

**Кучеренко О.І.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Вакалюк Т.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ БПЛА

Динамічний характер БПЛА, завдяки їх високій мобільності, дозволяє коригування траєкторії руху в реальному часі для адаптації до різних умов навколишнього середовища. Розповсюдженою задачею планування траєкторії руху БПЛА є політ від заданої початкової точки до кінцевої точки у просторі з перешкодами. Перешкоди зазвичай не закріплені в одному місці, а змінюються в часі та їх важко точно змодельовати, що вимагає корекції траєкторії під час польоту. Планування таких траєкторій може вимагати складних обчислень, які займатимуть велику кількість часу, що не є допустимим для БПЛА з міркувань як безпеки, так і енергоефективності. Тому інженери повинні поставитись відповідально до вибору застосованого алгоритму побудови маршруту руху БПЛА. Отже, класифікація та узагальнення алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА стають необхідними.

В роботі представлено класифікацію методів та алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА за п'ятьма критеріями: відповідно до умов руху БПЛА, за типами задач, за алгоритмічним рівнем, за функціональним рівнем та методом планування шляху. Підсумовуючи все разом, розглянуто наступні групи алгоритмів та методів: планування руху у безперервних просторах, у просторі з урахуванням диференціальних обмежень та в умовах невизначеності; традиційні, інтелектуальні та гібридні алгоритми; планування на основі часу, на основі простору та на основі місій; а також: комбінаторний метод, метод на основі вибірки та біологічний метод.

Окрім безпосередньо класифікації, додано інформацію про ключові особливості окремих груп методів та алгоритмів, а також інформацію стосовно конкретних алгоритмів-представників, що входять до тієї чи іншої групи алгоритмів у певній класифікації. При підготовці класифікації алгоритмів використовувались останні дослідження в області розробки алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА, включно з використанням штучного інтелекту та машинного навчання.

**Ключові слова:** БПЛА, маршрут, алгоритм, оптимальний маршрут, класифікація, критерій.

**Постановка проблеми.** Побудова маршруту руху БПЛА залежить від поставленого завдання і не може бути зведена суто до пошуку найкоротшого шляху. Більш важливим є досягнення поставленої мети (завдання). Отже, виникає необхідність ввести класифікацію методів побудови маршрутів руху БПЛА відповідно до різних критеріїв та завдань. Класифікація покликана спростити витрачені науковцями зусилля на вибір підходящого алгоритма або метода для досягнення поставленої мети. Додатковою мотивацією класифікувати методи та алгоритми побудови маршрутів руху БПЛА є те, що у цей час побудова маршруту руху одного агента є лише частиною сучасних завдань, оскільки все більше зростає потреба у комплексних рішеннях, в яких вимагається планування траєкторій руху одразу цілої зграї БПЛА або БПЛА у кооперації з певним видом транспорту.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

При підготовці класифікації алгоритмів використовувались останні дослідження в області розробки алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА. Дослідженнями займалися такі науковці: О. Романюк [1], Л. Коваль [1], В. Кулешов [1], М. Захарчук [1], Ло Дж. (Luo J.) [12], Тянь Ю. (Tian Y.) [12], Ван Ч. (Wang Z.) [12], Кадір З. (Qadir, Z.) [2], Уллах Ф. (Ullah, F.) [2], Мунавар Х.С. (Munawar, H.S.) [2], Аль-Турджман Ф. (Al-Turjman, F.) [2], Дебнат С.К. (Debnath, S.K.) [5], Омар Р. (Omar, R.) [5], Латип Н.Б. (Latip, N.B.) [5], Чжао Ю. Дж. (Zhao, Y.J.) [17], Чжен Ч. (Zheng, Z.) [17], Лю Ю. (Liu, Y.) [17] та інші.

**Постановка завдання.** Метою роботи є класифікація методів та алгоритмів побудови маршрутів БПЛА за різними критеріями.

