

МЕТОД ПЛАНУВАННЯ ПОЛЬОТНИХ ОПЕРАЦІЙ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВ'ЯЗАНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ

Статтю присвячено питанням планування оптимальних трас польоту безпілотних літальних апаратів (БпЛА) з використанням відомих методів комбінаторної математики, а саме методів розв'язання задачі комівояжера. Удосконалено метод оптимального планування польотів БпЛА на основі використання осереднених коефіцієнтів для забезпечення роз'єднаних вузлів та підвищення зв'язаності з'єднаних. Показано, що групування вузлів мереж зв'язку військового призначення дозволить вдвічі скоротити час на планування та маршрут польоту БпЛА.

Ключові слова: *безпроводна мережа, зв'язаність вузлів, метод осереднених коефіцієнтів, оптимальні траси, БпЛА, експлуатаційні затрати, планування польоту.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. В умовах відсутньої або зруйнованої наземної інфраструктури (у результаті військових конфліктів чи широкомасштабних бойових дій) широкого використання набувають безпроводні мережі зв'язку військового призначення (МЗВП) [1], що мають змогу оперативно розгортатися для організації інформаційної взаємодії особового складу. У таких мережах вузли мають однаковий статус (однорангові) та можуть взаємодіяти один з одним безпосередньо в зоні радіовидимості. Або вони здійснюють передачу даних з ретрансляцією повідомлень через сусідні вузли. Однак їх мобільність, швидка зміна характеру місцевості, обмежена енергетика радіоліній призводять до нестабільності з'єднань між вузлами та (або) втрати зв'язаності мережі. Саме тому постає актуальна наукова проблема забезпечення та підвищення зв'язаності вузлів МЗВП. Одним із способів її вирішення може бути застосування телекомунікаційних систем на основі ретрансляційних аероплатформ повітряного базування (літаки, гелікоптери, БпЛА тощо) [2]. Важливим завданням при використанні БпЛА є планування маршруту їх польоту, тобто знаходження необхідної кількості апаратів, розміщення та переміщення їх у просторі. Політ територіально рознесених цілей – одне з первинних завдань у системі спостереження, у якій для моніторингу цілей використовують БпЛА. Застосування автоматизованого планування маршрутів польоту – запорука ефективною роботи усієї системи. На вибір маршруту впливають такі чинники: обмежений час польоту, його безпека, множинність варіантів [3]. Існує низка методів та алгоритмів для вирішення цієї проблеми. Більшість з них не застосовні до задач великих розмірностей, оскільки складність цих алгоритмів зростає експоненційно. Часто доводиться обирати між часом роботи алгоритму та якістю отриманого розв'язку.

Така оптимізація є актуальною в умовах обмеження енергоресурсів БпЛА та часу прийняття рішення на планування польотів, а також, відповідно, при забезпеченні зв'язаності територіально рознесених вузлів МЗВП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Шляхи забезпечення зв'язаності роз'єднаних районів наземних вузлів описані в [4]. Підвищення зв'язаності мережі з'єднаних вузлів за допомогою БпЛА досліджено в [5]. Плануванню маршрутів польоту БпЛА присвячено низку наукових робіт. Наприклад, запропонований у [6] метод прокладання оптимального маршруту польоту БпЛА для збору інформації з віддалених сенсорів за критерієм мінімуму пройденого шляху дає суттєвий вииграш порівняно з відомими методами. Розроблений у [7] алгоритм фізично не реалізовується в умовах великої кількості опорних точок, за якими будується маршрут. У [8, 9] розглянуто застосування евристичних підходів до розв'язання задачі комівояжера для планування польотів груп БпЛА з мінімізацією довжини маршруту.

Недосконалість розглянутих підходів зумовлює необхідність у розробці удосконаленого алгоритму планування оптимального за критеріями часової складності та отриманої довжини маршруту методу планування польотів БпЛА для забезпечення роз'єднаних або підвищення зв'язаності з'єднаних вузлів МЗВП.

Формулювання завдання дослідження. Нехай задано граф $G = (E, V)$, де $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ – множина n вузлів МЗВП, розосереджених у деякому районі; $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ – множина, що описує відстані між вузлами, розміщеними на площині (район місцевості) заданого розміру; при цьому радіус зони покриття кожного БпЛА $R = const$.

Необхідно спланувати оптимальну трасу польоту БпЛА, що забезпечуватиме зв'язок усіх вузлів МЗВП з апаратом.

