

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2018.2-56.1>

УДК 629.7.014-519.064.5-022.332:621.311.25-047.36

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

І. М. Ключніков, кандидат технічних наук,
провідний науковий співробітник
наукового центру Повітряних сил
Харківського національного університету
Повітряних сил ім. І. Кожедуба

**ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ РОЗФАРБОВУВАННЯ ГРАФА
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРЯДКУ ЗБИРАННЯ ДАНИХ
РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ З ТОЧОК "РАНДЕВУ"
БЕЗПРОВОДНОЇ ЛІТАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ**

Присвячено використанню жадібного алгоритму розфарбовування графа для визначення кількості й порядку застосування БПЛА літакового типу (ЛБПЛА) для збирання інформації від точок "рандеву" літальної безпроводної мережі на основі БПЛА (БПЛА-БМ) під час післяаварійного моніторингу Запорізької АЕС (ЗАЕС). Запропонована спрощена схема розгортання БПЛА-БМ для організації передачі даних від постів контролю автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО) до кризового центру під час післяаварійного моніторингу АЕС. Розроблено та описано схему розгортання підсистем БПЛА-БМ для організації передачі даних між чотирма постами контролю АСКРО ЗАЕС і точками "рандеву" у випадку пошкодження провідних каналів зв'язку. Використовуючи побудований на бітових операціях над матрицею суміжності жадібний алгоритм розфарбовування графа, визначено, що для збирання даних від чотирьох постів контролю АСКРО ЗАЕС необхідно використовувати три ЛБПЛА

© Г. В. Фесенко, І. М. Ключніков, 2018

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; алгоритм розфарбовування графа; атомна електростанція; безпроводна мережа; wi-fi; LoRaWAN; післяаварійний моніторинг; пост контролю; кризовий центр.

Посвящено использованию жадного алгоритма раскраски графа для определения количества и порядка применения БПЛА самолетного типа (ЛБПЛА) для сбора информации от точек “рандеву” летающей беспроводной сети на основе БПЛА (БПЛА-БС) во время послеаварийного мониторинга Запорожской АЭС (ЗАЭС). Предложена упрощенная схема развертывания БПЛА-БС для организации передачи данных от постов контроля автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) в кризисный центр в ходе послеаварийного мониторинга АЭС. Разработана и описана схема развертывания подсистем БПЛА-БС для организации передачи данных между четырьмя постами контроля АСКРО ЗАЭС и точками “рандеву” в случае повреждения проводных каналов связи. Используя построенный на битных операциях над матрицей смежности жадный алгоритм раскраски графа, определено, что для сбора данных от четырех постов контроля АСКРО ЗАЭС необходимо использовать три ЛБПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; алгоритм раскраски графа; атомная электростанция; беспроводная сеть; Wi-Fi; LoRaWAN; послеаварийный мониторинг; пост контроля; кризисный центр.

Wired networks, connecting monitoring stations (MS) of the automated radiation monitoring system (ARMS) to the crisis centre (CrS), can be damaged as a result of an NPP accident. To cope with the problem, an unmanned aerial vehicle (UAV)-enabled wireless network (UEWN), can be deployed. The aim of the paper is to develop an approach based on a graph coloring algorithm to determine the number of UAVs of an airplane-type and define the order of their use for gathering data from rendezvous points of a deployed UEWN during Zaporizhzhia NPP (ZNPP) post-accident monitoring missions. The existing graph coloring algorithms are analyzed and presented as a table. For later use, the greedy graph coloring algorithm based on bitwise operations on the adjacency matrix is selected. A simplified scheme of deployment of a UEWN for transmitting the data from the MS to the CrS during NPP post-accident monitoring missions was developed and described. Two segments within the UEWN were considered:

1) *Wi-Fi segment, comprising the WiFi equipment of the MS, the onboard WiFi equipment of the UAVs of a multi-rotor type (MUAVs), and onboard WiFi equipment of the UAV of an airplane-type (AUAV); 2) LoRaWAN segment, comprising the LoRaWAN equipment of the AUAV and the LoRaWAN equipment of the CrS. A scheme of UEWN subsystems deployment for the organization of data transfer between four monitoring stations of ARMS for ZNPP and rendezvous points in case of loss of wired networks. Using the selected graph coloring algorithm, it has been determined that three AUAVs are required for gathering and transmitting the data from four MSs to the CrS. Further studies should focus on investigating the effect of the location of the automatic battery replacement stations and their features on the UEWN's functioning.*

Key words: unmanned aerial vehicle; graph coloring algorithm, nuclear power plant; wireless network; WiFi; LoRaWAN; post-accident monitoring; monitoring station; crisis centre.