**Виклад основного матеріалу.** Основною метою планування шляху (або побудови маршруту

руху) є швидке визначення оптимальної траєкторії в межах визначеного простору планування, який складається з кількох сегментів ліній або точок шляху. Представлення шляху може окреслюватися двома різними модальностями: одна включає часовий ряд, що містить параметри швидкості та курсу (на основі динаміки), а інша характеризується часовим рядом, що втілює просторові координати положення (на основі геометрії). Побудова маршруту руху БПЛА зазвичай потребує побудови відповідних цільових функцій відповідно до вимог поставлених завдань. Як правило, у якості цільової функції використовуються час польоту, відстань польоту, вартість та інші [12].

Отже, поставлені завдання відіграють ключову роль у класифікації алгоритмів. Розглянемо різні варіанти класифікації алгоритмів.

Стівен ЛаВалле [11] згрупував опис алгоритмів у логічні блоки, які можна розглядати як класифікацію алгоритмів **відповідно до умов руху БПЛА**:

– *Планування руху у безперервних просторах.* Ці методи та алгоритми використовуються для планування руху роботів у 2D або 3D просторах з перешкодами. Для полегшення обчислень безперервні моделі перетворюються на дискретні. Сюди включають комбінаторне планування для точного представлення проблеми, та методи на основі вибірок для ефективного вирішення складних завдань, хоча й з менш жорсткими гарантіями повноти. До даної категорії відносять: алгоритми, що оперують графами та виконують пошук: пошук у ширину (BFS – Breadth-First Search), пошук у глибину (DFS – Depth-First Search), Дейкстра, A\*, ітеративний пошук з поглибленням), задачі дискретизації, комбінаторне планування руху тощо.

– *Планування руху у просторі з урахуванням диференціальних обмежень.* Диференціальні обмеження регулюють допустимі швидкості в кожній точці. Ці обмеження враховуються для більш точного планування руху роботів, на відміну від глобальних обмежень через перешкоди як це робиться в попередній групі алгоритмів. Основна увага приділяється методам вибіркового планування та математичним технікам з теорії управління, щоб створювати плани, які відповідають природним рухам механічних систем. До цієї категорії відносяться алгоритми: метод ймовірнісної дорожньої карти (PRM – Probabilistic Roadmap Method) [9], швидке дослідження випадкового дерева (RRT – Rapidly-exploring Random Tree) [9], Марковський процес прийняття рішень (MDP – Markov Decision Process) [14] та їх варіа-

ції, методи декомпозиції клітин, методи на основі сіток тощо.

– *Планування руху в умовах невизначеності,* також називають «плануванням з використанням теорії прийняття рішень». Ця категорія охоплює алгоритми, що враховують невизначеність у передбачуванні майбутніх станів та невизначеність у визначенні поточного стану. Алгоритми цієї групи використовують моделі невизначеності, починаючи з прийняття одноразових рішень, продовжуючи плануванням із невизначеністю у передбачуваності, і завершуючи плануванням у інформаційному просторі, де важливо враховувати обмежену здатність сенсорів до точної оцінки поточного стану [11].

Інші дослідники запропонували класифікацію алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА **за типами задач** [1]:

- задачі розвідки;
- задачі доставки;
- задачі моніторингу.

Хоча кожен окремий тип задач буде визначатись своєю ціллю, проте дана класифікація не дає можливості назвати конкретні алгоритми, які б належали до тієї чи іншої групи. Один і той самий алгоритм у чистому чи модифікованому вигляді може бути використаний у двох або усіх групах.

Розглядаючи у якості критерію класифікації **алгоритмічний рівень**, алгоритми побудови маршрутів можна поділити на три категорії: традиційні, інтелектуальні та гібридні (рис. 1) [12].

*Традиційні* алгоритми спираються на інформацію про навколишнє середовище в межах математичної моделі робочого простору. З огляду на структуру та внутрішні властивості, традиційні алгоритми поділяються на чотири групи: на основі розбиття на клітинки (A\*), на основі математичних моделей (Nonlinear programming (NP) [8], Динамічне програмування (DP – Dynamic Programming) [13], Змішане цілочисельне програмування (MIP – Mixed-Integer Programming) [4], Управління прогнозуванням моделей (MPC – Model Predictive Control), функція Ляпунова), на основі графів (DFS, BFS, Дейкстра, RRT, PRM) і на основі потенціалів (метод потенційних полів (APF – Artificial Potential Fields)) [12].

