

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ПОЛЬОТІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В СКЛАДНИХ УМОВАХ ПОЛЬОТУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. Актуальність. Переважна більшість сучасних алгоритмів планування маршруту польоту БпЛА, призначених для бортового застосування в режимі реального часу, не враховують динаміку БпЛА, що негативно позначається на точності та оптимальності планування маршруту, особливо при спостереженні за рухомими об'єктами. **Об'єкт дослідження:** процеси моніторингу елементів критичної інфраструктури безпілотними літальними апаратами **Мета статті:** оцінювання методів планувальників польотів безпілотних літальних апаратів в складних умовах польоту для моніторингу стану елементів критичної інфраструктури. **Результати дослідження.** У статті проведено порівняльний аналіз існуючих методів побудови маршруту польоту БпЛА під час спостереження за об'єктами – елементами об'єктів критичної інфраструктури, а саме методу повного перебору та жадібного алгоритму із запропонованим автором удосконаленим алгоритмом. При моделюванні емуляції польоту БпЛА за допомогою пакету MATLAB було розроблено двадцять сценаріїв. Для кожного сценарію було обрано список із п'яти об'єктів, які підлягають моніторингу. Об'єкти обирались як динамічні, так і стаціонарні. На підставі аналізу розглянутих сценаріїв були сформульовані висновки про ефективність удосконаленого методу. **Висновки.** Маршрути, побудовані за допомогою удосконаленого методу, повністю збіглися з маршрутами, побудованими за допомогою методу повного перебору. При цьому час обчислень суттєво нижчий за існуючі методи, що дозволяє використовувати удосконалений алгоритм у складі комплексу бортового програмного забезпечення та оперативно будувати й змінювати маршрут залежно від обстановки щодо об'єктів моніторингу. Використання ідентифікатора у контурі системи управління для компенсації впливу вітру час польоту маршрутом дозволяє скоротити на 15%.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; маршрутизація; моніторинг; об'єкти критичної інфраструктури; планування маршрутів.

Вступ

Постановка проблеми. Існуючі підходи до вирішення завдання планування маршруту польоту БпЛА в складних умовах польоту насамперед відносяться до процесу послідовного обльоту та спостереження нерухомих об'єктів. Відомо значна кількість методів маршрутизації, у якості вихідних даних вказуються координати розташування об'єктів, які підлягають моніторингу.

Однак у цих методах недостатня увага приділена обмеженим динамічним можливостям безпілотного літального апарату, а їх урахування призводить до сильних змін плану обльоту об'єктів, коли на кожному кроці планування вихідних даних, крім об'єктів, потрібно мати на увазі напрям і значення швидкості самого БпЛА. У разі раптових змін динамічної обстановки перепланування польоту має здійснюватися без участі людини.

Ще більші труднощі виникають під час планування обльоту мобільних об'єктів. По-перше, для потрапляння чергового рухомого об'єкта у вікно спостереження бортової апаратури БпЛА необхідно прогнозувати його рух, а для цього у вихідних даних об'єкта потрібно враховувати не лише вихідні координати розташування об'єкта, а й вектор швидкості його руху. По-друге, більш істотне ускладнення полягає в тому, що у разі порушення не самого початкового маршруту обльоту, а графіка польоту, наприклад, через дію складних умов польоту, час прогнозування змінюється, а отже, і нове розташування пунктів потребує повторного перепланування маршруту.

Таким чином розроблення методів планування маршруту польоту безпілотного літального апарату при моніторингу елементів об'єкту критичної

інфраструктури в складних умовах польоту є актуальною тематикою дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В статті [1] розглянуто проблему маршрутизації безпілотного літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів. Принциповою відмінністю розв'язуваної задачі від існуючих методів є припущення про альтернативність управління.

Завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи. Проведений розрахунок польотних ситуацій свідчить про необхідність використання спрощеного підходу розрахунку точки польоту, для якого додатково потрібні середні значення ординат ризику.

В роботі [2] вирішена задача планування маршруту обльоту мобільних об'єктів, що зберігають напрямок свого руху протягом тривалого проміжку часу із використанням методу математичної оптимізації - динамічного програмування. При вирішенні завдання побудови оптимального маршруту враховувалась динаміка польоту безпілотного літального апарату, що дозволяє послідовно додавати об'єкти до маршруту.