Постановка проблеми. Для здійснення безперервного контролю радіаційної обстановки (РО) на проммайданчику АЕС, у санітарно-захисній зоні та зоні спостереження в усіх режимах експлуатації АЕС в обсязі, достатньому для оперативного висновку про відповідність/невідповідність РО вимогам нормативних документів, що визначають заходи та порядок забезпечення радіаційної безпеки на АЕС, створюється автоматизована система контролю радіаційної обстановки (АСКРО). Використання АСКРО дозволяє підвищити рівень контролю радіаційних параметрів АЕС шляхом автоматизації процесів вимірювання, збирання, обробки, візуалізації, архівування та зберігання інформації про параметри РО. Основними елементами такої системи виступають пости контролю (ПК). Під час виникнення аварії на майданчику (надзвичайної ситуації (НС) на місцевому або регіональному рівні) або комунальної аварії (НС на регіональному або державному рівні) ПК мають забезпечувати зовнішній кризовий центр (КЦ) необхідною інформацією щодо РО за допомогою провідних каналів зв'язку. Однак такі канали можуть бути пошкоджені внаслідок аварій, що потребуватиме пошуку альтернативних шляхів передачі інформації до КЦ. Одним з них може бути розгортання безпроводної мережі на базі БПЛА (БПЛА-БМ) [1–3]. У разі створення такої мережі виникає необхідність організації збирання даних про РО від БПЛА, що є точками “рандеву” (ТР).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уявімо, що ТР можуть передавати інформацію тільки в окремі часові інтервали. В цьому випадку найбільш цікавим є підхід, що запропонований у [4]. Він передбачає використання алгоритму розфарбовування графа для призначення БПЛА на відповідні точки у відповідні часові інтервали (у [4] такими точками виступають призначені для атаки бойовими БПЛА цілі, а інтервалами – часові інтервали доступності цілей для атаки). Проведений аналіз літератури [5–13] показує наявність великої кількості евристичних алгоритмів розфарбовування графа, які для більшої наочності ототоженні з джерелом їх описання і подані у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Евристичні алгоритми розфарбовування графа

№ з/п	Суть евристичного алгоритму	Джерело
1	Жадібний алгоритм розфарбовування (Greedy-Colour)	[5]
2	Розфарбовування графа з обміном кольорами (Colour-with-Interchange)	[6]
3	Послідовне розфарбовування графа без упорядкування його вершин (Random-Sequential-Colour)	[6]
4	Розфарбовування з обміном кольорами з упорядкуванням вершин графа за спаданням їх ступенів (Largest-First-Interchange-Colour)	[6]
5	Послідовне розфарбовування з динамічним упорядкуванням вершин графа (Saturation-Colour)	[6]
6	Послідовне розфарбовування графа з упорядкуванням його вершин за спаданням їх ступенів (Largest-First-Colour)	[7]
7	Послідовне розфарбовування графа починаючи з вершин максимальних ступенів (Smallest-Last-Colour)	[8]
8	Розфарбовування з обміном кольорами без упорядкування вершин графа (Random-Sequential-Interchange-Colour)	[9]
9	Розфарбовування з обміном кольорами, починаючи з вершин максимальних ступенів графа (Smallest-Last-Interchange-Colour)	[10]
10	Жадібне розфарбовування графа, де його вершини упорядковуються таким чином, що в кожній є принаймні одна сусідня, пофарбована в попередній колір (Connected-Sequential-Colour)	[11]
11	Жадібне розфарбовування незалежних підмножин (Greedy Independent Sets-Colour).	[12]
12	Жадібний алгоритм розфарбовування графа, побудований на бітових операціях над матрицею суміжності	[13]

Для подальшого використання обрано жадібний алгоритм розфарбовування графа, побудований на бітових операціях над матрицею суміжності, оскільки він характеризується більшою простотою і швидкістю розрахунків [13].

Мета статті – розробка підходу на основі жадібного алгоритму розфарбовування графа щодо визначення кількості й порядку застосування БПЛА літакового типу (ЛБПЛА) для збирання інформації від точок “рандеву” безпроводної літальної мережі під час післяаварійного моніторингу Запорізької АЕС (ЗАЕС).