*Інтелектуальні* алгоритми поділяються на алгоритми планування маршрутів для рою БПЛА та алгоритми із застосуванням штучного інтелекту (ШІ). Алгоритми планування маршрутів для рою БПЛА включають:

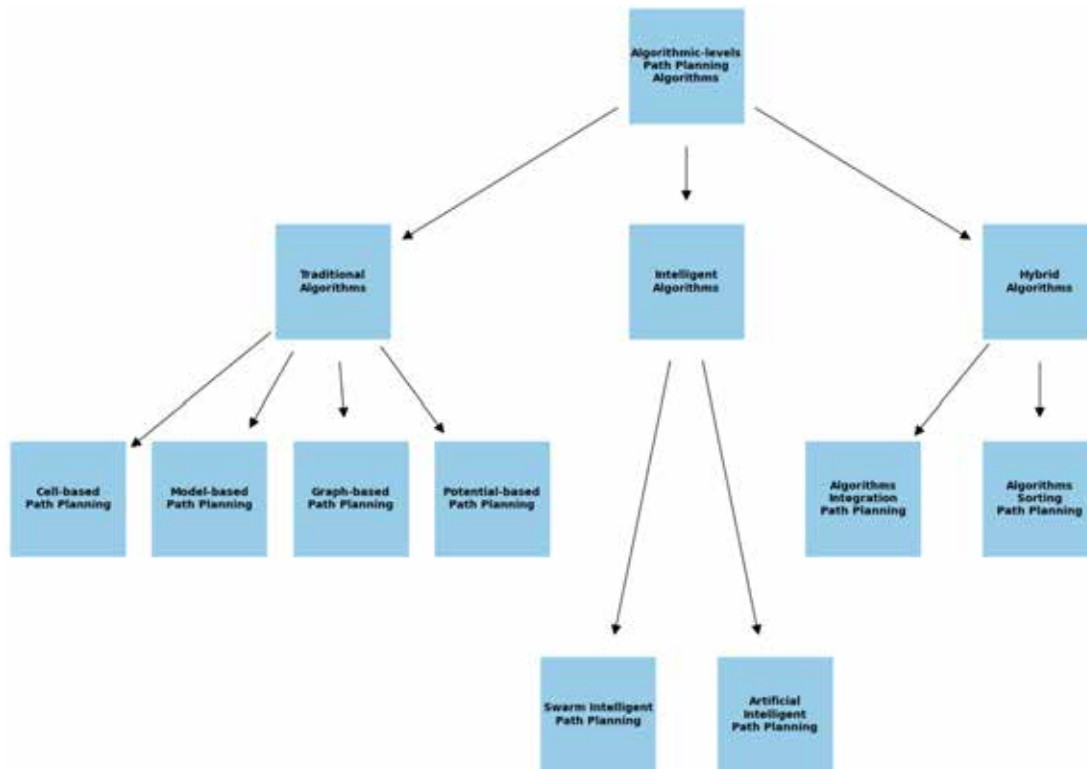


Рис. 1. Класифікація алгоритмів на основі алгоритмічних рівнів (за Ло Дж., Тянь Ю., Ван Ч.) [12]

– еволюційні алгоритми: Генетичний алгоритм (GA – Genetic Algorithm), Диференціальна еволюція (DE – Differential Evolution) [3], Генетичний алгоритм з не домінованим сортуванням II (NSGA-II – Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [7].

– біологічно натхненні алгоритми: Оптимізація мурашиних колоній (ACO – Ant Colony Optimizer) [15], Оптимізація рою часток (PSO – Particle Swarm Optimizer) [6], Grey Wolf Optimizer (GWO), Колонія штучних бджіл (ABC – Artificial Bee Colony)

– різноманітні мета-евристичні алгоритми: Табу-пошук (TS – Tabu Search), Симульований відпал (SA – Simulated Annealing), Оптимізатор мультивсесвіту (MVO – Multi-Verse Optimizer), кластеризація.