Дослідники погоджуються, що для підвищення ймовірності успіху місії, БпЛА, траєкторія польоту повинна бути ретельно розрахована з урахуванням методів оптимізації при існуючих обмеженнях. Незважаючи на те, що алгоритми на основі графів, такі як діаграма Вороного, search A*, D* lite та інші класичні методи, такі як швидке дослідження випадкових дерев (RRT), штучні потенційні поля (APF) та ймовірнісні дорожні карти (PRM), зазвичай використовуються для розрахунку траєкторії БпЛА, вони

вимагають створення карт вартості складних полів і, зазвичай, їх недоліком є збіжність до локальних оптимальних рішень [3, 4].

Останніми роками метаевристичні алгоритми, які є розгалуженням методів штучного інтелекту, почали використовуватися як планувальники маршруту груп або окремих БпЛА через їх переваги щодо простоти реалізації, обчислювальної складності та конфігурованих або настроюваних структур [5–7].

У роботі Xu C., Duan H., Liu F. [8] пропонується спрямувати фуражирів в алгоритмі штучної бджолоїної колонії (ABC) до найкращого поточного джерела їжі, використовуючи хаотичні змінні для планувальника маршруту, названого хаотичним ABC (CABC), і наочно доведена перевага CABC над алгоритмом ABC.

Група дослідників Y. Zhang, Wu L.; Wang S [9] конвертували необроблені значення придатності джерел їжі за допомогою стратегії масштабування придатності та використали рівняння Лоренца для генерації випадкових чисел, необхідних для фаз бджіл, щоб покращити ефективність планування шляху алгоритму ABC. В іншому дослідженні даних авторів [10] були покращені ймовірності вибору кваліфікованих рішень шляхом врахування механізму масштабування придатності для алгоритму оптимізації рою часток (PSO). Крім того, були адаптивно відрегульовані інерційна вага та коефіцієнти прискорення рівняння оновлення чисельності в рої часток та використано генератор хаотичних випадкових чисел для визначення значень випадкових коефіцієнтів того самого рівняння. Алгоритм PSO, представлений у роботі та названий адаптивним хаотичним PSO для масштабування (FAC-PSO), використовувався як планувальник шляху.

В роботі [11] ідея концепції пам'яті та соціальної інформації PSO для свого алгоритму гравітаційного пошуку (GSA), і її ефективність у вирішенні проблем планування траєкторії БпЛА, була перевірена шляхом порівняння зі стандартними PSO, GSA та двома іншими GSA – базових моделей.

У дослідженні [12] запропоновано управляти версією алгоритму PSO, для якої кожна частинка змінювала відповідні швидкості, керуючи найкращим рішенням невеликої групи рішень як планувальником шляху.

Колективом авторів [13] запропоновано новий підхід до обміну інформацією між кваліфікованими рішеннями алгоритму світлячка (FA) й наведено модифікований метод FA (MFA).

Було представлено детальне порівняння між модифікованим методом та іншими метаевристичними планувальниками траєкторії БпЛА, такими як PSO, оптимізація колонії мурашок (ACO), диференціальна еволюція (DE), оптимізація на основі біогеографії (BBO), еволюційні стратегії (ES), популяція – based incremental learning (PBIL), генетичний алгоритм (GA) і, нарешті, варіант GA, відомий як stud GA (SGA).

Метою роботи є оцінювання методів планувальників польотів безпілотних літальних апаратів в складних умовах польоту для моніторингу стану елементів критичної інфраструктури.

Основний матеріал

Переважає більшість сучасних алгоритмів планування маршруту польоту БпЛА, призначених для бортового застосування в режимі реального часу, не враховують динаміку БпЛА, що негативно позначається на точності та оптимальності планування маршруту, особливо при спостереженні за рухомими об'єктами. Тому, другим методом, з яким буде проводитись порівняння удосконалених методів, буде метод на основі жадібного алгоритму, що не враховує динаміку БпЛА та можливу мобільність об'єктів спостереження.

Існує кілька варіантів роботи жадібного алгоритму, але, в цілому, їх принцип зводиться до того, що знаходиться оптимальне рішення для кожної локальної задачі, але рішення глобальної задачі може не бути оптимальним. Для пошуку оптимального маршруту це виражається у тому, що наступним завжди вибирається об'єкт, “найближчий” до поточного положення БпЛА. При розробці модуля емуляції польоту БпЛА за допомогою пакету MATLAB були застосовані такі припущення:

1. Для спрощення розрахунків та зниження обчислювальних витрат усі обчислення будуть проводитись у пов'язаній системі координат, таким чином БпЛА завжди матиме координати:

$$x = 0, z = 0, \alpha = 0.$$

2. Рух об'єктів протягом часу, необхідного БпЛА для підльоту до них – прямолінійний з постійною швидкістю. Це припущення адекватне поточній ситуації, оскільки час польоту БпЛА порівняно малий і мобільні об'єкти спостереження елементів критичної інфраструктури істотно не змінюють курс і швидкості за незначний час.