Завдання дослідження:

– запропонувати спрощену схему розгортання БПЛА-БМ для організації передачі інформації від постів контролю до кризового центру під час післяаварійного моніторингу АЕС;

– розробити й описати схему розгортання підсистем БПЛА-БМ для організації передачі даних між чотирма постами контролю АСКРО ЗАЕС і точками “рандеву” у випадку пошкодження проводних каналів зв’язку;

– використовуючи жадібний алгоритм розфарбовування графа, визначити кількість і порядок застосування ЛБПЛА для збирання даних від точок “рандеву” під час післяаварійного моніторингу ЗАЕС.

Виклад основного матеріалу. В процесі функціонування БПЛА-БМ здійснюється збирання, накопичення даних з ПК та подальша їх передача до КЦ.

Нехай маємо такий сценарій. Проводна мережа АСКРО АЕС, яка поєднує ПК безпосередньо з КЦ, була пошкоджена внаслідок аварії. З метою продовження постачання КЦ необхідними даними про РО від ПК розгортається БПЛА-БМ (рис. 1), що складається з n БПЛА мультироторного типу (МБПЛА $1_R, \dots, \text{МБПЛА}(n-1)_R, \text{МБПЛА}_{n_{RG}}$) та одного БПЛА літакового типу (ЛБПЛА $_{RG}$).

МБПЛА $1_R, \dots, \text{МБПЛА}(n-1)_R$ працюють як ретранслятори.

МБПЛА $_{n_{RG}}$ може працювати:

– як шлюз для отримання та зберігання даних від МБПЛА $(n-1)_R$;

– як ретранслятор для передачі даних до ЛБПЛА $_{RG}$, виступаючи при цьому точкою “рандеву”.

ЛБПЛА $_{RG}$ взаємодіє з МБПЛА $_{n_{RG}}$ у встановлений час свого режиму патрулювання і виконує функції:

– шлюзу для отримання та зберігання даних від МБПЛА $_{n_{RG}}$;

– ретранслятора для передачі даних до КЦ.

Використовуються такі технології зв'язку:

1) wi-fi (IEEE 802.11) для забезпечення каналу КЦ-БПЛА та каналу БПЛА-БПЛА;

2) енергоефективна мережа далекого радіуса дії Low-power Wide-area Network (LoRaWAN) для забезпечення каналу ЛБПЛА_{RG}-КЦ.

Таким чином, БПЛА-БМ складається з двох сегментів:

1) сегмента wi-fi, що включає обладнання Wi-Fi у ПК, обладнання Wi-Fi на борту МБПЛА та обладнання Wi-Fi на борту ЛБПЛА;

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

МБПЛА_{1R}, ..., МБПЛА_{(n-1)R}, МБПЛА_{nRG} утворюють флот МБПЛА.

Для забезпечення безперебійної роботи БПЛА-БМ використовується мережа автоматичних обмінно-зарядних станцій: АОЗС₁, ..., АОЗС_m.

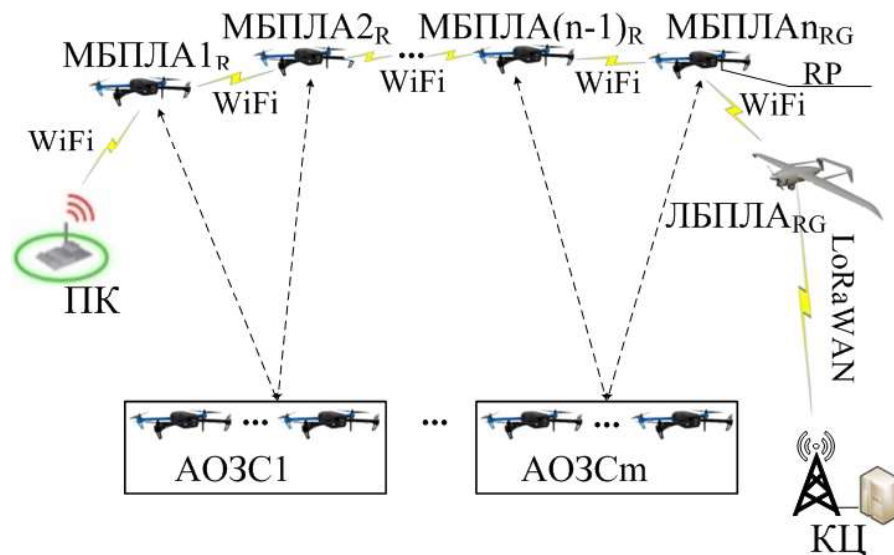


Рис. 1. Спрощена схема розгортання БПЛА-БМ для організації передачі даних від посту контролю до кризового центру під час післяаварійного моніторингу АЕС