Алгоритми із застосуванням III представлені алгоритмами: навчання з підкріпленням (RL – Reinforcement Learning) [10], штучними нейронними мережами, теорією ігор і алгоритмом глибокого навчання (DL – Deep Learning). В останні роки ці алгоритми відіграють все більш важливу роль в автономному керуванні польотом і прийнятті рішень БПЛА [12].

*Гібридні алгоритми.* Враховуючи сильні та слабкі сторони різних алгоритмів побудови маршрутів руху, дослідники нерідко досліджують інтеграцію кількох

алгоритмів, щоб використати їхні відповідні переваги та компенсувати недоліки. Таким чином створюються гібридні алгоритми. Гібридні алгоритми включають інтеграцію наявних алгоритмів і сортування, поєднуючи методи для підвищення загальної продуктивності. Важливо відзначити, що гібридні підходи побудови маршрутів спрямовані на використання взаємодоповнюючих переваг різних алгоритмів, забезпечуючи ефективне рішення проблем побудови маршрутів руху БПЛА. До гібридних алгоритмів належать наступні комбінації: RRT та APF, GA та Навчання з опцією відмови (LRO – Learning with Rejection Option), GA та APF, DE та Q-learning, ABC та алгоритм Кажанів (BA – Bat Algorithm), K-means та Адаптивний симульований відпал (ASO – Adaptive Simulated Annealing), Оптимізація рою часток з квантовою поведінкою (QPSO – Quantum-behaved Particle Swarm Optimization) та DE [12].

Розглянемо також класифікацію алгоритмів за **функціональним рівнем**. Ця класифікація поділяє алгоритми побудови маршрутів за такими трьома аспектами: *на основі часу (time-based)*, *на основі простору (space-based)* та *на основі місії (missions-based)*. У якості складових mission-based алгоритмів введено задачу про найкоротший шлях, задачу комівояжера (TSP) і задачу покриття території. На рисунку 2 показано класифікацію алгоритмів побудови маршрутів на рівні функції.

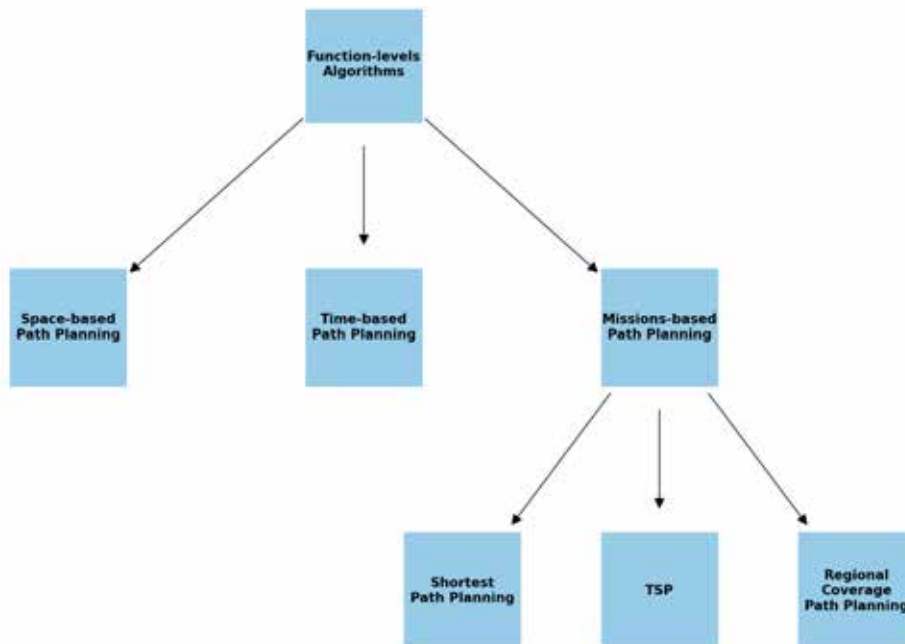


Рис. 2. Класифікація алгоритмів побудови маршрутів на рівні функції (за Ло Дж., Тянь Ю., Ван Ч.) [12]