3 Метою перевірки роботи програми було розроблено двадцять сценаріїв. Три сценарії взяті як базові, що дозволило оцінити удосконалені методи. Для першого сценарію було обрано список із п'яти об'єктів, які підлягають моніторингу. Об'єкти обрані як динамічні, так і стаціонарні. Характеристики об'єктів наведено у табл. 1. Удосконалені методи взяті за результатами дослідження [1] та [2].

БпЛА починає рух з точки з координатами:

$$X = 0; Z = 600 \text{ м.}$$

Швидкість польоту БпЛА складає 40 м/с, початковий курс – 110° .

Точка, в якій БпЛА має завершити свій рух, має координати:

$$X = 1000 \text{ м, } Z = 650 \text{ м.}$$

У цьому сценарії із застосуванням трьох методів було отримано однаковий маршрут.

Порівняльні характеристики та результати роботи методів наведено у табл. 2.

Графік прольоту БпЛА, розрахований за допомогою удосконаленого методу та реальний час польоту вказані у таблиці 3.

Як видно з результатів, отриманих при моделюванні сценарію №1, алгоритм, побудований на основі методу повного перебору, виконувався дуже довго, що не прийнятно для бортової реалізації через значний обчислювальний ресурс.

Таблиця 1 – Характеристики об'єктів моніторингу для першого сценарію моделювання

№ об'єкта	Назва об'єкта	X, м	Z, м	Курс, град	Швидкість, м/с
1	Об'єкт №1 (динамічний)	50	500	70	30
2	Об'єкт №2 (динамічний)	560	205	110	5
3	Об'єкт №3 (стаціонарний)	380	120	-	-
4	Об'єкт №4 (стаціонарний)	690	600	-	-
5	Об'єкт №5 (стаціонарний)	200	330	-	-

Джерело: розроблено автором за даними [1, 2]

Таблиця 2 – Порівняльні результати роботи алгоритмів

Метод	Прогнозований час польоту, хв.	Час роботи алгоритму, хв.	Послідовність об'єктів
Повний перебір	46	295	1-5-3-2-4
Жадібний алгоритм	45	0,2	1-5-3-2-4
Удосконалений метод	36	0,1	1-5-3-2-4

Таблиця 3 – Графік об'льоту БПЛА елементів об'єктів критичної інфраструктури за першим сценарієм

№ об'єкта	Назва об'єкта	Реальний час прольоту об'єкта, хв	Час прольоту за графіком, хв	Абсолютне значення, хв.
1	Об'єкт №1 (динамічний)	7,7	7,3	0,4
5	Об'єкт №5 (стаціонарний)	13,5	13,1	0,4
3	Об'єкт №3 (стаціонарний)	20,4	20	0,4
2	Об'єкт №2 (динамічний)	25,5	24,8	0,3
4	Об'єкт №4 (стаціонарний)	37	36	1

Удосконалений метод та жадібний алгоритм виконувались приблизно однаковий час та запропонували однаковий маршрут.

У той же час метод на основі жадібного алгоритму дав неправильну оцінку часу польоту, що може негативно позначитися на побудові маршруту за умов, коли час польоту близький до максимального часу польоту даного БПЛА.

Для другого сценарію в об'єктах зі сценарію №1 стаціонарний об'єкт №5 замінили на динамічний об'єкт, що рухається від точки з координатами

$$X = 60 \text{ м}, Z = 400 \text{ м}$$

із швидкістю 15 м/с.

Параметри об'єктів наведено у табл. 4.

БПЛА почав свій рух з точки з координатами

$$X = 0, Z = 600 \text{ м.}$$

Швидкість польоту БЛА – 40 м/с, початковий курс – 110 градусів.

Точка, в якій БПЛА має завершити свій рух, має координати

$$X = 1000 \text{ м}, Z = 650 \text{ м.}$$

Результати моделювання наведено у табл. 5 та 6.