Для забезпечення передачі даних про РО лише тільки від одного ПК у разі пошкодження провідного каналу ПК-КЦ достатньо розгортання у складі БПЛА-БМ лише однієї підсистеми на основі МБПЛА для організації

передачі даних від пошкодженого ПК до ТР і використання лише одного ЛБПЛА, для організації каналу wi-fi ТР–ЛБПЛА та LoRaWAN каналу ЛБПЛА–КЦ.

Однак під час аварії на АЕС можуть бути пошкоджені проводні канали зв'язку з більшою кількістю постів контролю. В цьому випадку схема розгортання БПЛА-БМ буде дещо складнішою. У загальному вигляді вона матиме у своєму складі:

- m підсистем на основі МБПЛА, які забезпечуватимуть передачу даних від пошкоджених постів контролю до відповідних точок “рандеву”;

- n ЛБПЛА для обльоту точок “рандеву” з метою збирання даних про РО шляхом установа каналу ТР–ЛБПЛА та подальшої їх передачі до КЦ за каналом ЛБПЛА–КЦ.

Розглянемо випадок (рис. 2), коли розгорнутий після аварії зовнішній КЦ Запорізької АЕС (ЗАЕС) (на рис. 2 не зображений) унаслідок пошкодження проводних ліній зв'язку втратив зв'язок з чотирма ПК (ПК9, ПК14, ПК15 та ПК16 [14]), що входять до складу АСКРО цієї станції. На рис. 2 зображено утворені на основі МБПЛА чотири підсистеми для передачі даних від пошкоджених постів контролю до відповідних точок “рандеву”.



Рис. 2. Схема розгортання підсистем БПЛА-БМ на основі МБПЛА для організації передачі даних від постів контролю до точок “рандеву” під час післяаварійного моніторингу ЗАЕС

Надалі, щоб подати схему розгортання БПЛА-БМ у кінцевому варіанті, нам необхідно визначити скільки ЛБПЛА потрібно використати й у якій послідовності вони мають здійснювати обліт точок “рандеву” для отримання від них даних про РО.

Час початку та закінчення функціонування кожної підсистеми на основі МБПЛА залежить від:

- часу початку розгортання підсистеми;
- ємності акумуляторів МБПЛА;
- віддалення АОЗС, які здійснюють заміну акумуляторів БПЛА, від місця БПЛА в підсистемі.

Як уже було зазначено, наприкінці функціонування кожної підсистеми необхідно передавати накопичені дані на ЛБПЛА для їх подальшої передачі до КЦ. Час передачі даних (час функціонування каналу ТР–ЛБПЛА) визначається інтервалом:

$$T_{TRi} = (t_i^s; t_i^e), \quad (1)$$

де t_i^s – час початку функціонування i -ї ТР як ретранслятора даних на ЛБПЛА;

t_i^e – час закінчення функціонування i -ї ТР як ретранслятора даних на ЛБПЛА.

Під час функціонування системи, що розглядається, можуть виникати випадки, коли ці інтервали перетинаються, тобто виконується умова:

$$(t_i^s; t_i^e) \cap (t_j^s; t_j^e) \neq \emptyset; i, j \in (\overline{1, n}); i \neq j \quad (2)$$

За таких умов одного ЛБПЛА для забезпечення отримання та передачі даних від усіх точок “рандеву” не достатньо.

Для визначення кількості ЛБПЛА, необхідних для встановлення каналу зв'язку з кожною точкою “рандеву”, пропонується застосовувати жадібний алгоритм розфарбовування графа, побудований на бітових операціях над матрицею суміжності.

Візьмемо, що для передачі даних каналом ТР–ЛБПЛА необхідно витратити 4 хвилини. Часові інтервали передачі даних від відповідної точки

“рандеву” до ЛБПЛА подано в табл. 2. У ній показано пости контролю, з яких точки “рандеву” отримують дані.