*Spaced-based* алгоритми зосереджені на тому, як алгоритми обробляють складнощі середовища у просторі, враховуючи такі фактори, як перешкоди, рельєф і 3D-простір. Оцінка ефективності *spaced-based* алгоритмів здійснюється за просторовими характеристиками у різних робочих умовах. Алгоритми побудови маршрутів руху на основі часу аналізуються на основі їх часових характеристик, тобто з точки зору планування часу, швидкості реагування та адаптації до динамічних і чутливих до часу середовищ. Мета полягає в тому, щоб зрозуміти, наскільки добре алгоритми вирішують часові обмеження, властиві місіям БПЛА. *Missions-based* алгоритми відповідно оцінюються за показниками досягнення конкретних вимог місії, наприклад охоплення території або оптимізація параметрів місії. Різні місії БПЛА можуть вимагати різних підходів до планування шляху. Самими популярними підкатегоріями *missions-based алгоритмів* є: пошук найкоротшого шляху, TSP (задача комівояжера) та Regional Coverage Path Planning (Планування маршрутів для покриття регіону). Важливо відмітити, що пошук найкоротшого шляху є важливим у майже всіх задачах побудови маршрутів руху БПЛА. Тобто, може бути визначений як підпроблема для TSP та Regional Coverage Path Planning. Проте, якщо розглядати контекст тривимірного планування маршрутів, то оптимальний шлях не завжди буде найкоротшим шляхом завдяки, наприклад, впливу рельєфу місцевості або фізичних обмежень БПЛА. Ефективним методом

вирішення проблеми найкоротшого шляху може бути рекурентний нейронний мережевий підхід, у якому враховується діапазон динамічних факторів окрім просто оптимізації відстані чи часу [16]. TSP у побудові маршрутів руху БПЛА передбачає оптимізацію часу подорожі або відстані до вибраних маршрутних точок, де БПЛА виконує роль комівояжера, відвідуючи кожен пункт місії один раз. Regional Coverage Path Planning за мету мають мінімізацію споживання енергії, часу місії або максимізацію покриття. Особливістю цієї категорії є вирішення потенційних конфліктів, що виникають внаслідок накладених умов.

Ще одним варіантом класифікації алгоритмів побудови маршрутів є класифікація *за методом* (або підходом планування), до якого належить алгоритм. Дана класифікація дозволяє легко розібратись у природі того чи іншого алгоритма, зрозуміти який метод він використовує за основу. Як зазначають Дебнат С.К., Омар Р. та Лапит Н.Б. лише побудови оптимального маршруту недостатньо, оскільки це може спричинити вище споживання енергії безпілотним літальним апаратом, ніж будуючи субоптимальний маршрут. Розповсюдженою задачею планування траєкторії руху БПЛА є політ від заданої початкової точки до кінцевої точки у просторі з перешкодами. Перешкоди зазвичай не закріплені в одному місці та є динамічними, що вимагає обрахунок траєкторії під час польоту. Енергоефективне планування маршруту повинно гарантувати, що метод/алгоритм створить безпечний та оптимальний