Таблиця 4 – Характеристики об'єктів моніторингу для другого сценарію моделювання

№ об'єкта	Назва об'єкта	X, м	Z, М	Курс, град.	Швидкість, м/с
1	Об'єкт №1 (динамічний)	50	500	70	30
2	Об'єкт №2 (динамічний)	560	205	110	5
3	Об'єкт №3 (стаціонарний)	380	120	-	-
4	Об'єкт №4 (стаціонарний)	200	330	-	-
5	Об'єкт №5 (динамічний)	60	390	190	15

Таблиця 5 – Результати моделювання за другим сценарієм

Метод	Прогнозований час польоту, хв.	Час роботи алгоритму, хв.	Послідовність обльоту об'єктів
Повний перебір	57	265	5-4-3-2-1
Жадібний алгоритм	48	0,2	1-5-4-3-2
Удосконалений метод	44	0,1	5-4-3-2-1

Таблиця 6 – Графік обльоту БПЛА елементів об'єктів критичної інфраструктури за другим сценарієм

№ об'єкта	Назва об'єкта	Реальний час прольоту об'єкта, хв	Час прольоту за графіком, хв	Абсолютне значення, хв.
5	Об'єкт №5 (динамічний)	6	5,6	0,4
4	Об'єкт №4 (стаціонарний)	10,2	9,15	1,05
3	Об'єкт №3 (стаціонарний)	18,5	17,3	1,2
2	Об'єкт №2 (динамічний)	23,8	24	1,8
1	Об'єкт №1 (динамічний)	43,2	44	0,5

Як видно з отриманих результатів, в другому сценарії жадібний алгоритм вибрав невірний маршрут, і час польоту за цим маршрутом перевищив час польоту маршрутом, запропонований удосконаленим методом.

Маршрути, запропоновані рештою алгоритмів, збіглися.

Для третього сценарію було вибрано два мобільні об'єкти – елементи критичної інфраструктури. У цьому сценарії перевірялася ефективність удосконаленого методу зниження дії бокового вітру на політ БПЛА.

У табл. 7 наведено параметри об'єктів.

БПЛА почав свій рух із точки з координатами

$$X = 0, Y = 125.$$

Швидкість польоту БЛА – 40 м/с.

Швидкість бічного вітру на проміжку часу від 5 до 20 секунд від початку польоту становила 6 м/с. В решту часу вітер був відсутній.

Були розглянуті випадки, коли вітер був відсутній, коли вітер був присутній, але було відключено ідентифікатор кута вітрового зносу та випадок, коли був вітер та ідентифікатор був включений.

У табл. 8 зазначено час моніторингу динамічного об'єкту для кожного випадку.

Таблиця 7 – Характеристики об'єктів моніторингу для третього сценарію моделювання

№ об'єкта	Назва об'єкта	X, м	Z, м	Курс, град.	Швидкість, м/с
1	Об'єкт №1 (динамічний)	370	500	170	10
2	Об'єкт №2 (динамічний)	500	300	45	5

Таблиця 8 – Результати моделювання за третім сценарієм

№ об'єкта	Назва об'єкта	Час моніторингу без вітру, с	Час моніторингу при вимкненому ідентифікаторі, с	Час моніторингу при працюючому ідентифікаторі, с
1	Об'єкт №1 (динамічний)	13	15	13,2
2	Об'єкт №2 (динамічний)	24,5	29	25

За результатами моделювання можна зробити висновок, що з компенсації впливу вітру з допомогою даних, отриманих від ідентифікатора, час польоту маршрутом вдалося скоротити на 15%, що свідчить про ефективність використання ідентифікатора у контурі системи управління.

Висновки

Таким чином, з аналізу представлених сценаріїв можна сформулювати висновки про ефективність удосконаленого методу побудови маршруту польоту БПЛА під час спостереження за об'єктами –

елементами об'єктів критичної інфраструктури. Маршрути, побудовані розробленими в [1] та [2] методами, повністю збіглися з маршрутами, побудованими за допомогою методу повного перебору. При цьому час обчислень суттєво нижчий, що