Обмеження. БпЛА переміщується прямолінійною траєкторією між точками маршруту в просторі на постійній висоті $H = const$ з постійною швидкістю $v = const$. Він повинен облетіти кожен опорну точку лише один раз, а саме:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min ; \sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, \forall j = \overline{1, N} ; \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \forall i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

де c_{ij} – відстань між вузлами (i, j) ;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{рух БпЛА від } i \text{ до } j; \\ 0 & \text{такий рух відсутній.} \end{cases}$$

Вибір маршруту при цьому здійснюється серед гамільтонових циклів.

У даному разі траєкторія замкнута, тобто стартова та кінцева позиції БпЛА збігаються. Для отримання маршруту, що проходить через n опорних точок, слід враховувати також вимоги циклічності:

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 ; j = \overline{1, N} ; i = \overline{1, N} ; i \neq j, \quad (2)$$

де u_i – номер етапу, на якому БпЛА досягнув точки i .

Виклад основного матеріалу. Задача оптимізації руху БпЛА може бути сформульована в рамках транспортного завдання. Постановка задачі такого класу характеризується багатьма параметрами та критеріями оптимальності, що зумовлюють велику розмірність простору розв'язків, але основними критеріями є мінімізація часу на розв'язання та шляху маршруту БпЛА [7]. Вибір оптимального маршруту польоту належать до класу NP -складних завдань. Усі точні алгоритми фактично є оптимізованим

повним перебиранням варіантів, що в разі обмежень на бортові обчислювачі неприйнятно. Відповідно, виникає необхідність розв'язання субоптимальної (наближеної до оптимальної) задачі, яка полягає в тому, щоб мінімізувати функцію мети [8]. Умова (1) є завданням про призначення, розв'язок якого містить n змінних, що дорівнюють одиниці, а інші $n(n-2)$ є нульовими. Він може складатися з декількох простих вершинно-неперетинних циклів (підциклів), що проходять через кількість об'єктів менше n [9]. При проведенні аналізу методів розв'язання задачі комівояжера оптимальним за критерієм часової складності та за отриманим результатом є метод осереднених коефіцієнтів [10]. Розв'язання таким методом проводиться за $(n-2)$ етапи.

1. Знаходимо в кожному рядку та стовпці матриці $C = \|c_{ij}\|$ середнє значення рядка \bar{c}_i і стовпця \bar{c}_j . Отримуємо для кожної комірки осереднені коефіцієнти, які розраховуються різницею елементів матриці $C = \|c_{ij}\|$ і суми середніх значень рядка та стовпця, заносимо їх до матриці $c'_{ij} = c_{ij} - (\bar{c}_i + \bar{c}_j)$.

2. Серед знайдених осереднених коефіцієнтів визначаємо найменший $U_i = \min_j(c'_{ij})$ або $U_j = \min_i(c'_{ij})$, а дугу $(i_0; j_0)$ заносимо до маршруту польоту БПЛА. Викреслюємо i_0 -рядок та j_0 -стовпець матриці C' .

3. У матриці C' аналогічно пункту (1) знаходимо в кожному рядку та стовпці матриці $C' = \|c'_{ij}\|$ середнє значення рядка \bar{c}'_i і стовпця \bar{c}'_j . Отримуємо для кожної комірки осереднені коефіцієнти, які розраховуються різницею елементів матриці $C' = \|c'_{ij}\|$ і суми середніх значень рядка.

4. Серед знайдених осереднених коефіцієнтів визначаємо найменший $U_i = \min_j(c'_{ij})$ або $U_j = \min_i(c'_{ij})$, а дугу $(i_1; j_1)$ заносимо до маршруту польоту БПЛА. Викреслюємо i_1 -рядок та j_1 -стовпець матриці C' .

5. Виконавши аналогічно пункти 1–2 $(n-2)$ етапів, отримуємо матрицю $C^n = \|c_{ij}^{n-1}\|$ з двома рядками і стовпцями, а дуга $(i_n; j_n)$ є завершальною частиною маршруту.

При відповідності точок розміщення вузлів мережі опорним точкам маршруту БПЛА маємо класичну геометричну задачу про комівояжера, що може бути розв'язана одним з відомих методів комбінаторної оптимізації, у тому числі й розглянутим вище способом. Однак зі зростанням кількості вузлів поліноміально зростає складність та, відповідно, час вирішення завдання. Саме тому буде доцільно слідувати не за всіма точками розташування вузлів, а групувати їх за радіусом зони покриття БПЛА і слідувати за центрами мас цих груп. У такому разі розв'язуємо задачу, але вже меншої розмірності, заощаджуючи при цьому час та скорочуючи пройдений БПЛА шлях.