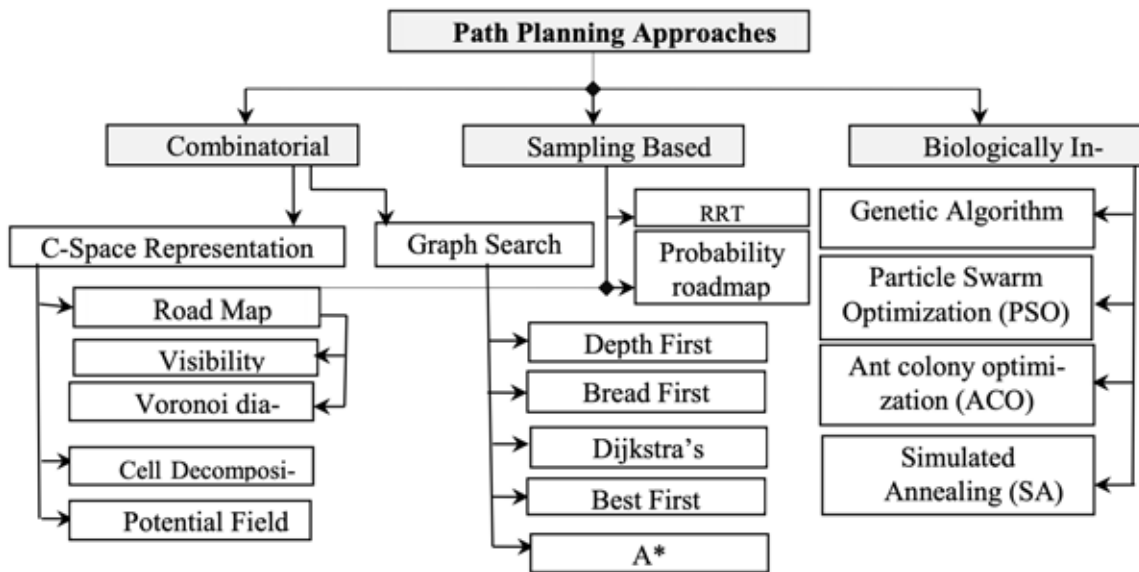


Рис. 3. Класифікація алгоритмів планування маршрутів за критерієм використаного метода (за Дебнат, С.К.; Омар, Р.; Латип, Н.Б.) [5]

маршрут і одночасно мінімізує тривалість подорожі та заощадить енергію. За цією класифікацією є три методи планування шляхів: комбінаторний, на основі вибірки та біологічний (рис. 3) [5].

**Висновки.** Будучи базовою технологією, що дозволяє БПЛА виконувати різноманітні завдання, планування маршруту відіграє вирішальну роль у багатьох програмах у сфері БПЛА. Ця стаття пропонує класифікацію алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА наступними критеріями: відповідно до умов руху БПЛА, за типами задач, за алгоритмічним рівнем, за функціональним рівнем та методом планування шляху. Кожен критерій має свою цінність для науковців при виборі

кінцевого алгоритму побудови маршруту руху або плануванні місії.

У плануванні маршрутів ключову роль відіграє поняття критерію оптимальності, яке виходить на перший план при виборі того чи іншого алгоритму побудови маршрутів руху БПЛА. Вибір певного алгоритму чи групи алгоритмів науковцями повинен розпочинатись з визначення поставленого завдання, і як результату обрання критерію за яким потрібно порівнювати та аналізувати алгоритми, приймаючи остаточне рішення.

Областю подальших досліджень може бути порівняння характеристик наявних алгоритмів та методів, визначення їх сильних та слабких сторін.

#### Список літератури:

1. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. Романюк та ін. 2023.
2. Addressing disasters in smart cities through UAVs path planning and 5G communications: A systematic review / Z. Qadir та ін. *Computer Communications*. 2021. Т. 168. С. 114–135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.01.003>.
3. An improved differential evolution based artificial fish swarm algorithm and its application to AGV path planning problems / G. Li та ін. *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, м. Dalian, China, 26–28 лип. 2017 р. 2017. URL: <https://doi.org/10.23919/chicc.2017.8027746>.
4. Chaudhry A., Misovec K., D'Andrea R. Low observability path planning for an unmanned air vehicle using mixed integer linear programming. *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601)*, м. Nassau, Bahamas, 17 груд. 2004 р. 2004. URL: <https://doi.org/10.1109/cdc.2004.1429334>.
5. Debnath S. K., Omar R., Latip N. B. A. A Review on Energy Efficient Path Planning Algorithms for Unmanned Air Vehicles. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2018. С. 523–532. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2622-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2622-6_51).
6. Energy-efficient Path Planning and Control Approach of USV Based on Particle Swarm optimization / F. Ding та ін. *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, м. Charleston, SC, 22–25 жовт. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/oceans.2018.8604920>.
7. Gupta G. P., Chawra V. K., Dewangan S. Optimal path planning for UAV using NSGA-II based meta-heuristic for sensor data gathering application in Wireless Sensor Networks. *2019 IEEE International Conference*

on *Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, м. GOA, India, 16–19 груд. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ants47819.2019.9118104>.