дозволяє використовувати удосконалений алгоритм у складі комплексу бортового програмного забезпечення та оперативно будувати й змінювати маршрут залежно від обстановки щодо об'єктів моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Галінський Д.О., Куліш Р.В. Метод моніторингу стану стаціонарних елементів об'єктів критичної інфраструктури безпілотними літальними апаратами з використанням динамічного програмування. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава, 2023. Вип. 1(71). С. 10-15. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.010>
2. Kulish R. Модель маршрутизації об'єктів мобільних об'єктів безпілотним літальним апаратом / R. Kulish, O. Matiushenko // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ, 2023. Т. 2(72). С. 20-25. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.020>
3. Latombe, J. C. 1991. Robot Motion Planning. Kluwer Academic. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4022-9>
4. Ait Saadi, A.; Soukane, A.; Meraihi, Y.; Benmessaoud Gabis, A.; Mirjalili, S.; Ramdane-Cherif, A. UAV path planning using optimization approaches: A survey. Arch. Comput. Methods Eng. 2022, 29, 4233–4284. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09742-7>
5. Bal, M. An overview of path planning technologies for unmanned aerial vehicles. Therm. Sci. 2022, 26, 2865–2876. Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.2298/TSCI2204865B>
6. Wu, Y. A survey on population-based meta-heuristic algorithms for motion planning of aircraft. Swarm Evol. Comput. 2021, 62, 100844. Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100844>
7. Majeed, A.; Hwang, S.O. A multi-objective coverage path planning algorithm for UAVs to cover spatially distributed regions in urban environments. Aerospace 2021, 8, 343. <https://doi.org/10.3390/aerospace8110343>
8. Saeed, R.A.; Omri, M.; Abdel-Khalek, S.; Ali, E.S.; Alotaibi, M.F. Optimal path planning for drones based on swarm intelligence algorithm. Neural Comput. Appl. 2022, 34, 10133–10155. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06998-9>
9. Xu, C.; Duan, H.; Liu, F. Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning. Aerosp. Sci. Technol. 2010, 14, 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2010.04.008>
10. Zhang, Y.; Wu, L.; Wang, S. UCAV path planning based on FSCABC. Inf.-Int. Interdiscip. J. 2011, 14, 687–692. Електронний ресурс. Режим доступу https://www.academia.edu/7461343/UCAV_path_planning_based_on_FSCABC
11. Zhang, Y.; Wu, L.; Wang, S. UCAV path planning by fitness-scaling adaptive chaotic particle swarm optimization. Math. Probl. Eng. 2013, 2013. Електронний ресурс. Режим доступу <http://dx.doi.org/10.1155/2013/705238>
12. Wang, G.G.; Guo, L.; Duan, H.; Liu, L.; Wang, H. A modified firefly algorithm for UCAV path planning. Int. J. Hybrid Inf. Technol. 2012, 5, 123–144. https://www.researchgate.net/publication/266884589_A_Modified_Firefly_Algorithm_for_UCAV_Path_Planning
13. Wang, G.G.; Guo, L.; Duan, H.; Wang, H.; Liu, L.; Shao, M. A hybrid metaheuristic DE/CS algorithm for UCAV three-dimension path planning. Sci. World J. 2012, 2012, 583973. <https://doi.org/10.1100/2012/583973>
14. Timochko, A.; Fustii, V.; Kolesnyk, A.; Olizarenko, S.; Kalashnyk, G.; Kulish, R.; Tymoschuk, O.; Galinskiy, D.; Inter-Object Navigation of Unmanned Aerial Vehicles to Increase the Efficiency and Accuracy of Inspection of Power Lines, Problemele Energeticii Regionale Nr. 1(57) / 2023 / ISSN 1857-0070. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.03>

Received (Надійшла) 11.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Куліш Руслан Валерійович – аспірант, Українська державна льотна академія, Кропивницький, Україна;
Ruslan Kulish – Postgraduate student, Ukraine State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine;
 e-mail: ruslankulishkrv@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5590-1370>.

Research of flight planning methods of unmanned aerial vehicles in complex flight conditions for monitoring the state of critical infrastructure elements

Ruslan Kulish

Abstract. Relevance. The vast majority of modern UAV flight path planning algorithms designed for real-time onboard application do not take into account UAV dynamics, which negatively affects the accuracy and optimality of route planning, especially when tracking moving objects. **Object of research:** processes of monitoring critical infrastructure elements with UAVs. **Purpose of the article.** evaluation of methods for flight planners of unmanned aerial vehicles in difficult flight conditions for monitoring the condition of critical infrastructure elements. **Research results.** The article presents a comparative analysis of existing methods for constructing a UAV flight route during the observation of objects - elements of critical infrastructure objects, namely the exhaustive search method and the greedy algorithm with the improved algorithm proposed by the author. When modeling the emulation of the UAV flight using the MATLAB package, twenty scenarios were developed. For each scenario, a list of five objects to be monitored was selected. The objects were selected as dynamic and stationary. Based on the analysis of the considered scenarios, conclusions were formulated about the effectiveness of the improved method. **Conclusions.** The routes constructed using the improved method completely coincided with the routes constructed using the exhaustive search method. At the same time, the calculation time is significantly lower than the existing methods, which allows using the improved algorithm as part of the on-board software complex and quickly constructing and changing the route depending on the situation with respect to the monitored objects. Using an identifier in the control system circuit to compensate for the influence of the wind allows reducing the flight time along the route by 15%.

Keywords: unmanned aerial vehicle, routing, monitoring, critical infrastructure objects, route planning.