Результати досліджень планування маршрутів польоту БПЛА.

Дослідження ефективності та працездатності запропонованого алгоритму розв'язання задачі комівояжера для планування польотів БПЛА проведемо за допомогою програмної реалізації, розробленої авторами.

При збігу координат опорних точок та вузлів отримано маршрути для 50 (рис. 1), 100 (рис. 2) та 200 вузлів (рис. 3).

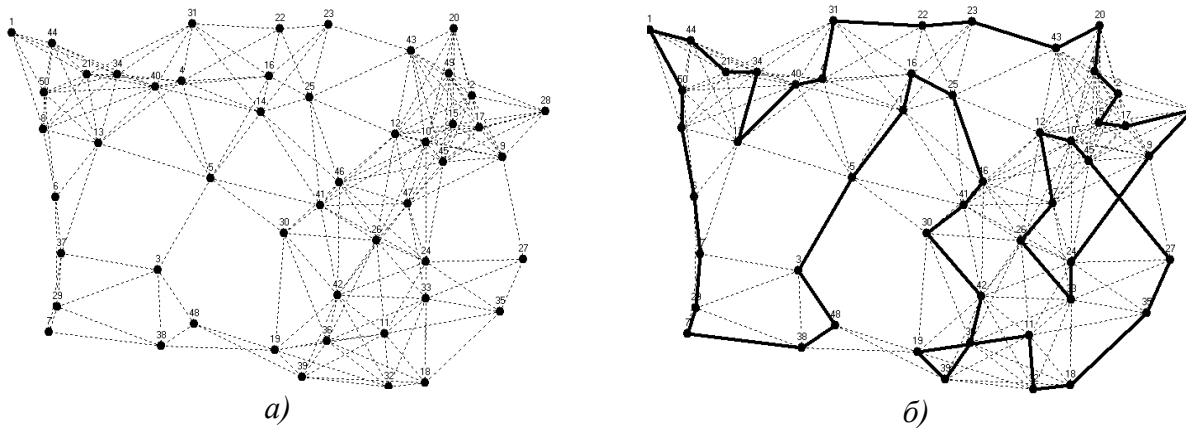


Рис. 1. Результат планування польоту БпЛА:
а) наземна мережа вузлів $n = 50$; б) оптимальний маршрут

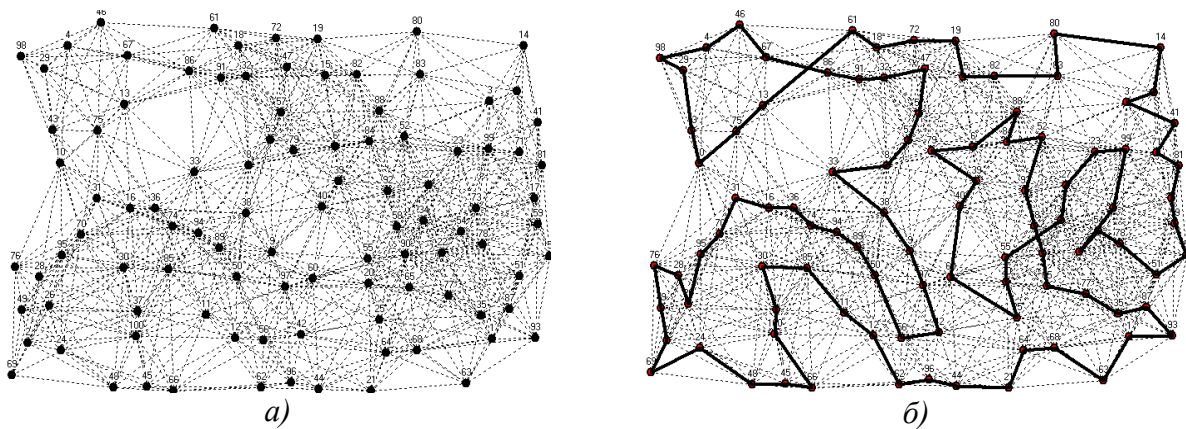


Рис. 2. Результат планування польоту БпЛА:
а) наземна мережа вузлів $n = 100$; б) оптимальний маршрут