8. Karatas T., Bullo F. Randomized searches and nonlinear programming in trajectory planning. *40th Conference on Decision and Control*, м. Orlando, FL, USA, 4 груд. 2001 р. URL: <https://doi.org/10.1109/cdc.2001.981008>.

9. Kavraki L. E., Kolountzakis M. N., Latombe J. C. Analysis of probabilistic roadmaps for path planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1998. Т. 14, № 1. С. 166–171. URL: <https://doi.org/10.1109/70.660866>.

10. Kim H., Lee W. Real-Time Path Planning Through Q-learning's Exploration Strategy Adjustment. *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, м. Jeju, Korea (South), 31 січ. – 3 лют. 2021 р. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iceic51217.2021.9369749>.

11. LaValle S. M. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006. 842 с.

12. Luo J., Tian Y., Wang Z. Research on Unmanned Aerial Vehicle Path Planning. *Drones*. 2024. Т. 8, № 2. С. 51. URL: <https://doi.org/10.3390/drones8020051>.

13. Mokrane A., Braham A. C., Cherki B. UAV Path Planning Based on Dynamic Programming Algorithm On Photogrammetric DEMs. *2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, м. Istanbul, Turkey, 25–27 верес. 2020 р. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icee49691.2020.9249903>.

14. Ragi S., Chong E. K. P. UAV Path Planning in a Dynamic Environment via Partially Observable Markov Decision Process. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2013. Т. 49, № 4. С. 2397–2412. URL: <https://doi.org/10.1109/taes.2013.6621824>.

15. Real-time Dynamic Track Planning of Multi-UAV Formation Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm / G. Tian та ін. *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, м. Wuhan, 25–27 лип. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.23919/chicc.2018.8482622>.

16. Wang J. A recurrent neural network for solving the shortest path problem. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1996. Т. 43, № 6. С. 482–486. URL: <https://doi.org/10.1109/81.503260>.

17. Zhao Y., Zheng Z., Liu Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning. *Knowledge-Based Systems*. 2018. Т. 158. С. 54–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2018.05.033>.

## **Kucherenko O.I., Vakaliuk T.A. CLASSIFICATION OF METHODS AND ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING UAV ROUTES**

*The dynamic nature of UAVs, thanks to their high mobility, allows the adjustment of the movement trajectory in real time to adapt to different environmental conditions. A common task of UAV trajectory planning is to fly from a given starting point to an end point in an obstacle-filled space. Obstacles are usually not fixed in one place, but change over time and are difficult to accurately model, requiring in-flight trajectory corrections. Planning such trajectories can require complex calculations that will take a large amount of time, which is not acceptable for UAVs for reasons of both safety and energy efficiency. Therefore, engineers must be responsible for the choice of the applied algorithm for constructing the UAV movement route. Therefore, the classification and generalization of UAV route construction algorithms become necessary.*

*The paper presents the classification of methods and algorithms for constructing UAV traffic routes according to five criteria: according to UAV traffic conditions, by types of tasks, by algorithmic level, by functional level, and by the path planning method. Summarizing everything together, the following groups of algorithms and methods are considered: motion planning in continuous spaces, in space with differential constraints and in conditions of uncertainty; traditional, intelligent and hybrid algorithms; time-based, space-based, and mission-based planning; as well as: the combinatorial method, the sampling-based method, and the biological method.*

*In addition to the classification itself, information is added about the key features of certain groups of methods and algorithms, as well as information about specific representative algorithms included in one or another group of algorithms in a certain classification. When preparing the classification of algorithms, the latest research in the field of development of algorithms for constructing UAV traffic routes was used, including the use of artificial intelligence and machine learning.*

**Key words:** UAV, route, algorithm, optimal route, classification, criterion.