Таблиця 2

Часові інтервали передачі даних від точок “рандеву” до ЛБПЛА

Пост контролю	Точка “рандеву”	Часовий інтервал передачі даних
ПК9	ТР4	[00.08; 00.13]
ПК14	ТР1	[00.10; 00.14]
ПК15	ТР3	[00.14; 00.19]
ПК16	ТР2	[00.12; 00.17]

Припустимо, що час, необхідний на переміщення ЛБПЛА між точками “рандеву” не враховується, оскільки вважається, що відстані між точками “рандеву” та швидкість ЛБПЛА дозволяють йому своєчасно прибувати в потрібну точку “рандеву” для отримання даних.

Розрахунки проведемо в такому порядку.

Спочатку побудуємо неорієнтований граф $G = (V, E)$ (рис. 3), де V – множина вершин (відповідають точкам “рандеву”); E – множина ребер між вершинами. Вершини мають ребра, якщо перетинаються часові інтервали передачі даних від точок “рандеву” до ЛБПЛА. Для наведених вихідних даних маємо:

$$V = \{1, 2, 3, 4\};$$

$$E = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 1), (2, 3), (3, 1), (3, 2), (3, 4), (4, 1), (4, 3)\}.$$

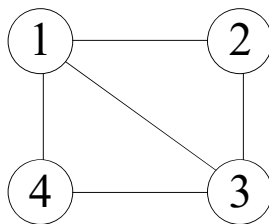


Рис. 3. Граф, що відповідає вихідним даним

Наступним кроком є побудова для графа $G = (V, E)$ матриці суміжності A розміром $n \times n = 4$, для якої значення елемента a_{ij} відповідає наявності ребра з i -ї вершини графа до j -ї вершини графа, тобто $a_{ij} \in \{0,1\}$.

Будь-яка вершина суміжна із собою, тому на головній діагоналі розташовуються одиниці. Для графа, зображеного на рис. 3, матриця суміжності має вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Далі, починаючи з першого рядка матриці суміжності A ($i = 1$), здійснюється пошук першої суміжної нефарбованої вершини, для якої $a_{1j} = 0$. Для матриці, що аналізується, всі елементи першого рядка дорівнюють одиниці. В такому випадку номер першого рядка додається до першої кольорової групи.

Далі проводиться подібна процедура для другого рядка ($i = 2$). У другому рядку суміжною нефарбованою вершиною є вершина з номером 4 ($a_{14} = 0; j = 4$).

Відповідно до алгоритму, беремо суму другого та четвертого рядків для отримання оновленого рядка матриці:

$$\begin{array}{r} 1 \ 1 \ 1 \ 0 \\ \vee \\ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \\ \hline 1 \ 1 \ 1 \ 1 \end{array}$$

Усі елементи оновленого рядка a_{2j} матриці дорівнюють одиниці, тому вершини з номерами 2 та 4 додаються до третьої кольорової групи.

Наступним аналізується третій рядок ($i = 3$). Усі елементи третього рядка дорівнюють одиниці, тому вона додається до третьої кольорової групи.

Таким чином, для забезпечення збирання та передачі даних від ПК9, ПК14, ПК15, ПК16 необхідно три ЛБПЛА (ЛБПЛА_{RG1}, ЛБПЛА_{RG2}, ЛБПЛА_{RG3}) (рис. 4), які взаємодіють з відповідними точками “рандеву” (табл. 3).

**Взаємодія ЛБПЛА з точками “рандеву”
для отримання даних від постів контролю**

Пост контролю	Точка “рандеву”	ЛБПЛА
ПК9	ТР4	ЛБПЛА _{RG1}
ПК14	ТР1	ЛБПЛА _{RG2}
ПК15	ТР3	ЛБПЛА _{RG1}
ПК16	ТР2	ЛБПЛА _{RG3}