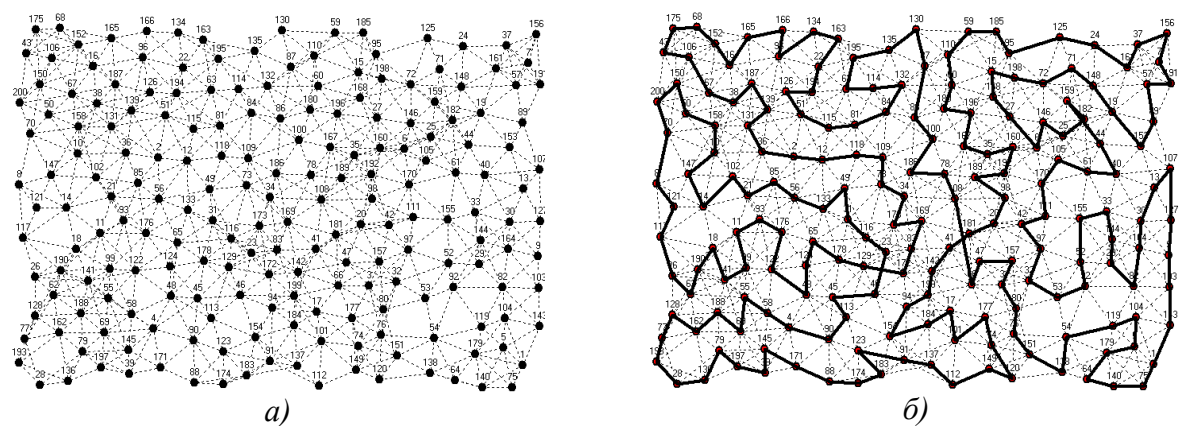


Рис. 3. Результат планування польоту БпЛА:
а) наземна мережа вузлів $n = 200$; б) оптимальний маршрут

При групуванні вузлів за радіусом зони покриття БпЛА отримано нові маршрути для 50 (рис. 4), 100 (рис. 5) та 200 (рис. 6) вузлів. У табл. 1 занесено результати аналітичних розрахунків.

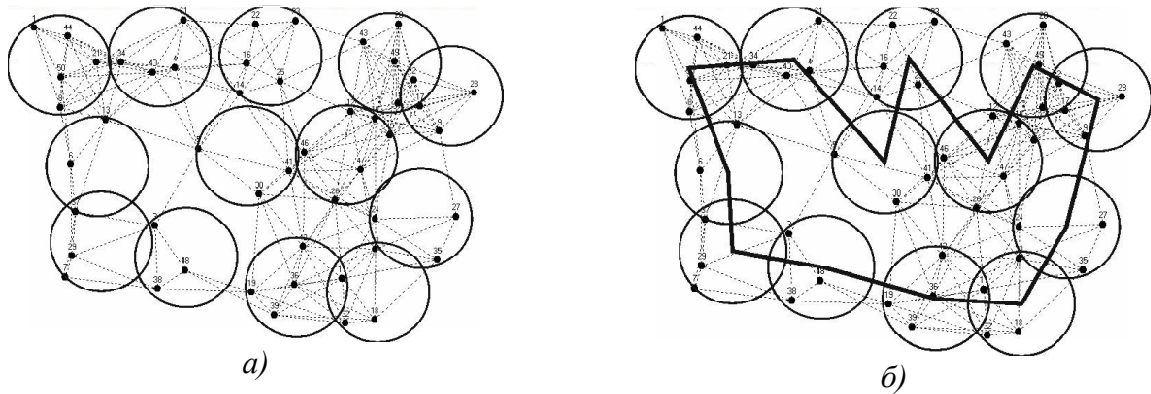


Рис. 4. Результат планування польоту БпЛА:
а) групування вузлів $n = 50$; б) оптимальний маршрут

