 \\ 1,08 \\ 1,00 \\ 1,02 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,10 \\ 3,12 \\ 3,16 \\ 3,10 \\ 3,12 \end{pmatrix}.$$

2. Здійснюється упорядкування отриманого масиву $S^{МБПЛА}$ за зменшенням значень елементів із отриманням нового одномірного масиву

$$S^{МБПЛА}(\downarrow) = \begin{pmatrix} S^{МБПЛА_3} \\ S^{МБПЛА_2} \\ S^{МБПЛА_5} \\ S^{МБПЛА_1} \\ S^{МБПЛА_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,16 \\ 3,12 \\ 3,12 \\ 3,10 \\ 3,10 \end{pmatrix}.$$

3. Зіставляючи елементи масивів $S^{МБПЛА}(\downarrow)$ та $S^{маршр}(\uparrow)$, отримуємо

$$\begin{pmatrix} S^{МБПЛА_3} \\ S^{МБПЛА_2} \\ S^{МБПЛА_5} \\ S^{МБПЛА_1} \\ S^{МБПЛА_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{3,0} \\ S_{2,0} \\ S_{4,0} \\ S_{1,0} \\ S_{5,0} \end{pmatrix}.$$

Звідки визначаємо маршрути польоту у третьому циклі і подаємо їх у вигляді табл. 4.

Таблиця 4

Маршрути польоту для кожного МБПЛА у другому циклі чергування

МБПЛА	Маршрут польоту
МБПЛА ₁	«точка 0 → точка 1 → точка 0»
МБПЛА ₂	«точка 0 → точка 2 → точка 0»
МБПЛА ₃	«точка 0 → точка 3 → точка 0»
МБПЛА ₄	«точка 0 → точка 5 → точка 0»
МБПЛА ₅	«точка 0 → точка 4 → точка 0»

Висновки

Зазначені переваги МБПЛА над БПЛА інших типів та обґрунтована доцільність використання МБПЛА у якості ефективного і недорогого інструменту для побудови ЛБМ, що може використовуватися, наприклад, для забезпечення бездротового зв'язку між постом контролю автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки та кризовим центром АЕС у разі пошкодження дротового зв'язку між ними.

Проведено аналіз досліджень, присвячених питанням забезпечення безперервної роботи одиничних БПЛА та їх флотів (роїв) шляхом використання АОЗС. Відзначено, що питанням балансування навантаження між БПЛА в ході виконання ними своїх завдань у аналізованих роботах приділено недостатньо уваги.

Розглянуто функціонування ЛБМ, що складається з п'яти МБПЛА та однієї АОЗС.

Завдання цієї ЛБМ полягає у передачі даних моніторингу радіаційної обстановки у разі пошкодження дротового каналу між ПК та КЦ шляхом організації наступних каналів:

- WiFi каналу між ПК та ЛБПЛА;
- LoRaWAN каналу між ЛБПЛА та КЦ.

ЛБМ складається з двох сегментів:

1) сегменту Wi-Fi, що включає обладнання WiFi у ПК, обладнання WiFi на борту МБПЛА та обладнання WiFi на борту ЛБПЛА;

2) сегмент LoRaWAN, що включає обладнання LoRaWAN на борту ЛБПЛА та обладнання LoRaWAN у КЦ.

Сформульована задача щодо планування маршрутів польотів БПЛА з використанням мінімаксного критерію.

Показано, що поставлена задача може бути зведена до задачі про пошук найкоротшого шляху для кожного окремого МБПЛА з вирівнюванням навантаження між МБПЛА.

Розглянуто методу балансування навантаження між МБПЛА у складі ЛБМ шляхом корегування маршрутів їх польотів між АОЗС та ЛБМ під час кожного наступного циклу чергування.

Показано можливість застосування запропонованого методу для чотирьох циклів чергування МБПЛА.

Література

1. Система послеварийного моніторингу АЕС 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. Kliushnikov, I. M., Fesenko, H. V., & Kharchenko, V. S. (2019). Using automated battery replacement stations for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP post-accident monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*, 92(4), 30-38.
3. Фетисов, В. С. Автоматические сервисные станции для обслуживания электрических беспилотных летательных аппаратов : монография [Текст] / В. С. Фетисов, А. Е. Артемьев, Д. Ф. Муфазалов – Москва: «Инновационное машиностроение», 2017. – 253 с.
4. Boggio-Dandry, A., & Soyata, T. (2018). Perpetual flight for UAV drone swarms using continuous energy replenishment. *9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 478-484.
5. Shin, M., Kim, J., & Levorato, M. (2019). Auction-based charging scheduling with deep learning framework for multi-drone networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 4235-4248.
6. Michini, B., Toksoz, T., Redding, J., Michini, M., How, J., Vavrina, M., & Vian, J. (2011). Automated battery swap and recharge to enable persistent UAV missions. *Infotech@Aerospace 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1721.1/8>. (Accessed 10.11.2019).
7. Fetisov, V., Dmitriyev, O., Neugodnikova, L., Bersenyov, S., & Sakayev, I. (2012). Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters. *XX IMEKO World Congress*, 85.
8. Bauer, R., Delling, D., Sanders, P., Schieferdecker, D., Schultes, D., & Wagner, D. Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 15, 1-31.
9. Wang, Z. J., Han, W. Y., & Li, Y. J. (2010). Shortest path problem with multiple shortest paths. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 42(9), 1428–1431.
10. Abraham, I., Delling, D., Goldberg, A. V., & Werneck, R. F. (2011). A hub-based labeling algorithm for shortest paths in road networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 6630, 230-241.
11. Silverbush, D., & Sharan, R. (2014). Network orientation via shortest paths. *Bioinformatics*, 30(10), 1449-1455.