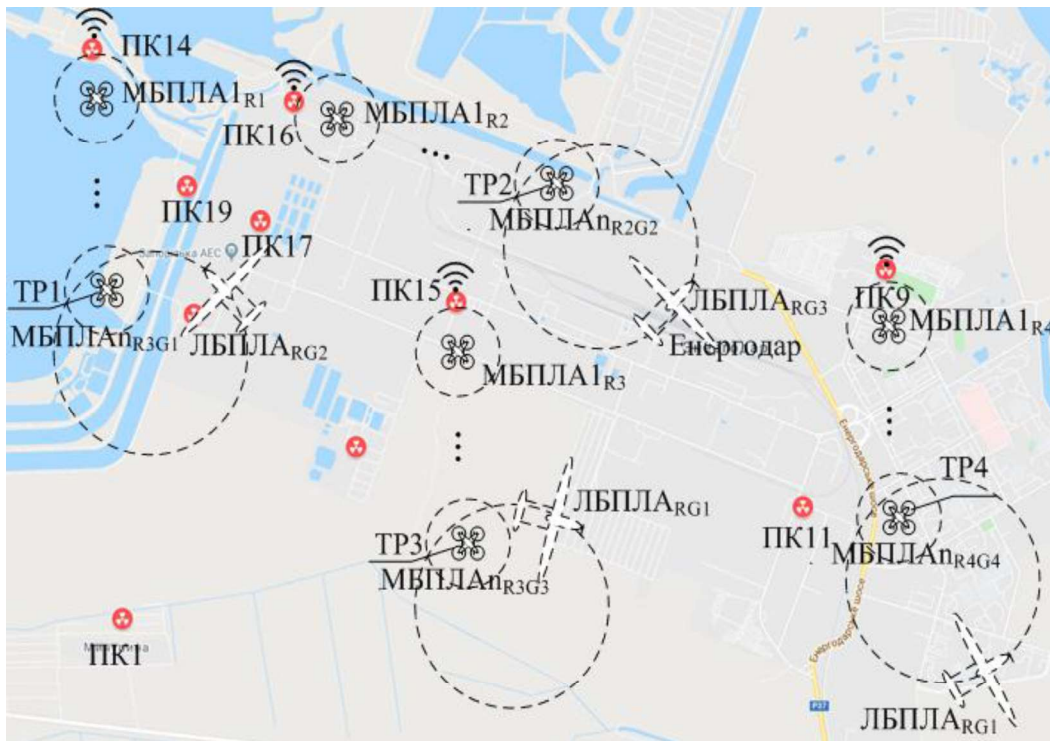


Рис. 4. Схема розгортання БПЛА-БМ для організації передачі даних від постів контролю до кризового центру під час післяварійного моніторингу ЗАЕС із позначенням порядку взаємодії БПЛА літакового типу з точками “рандеву”

Як видно з табл. 3, ЛБПЛА_{RG1} використовується для збирання та передачі даних одразу від двох постів контролю (ПК9 та ПК15), для чого спочатку взаємодіє з ТР4, а потім з ТР3.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Проаналізовано й подано у вигляді таблиці наявні евристичні алгоритми розфарбовування графа. Для подальшого використання обрано жадібний алгоритм розфарбовування графа, побудований на бітових операціях над матрицею суміжності. Запропоновано спрощену схему розгортання БПЛА-БМ для організації передачі даних від постів контролю АСКРО до кризового центру під час післяаварійного моніторингу АЕС. Розроблено й описано схему розгортання підсистем БПЛА-БМ для організації передачі даних між чотирма постами контролю АСКРО ЗАЕС і точками “рандеву” у разі пошкодження провідних каналів зв’язку. Використовуючи обраний алгоритм розфарбовування графа, визначено, що для забезпечення збирання та передачі даних від ПК9, ПК14, ПК15, ПК16 необхідно три ЛБПЛА (ЛБПЛА_{RG1}, ЛБПЛА_{RG2}, ЛБПЛА_{RG3}). При цьому ЛБПЛА_{RG1} використовується для збирання та передачі даних одразу від двох постів контролю (ПК9 та ПК15), для чого спочатку взаємодіє з ТР4, а потім з ТР3. ЛБПЛА_{RG2} взаємодіє з ТР1, а ЛБПЛА_{RG3} – з ТР2. Подальші дослідження доцільно зосередити на вивченні впливу місця розташування АОЗС та їх особливостей на час функціонування БПЛА-БМ.

Список використаних джерел:

1. Концепція побудови мобільних систем пост-аварійного моніторингу АЕС з використанням флоту квадрокоптерів / А. О. Саченко, В. В. Кочан, В. С. Харченко та ін. *Радіоелектронні комп’ютерні системи*. 2016. № 5 (79). С. 207–214.
2. Система послеаварійного моніторингу АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения / А. О. Саченко, В. В. Кочан, В. С. Харченко и др. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. № 1 (73). С. 24–29.
3. An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability / Fesenko H., Kharchenko V., Sachenko A. and oth. // *Dependable IoT for human and industry modeling, architecting, implementation*. Denmark, The Netherlands: River Publishers, 2018. P. 197–217.
4. *Mouseev B. C.* Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: Школа, 2017. 572 с.
5. Kučera L. The greedy coloring is a bad probabilistic algorithm. *Journal of Algorithms*. 1991. Vol. 12. 674–684.