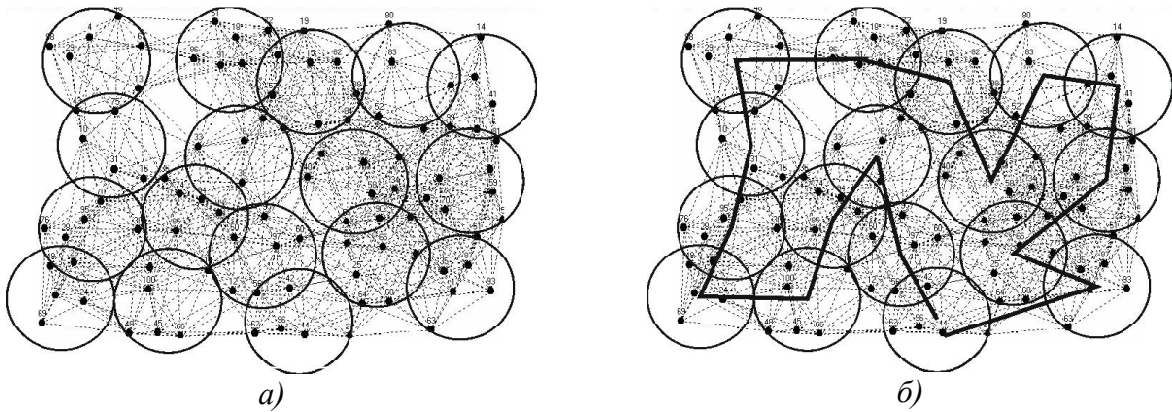


Рис. 5. Результат планування польоту БпЛА:
а) групування вузлів $n = 100$; б) оптимальний маршрут

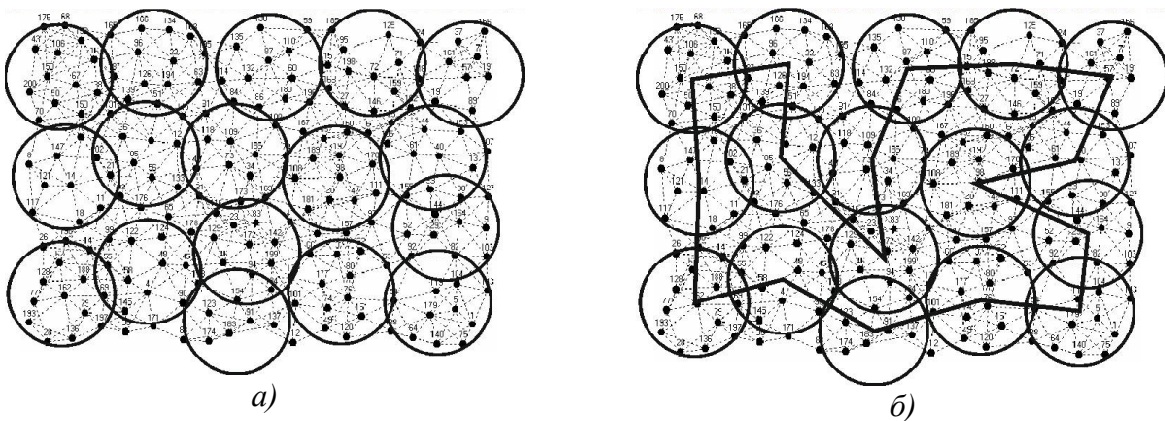


Рис. 6. Результат планування польоту БпЛА:
а) групування вузлів $n = 200$; б) оптимальний маршрут

Таблиця 1

Результати роботи алгоритму осереднених коефіцієнтів

Кількість вузлів	Радіус дії БпЛА (умовних одиниць)	Кількість груп вузлів	Час розв'язку (с)	Відстань маршруту (умовних одиниць)
50	200	Без групування	1,2	3 484
		13	0,4	1 720
100		Без групування	2,5	5 224
		17	1,2	2 102
200		Без групування	7,5	7 977
		17	3,2	3 235

Результати моделювання (табл. 1) свідчать, що за рахунок збільшення кількості груп і, відповідно, зменшення кількості опорних точок у маршруті, удосконалений метод планування польотів БпЛА за центрами мас груп вузлів має значну перевагу (до 45%) порівняно з методом слідування за усіма вузлами (опорними точками). Розроблений метод доцільно використовувати в разі великої кількості опорних точок (вузлів).

Висновки. Розроблено удосконалений метод планування польоту БпЛА, який від існуючих відрізняється тим, що замість прокладання маршруту за всіма вузлами необхідно орієнтуватися на центри мас груп вузлів МЗВП, що дозволяє значно (на 45%) скоротити протяжність отриманого маршруту і, відповідно, збільшить час доступу вузлів до мережі. З практичного погляду це дозволить оперативно приймати рішення щодо проведення різноманітних операцій із використанням БпЛА як для військових, так і цивільних цілей з мінімальними експлуатаційними витратами в умовах обмеження часу.