References

1. Sаченко, А. А., Кочан, В. В., Харченко, В. С., Ястребенецкий, М. А., Фесенко, Н. В., & Яновский, М. Е. (2017). NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: concept, design principles. *Nuclear and Radiation Safety*, 73(1), 24-29.
2. Kliushnikov, I. M., Fesenko, H. V., & Kharchenko, V. S. (2019). Using automated battery replacement stations for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP post-accident monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*, 92(4), 30-38.

3. Fetisov, V. S., Artem'ev, A. E., & Mufazzalov, D. F. (2017). *Automatic Service Stations for Servicing Electric Unmanned Aerial Vehicles*: Monograph. – Moscow, 253.
4. Boggio-Dandry, A., & Soyata, T. (2018). Perpetual flight for UAV drone swarms using continuous energy replenishment. *9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 478-484.
5. Shin, M., Kim, J., & Levorato, M. (2019). Auction-based charging scheduling with deep learning framework for multi-drone networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 4235-4248.
6. Michini, B., Toksoz, T., Redding, J., Michini, M., How, J., Vavrina, M., & Vian, J. (2011). Automated battery swap and recharge to enable persistent UAV missions. *Infotech@Aerospace 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1721.1/8>. (Accessed 10.11.2019).
7. Fetisov, V., Dmitriyev, O., Neugodnikova, L., Bersenyov, S., & Sakayev, I. (2012). Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters. *XX IMEKO World Congress*, 85.
8. Bauer, R., Delling, D., Sanders, P., Schieferdecker, D., Schultes, D., & Wagner, D. Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 15, 1-31.
9. Wang, Z. J., Han, W. Y., & Li, Y. J. (2010). Shortest path problem with multiple shortest paths. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 42(9), 1428-1431.
10. Abraham, I., Delling, D., Goldberg, A. V., & Werneck, R. F. (2011). A hub-based labeling algorithm for shortest paths in road networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 6630, 230-241.
11. Silverbush, D., & Sharan, R. (2014). Network orientation via shortest paths. *Bioinformatics*, 30(10), 1449-1455.

Рецензент: д-р техн. наук проф. І.А.Чуб, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах, Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

Автор: КЛЮШНІКОВ Ігор Миколайович
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба
E-mail – 1973klin@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9419-7825>

Автор: ФЕСЕНКО Герман Вікторович
кандидат технічних наук, доцент
Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
E-mail – h.fesenko@csn.khai.edu
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4084-2101>

LOAD BALANCING BETWEEN UNMANNED AERIAL VEHICLES OF A FLYING WIRELESS NETWORK USING AUTOMATIC REPLACEMENT AND CHARGING STATIONS

I. Kliushnikov, H. Fesenko

¹Kharkiv National University of Air Force, Ukraine

²National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Ukraine

Today, multi-rotor UAVs (MUAVs) equipped with an electric motor are considered to be used as an affordable and cost-efficient tool to deploy flying wireless networks (FWNs). Nevertheless, the popular MUAVs have an endurance of about 30 minutes only. The last fact presents a significant barrier to use FWNs in complex, long-term missions. To overcome this problem, MUAVs can use shift schedule with a possibility for free schedule to be served at an automatic replacement and charging station (ARCS). After visiting the ARCS, MUAVs can either use the same route every new duty cycle or change the route.

The operation of a flying wireless network, consisting of five MUAVs and using one ARCS, is considered. The purpose of the flying wireless network is to organize the transmission of radiation monitoring data in the event of damage of the wired channel between a monitoring station and the crisis centre by creating: WiFi channel between the monitoring station and UAV of an aircraft type; LoRaWAN channel between AUAV and the crisis centre.

The following assumptions take place: the UAV of an aircraft type has sufficient flight time to complete the mission; five MUAVs periodically visit the ARCS; the location of the MUAVs within the flying wireless network during each subsequent cycle may be changed.

The problem of MUAV flight planning using the maximin criterion is formulated. It is shown that this problem can be transformed to the problem of finding the shortest path for each individual MUAV for load balancing between them.

The stages of implementation of the method of load balancing between the MUAVs of the flying wireless network are considered. The method requires adjusting flights routes for the MUAVs between the ARCS and the flying wireless network for each duty cycle. An example of the proposed method application to adjust flights routes for each of the three duty cycles is given.

Keywords: flying wireless network, load balancing, unmanned aerial vehicle, automatic replacement and charging station, one-dimensional array, ordered array, flight route