-
6. Kosowski A., Manuszewski K. Classical coloring of graphs. *Contemporary Mathematics*. 2011. Vol. 352. P. 1–20.
 7. Distributed largest-first algorithm for graph coloring / J. Hansen, M. Kurbale, Ł. Kuszner, A. Nadolski. *Lecture Notes in Computer Science*. 2004. Vol. 3149. P. 804–811. DOI: 10.1007/978-3-540-27866-5.
 8. Matula D., Beck L. Smallest-last ordering and clustering and graph coloring algorithms. *Journal of the ACM (JACM)*. 1983. Vol. 30. P. 135–145.
 9. Read R. Graph theory and computing. USA, New York: Academic Press, 2014. 344 p.
 10. Matula D., Marble G., Isaacson J. Graph coloring algorithms. *Graph Theory and Computing*. USA, New York: Academic Press, 2014. P. 109–122.
 11. Hertz A., Werra D. Connected sequential colorings. *Annals of Discrete Mathematics*. 1989. Vol. 39. P. 51–59. DOI: 10.1016/S0167-5060(08)70297-8.
 12. Wu Q., Hao J.-K. Coloring large graphs based on independent set. *Computers & OR*. 2012. Vol. 39. P. 283–290. DOI: 10.1016/j.cor.2011.04.002.
 13. A fast greedy sequential heuristic for the vertex colouring problem based on bitwise operations / L. Komosko, M. Batsyn, P. Segundo, P. Pardalos. *Journal of Combinatorial Optimization*. 2016. Vol. 4. P. 1665–1677.
 14. Вестрон. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки ЗАЭС. Техническое задание. ТЗ – ВН. 702.410.34. Харьков, 2011. 124 с.

References:

1. 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 monitoringhu AES z vykorystanniam flotu kvadropteriv” [“Concept of building of NPP post-emergency monitoring mobile systems using quadrocopter fleet”], *Journal Radioelektronni i komp’iuterni systemy* [Radioelectronic and Computer Systems], vol. 5(79), pp. 207–214 [Ukraine].
2. Kharchenko V. S., Jastrebenckij M. A., Fesenko H. V., Sachenko A. A. and Kochan V. V. (2017), “Sistema posleavarijnogo monitoringa AJeS s ispol'zovaniem bespilotnyh letatel'nyh 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].

-
3. 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.
 4. Moiseev V. S. (2017), *Gruppovoye primeneniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Group use of unmanned aerial vehicles], Monograph, Kazan', 572 p. [Russia].
 5. Kučera L. (1991) “The greedy coloring is a bad probabilistic algorithm”. // Journal of Algorithm, vol. 12, pp. 674–684.
 6. Kosowski A. and Manuszewski K. (2011), “Classical coloring of graphs”. Contemporary Mathema, vol. 352, pp. 1–20.
 7. Hansen J., Kubale M., Kuszner Ł. and Nadolski A. (2004), “Distributed largest-first algorithm for graph coloring”. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3149, pp. 804–811. DOI:10.1007/978-3-540-27866-5.
 8. Matula D. and Beck L. (1983), “Smallest-last ordering and clustering and graph coloring algorithms”. Journal of the ACM (JACM), vol. 30, pp. 135–145.
 9. Read R. (2014), *Graph theory and computing*, Academic Press, USA, New York, 344 p.
 10. Matula D., Marble G. and Isaacson J. (2014), “Graph coloring algorithms”. Graph Theory and Computing, Academic Press, USA, New York, pp. 109–122.
 11. Hertz A. and Werra D. (1989), “Connected Sequential Colorings”. Annals of Discrete Mathematics, vol. 39, pp. 51–59. DOI: 10.1016/S0167-5060(08)70297-8.
 12. Wu Q. and Hao J.-K. (2012), “Coloring large graphs based on independent set”. Computers & OR, vol. 39, pp. 283–290. DOI: 10.1016/j.cor.2011.04.002.
 13. Komosko L., Batsyn M., Segundo P. and Pardalos P. (2016). “A fast greedy sequential heuristic for the vertex colouring problem based on bitwise operations”. Journal of Combinatorial Optimization, vol. 4, pp. 1665–1677.
 14. 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]