Перспективи подальших розробок. У подальших дослідженнях планується використати даний метод для групи БпЛА з урахуванням розбиття безпроводної мережі на кластери для забезпечення зв'язаності мобільних абонентів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романюк В. А. Напрямки розвитку тактичних систем зв'язку / В. А. Романюк // Матеріали II наук.-техн. конф. ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”. – К. : ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2004. – С. 23–33.
2. Романюк В. А. Еволюція тактичних радіомереж / В. А. Романюк // Тези доповідей VI наук.-практ. семінару [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”]. – К. : ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 45–52.
3. Бондарев Д. І. Оптимізація структури групового польоту безпілотних літальних апаратів / Д. І. Бондарев, Д. П. Кучеров, Т. Ф. Шмельова // Зб. наук. праць Харків. ун-ту Повітряних Сил. – 2016. – № 3 (48). – С. 61–66.
4. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В. А. Романюк // Зб. наук. праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2005. – № 2. – С. 83–90.
5. Han Z. Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET / Z. Han, A. L. Swindlehurst, K. J. R Liu // In Proc. IEEE Wireless Commun. Network conference. – 2006. – V. 1. – P. 252–257.
6. Гурник А. В. Застосування інтелектуальної сенсорної техніки для моніторингу та пошуково-рятувальних робіт / А. В. Гурник, С. В. Валуйський // Восточноєвропейський журнал передових технологій. – 2013. – № 3 (9). – С. 27–32.
7. Dynamic vehicle routing for translating demands: Stability analysis and receding-horizon policies / S. D. Bopardikar, S. L. Smith, F. Bullo, J. P. Hespanha // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2010. – V. 55, N. 11. – P. 162–173.
8. Sariel S. Multiple Travelling Robot Problem: A Solution Based on Dynamic Task Selection and Robust Execution / S. Sariel, T. R. Balch, N. Ergoden // IEEE Transactions on Mechatronics. – 2009. – V. 14, N. 2. – P. 198–206.
9. Gao P. Evolutionary Computation Approach to Decentralized Multi - Robot Task Allocation / P. Gao, Z. Ca, L. Yu // The 5th International Conference on Natural Computing. – 2009. – P. 415–419.

10. Vorotnikov V. Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem / V. Vorotnikov, I. Gumenyuk, P. Pozdniakov // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2017.– № 4/2 (36). – С. 44–49.

Подано 03.10.2017

В. В. Воротников, И. В. Гуменюк

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЕТНЫХ ОПЕРАЦИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗАННОСТИ УЗЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

В работе исследуется возможность обеспечения разобитых узлов сети связи военного назначения и повышение связанности соединенных в условиях разрушенной или отсутствующей инфраструктуры с использованием воздушных ретрансляторов на базе беспилотного летательного аппарата (БПЛА). При этом необходимо решить проблему минимизации расстояния полета аппарата, что представляет собой классическую геометрическую задачу о коммивояжере, которую можно решить известными методами комбинаторной математики. Однако при увеличении количества узлов (опорных точек) данные методы не всегда оптимальны по временной сложности. В статье предложен усовершенствованный метод осредненных коэффициентов, который отличается от известных тем, что маршрут строится по центрам масс групп узлов. Такое решение позволяет почти вдвое сократить время на планирование и маршрут полета аппарата, что, в свою очередь, увеличивает время на доступ к сети узлам.

Ключевые слова: беспроводная сеть, связанность узлов, метод осредненных коэффициентов, оптимальные трассы, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), эксплуатационные затраты, планирование полета.

V. V. Vorotnikov, I. V. Gumenyuk

UNMANNED AERIAL VEHICLES FLIGHT OPERATIONS PLANNING METHOD TO ENSURE CONNECTIVITY OF WIRELESS NETWORK NODES

In the article the possibilities of provision of disassembled nodes of the military communication network and increase of connection connected in the conditions of destroyed or absent infrastructure with the use of air repeaters on the basis of UAV are investigated. At the same time, it is necessary to solve the problem of minimizing the flight distance of the apparatus, which is a classical geometric problem of salesman, which can be solved by known methods of combinatorial mathematics. However, with increasing number of nodes (reference points), these methods do not always have optimal solutions in time complexity. It is proposed to apply an improved method of averaged coefficients, which differs from those known by the fact that the route is laid down by the centers of mass of groups of nodes. This approach reduces the planning and scheduling time of the device by almost half, which, in turn, will increase the nodes' time to access the network.

Keywords: wireless network, node connectivity, averaged coefficients method, optimal routes, UAV, operational costs, flight planning.