

ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ БПЛА

Вступ. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовуються у військовій справі, в першу чергу для ведення повітряної розвідки – як тактичної, так і стратегічної. Останнім часом БПЛА знаходять широке застосування також у цивільних сферах, що стало рушійною силою для розробки нових інформаційних технологій. Вони використовуються для доставки посилок клієнтам, оперативного транспортування медичних препаратів та результатів тестування (зокрема, на коронавірус) [1], ліквідації надзвичайних ситуацій та наслідків катастроф [2]. Ще одним важливим застосуванням БПЛА є моніторинг, спостереження, картографування території [3]. Для промислових складів БПЛА також корисні при управлінні запасами за допомогою відповідних програмних систем, наприклад, RFID [4].

Застосуванню традиційних транспортних засобів (автомобілів) присвячено багато робіт, огляд багатьох із них подано в [5].

На сьогодні одна з головних проблем 21 століття – це передача нового коронавірусу (Sars-CoV-2), який спровокував захворювання під назвою COVID-19, що спричинило 4 мільйони смертей (станом на серпень 2021). У зв'язку з цим кілька організацій розробляють вакцини, оскільки це найефективніший підхід до стійкого контролю над пандемією. Існує проблема у розповсюдженні вакцини через транспортні засоби, адже точні моделі маршрутизації для реальних проблем великого масштабу вимагають великих обчислювальних зусиль для пошуку рішень. Тому метаевристика [6] розроблена на основі комбінації та адаптації GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) з VND (Variable Neighborhood Descent), враховуючи різні оператори уточнення виявилася ефективною для розробки адекватного планування розподілу ампул з вакцинами для боротьби з COVID-19.

Використання БПЛА дозволяє значно скоротити витрати та час при застосуванні в цих сферах, оскільки вони дешевші в обслуговуванні, ніж традиційні транспортні засоби, і можуть знизити трудозатрати, виконуючи завдання автономно [7].

Аналізується науковий внесок у проблеми маршрутизації БПЛА для визначення основних характеристик цих проблем, а також тенденцій дослідження та останніх удосконалень. Література класифікується відповідно до цілей оптимізації, методів розв'язування, застосувань і обмежень.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, маршрутизація, транспортний засіб, оптимізація.

Цими та іншими факторами визначається актуальність питань формалізації, дослідження і розв'язування задач маршрутизації БПЛА.

Основна ціль цієї роботи – огляд робіт за сферою застосувань БПЛА, що представлені у сучасних дослідженнях. На основі аналізу наукових публікацій розглядаються задачі маршрутизації БПЛА та методи їх розв'язування.

1. Типи задач маршрутизації транспортних засобів

Проблеми обслуговування клієнтів чи відвідування об'єктів (цілей) породжують низку задач маршрутизації транспортних засобів (ЗМТЗ; англ. Vehicle Routing Problem, VRP). У певному сенсі, вони узагальнюють відому задачу комівояжера (ЗК; англ. Travelling Salesman Problem, TSP).

ЗМТЗ виникають при постановці проблем доставки, які мають багато подібного до задач маршрутизації БПЛА, оскільки в ЗМТЗ у традиційній постановці ведеться пошук оптимальних маршрутів для одного або кількох транспортних засобів при доставці товарів до виділених місць [8]. Мета роботи – мінімізація загальних транспортних витрат, а розв'язок класичної ЗМТЗ – це набір маршрутів, які починаються і закінчуються у місцях базування транспортних засобів чи складах (депо) за умови, що всі клієнти обслуговуються лише один раз і одним засобом. Витрати на транспортування можна покращити за рахунок зменшення загальної пройденої відстані та зменшення кількості необхідних транспортних засобів.

Зазвичай у реальних ЗМТЗ виникає низка додаткових обмежень, які породжують цілий спектр таких задач. Розглянемо найбільш поширені ЗМТЗ:

1) маршрутизація з обмеженням по вантажопідйомності (Capacitated VRP, CVRP): кожен транспортний засіб має обмежену вантажопідйомність [9]. CVRP – важливий при використанні БПЛА з обмеженими можливостями для доставки товарів чи інших вантажів;

2) маршрутизація з часовими вікнами (VRP with Time Windows, VRPTW): кожен клієнт повинен бути обслужений протягом певного часового вікна [10]. VRPTW має важливе значення при використанні БПЛА при обслуговуванні клієнтів, які мають часовий графік роботи чи, наприклад, для доставки швидкопсувних товарів. Важлива на практиці ситуація, коли ці вікна можуть уточнюватися шляхом перемовин перевізника та споживачів [11];

3) маршрутизація з кількома депо (Multiple Depot VRP, MDVRP): використовується декілька депо чи складів для обслуговування клієнтів [12]. MDVRP виникає при використанні БПЛА, базованими у декількох місцях, при виконанні об'їзтів цілей чи транспортуванні різних вантажів;

4) маршрутизація з поверненням і доставкою товарів (VRP with Pick-Ups and Deliveries, VRPPD): клієнти можуть повернути деякі товари до складу [13]. VRPPD – важлива при використанні БПЛА з декількома поверненнями та доставкою товарів;

5) маршрутизація з різним транспортом (Split Delivery VRP, SDVRP): клієнтів може обслуговувати декілька транспортних засобів [14]. SDVRP може описувати ситуацію, коли БПЛА використовуються для доставки товарів клієнтам, де один автомобіль може відвідати декількох клієнтів, а одного клієнта – декілька БПЛА;

6) маршрутизація з випадковими даними (Stochastic VRP, SVRP): деякі параметри (наприклад, кількість клієнтів, їхні вимоги, час обслуговування або час подорожі) є випадковими [15]. SVRP має важливе значення при використанні БПЛА для доставки товарів для задоволення стохастичних потреб;

7) маршрутизація з можливістю дозавантаження (VRP with Satellite Facilities, VRPSF): коли транспортний засіб доставить всі товари, він повинен організувати дозавантаження на маршруті (без повернення в депо) за допомогою додаткових транспортних засобів. Така ситуація інтенсивно досліджується в останні декілька років, коли доставку організують із сумісним використанням БПЛА та автомобілів [16, 35].

БПЛА раніше були у більшості випадків надбанням військових, проте останнім часом вони завоюють своє місце ще й у різних цивільних сферах. Їх стрімке поширення у практичних справах пояснюється, насамперед, порівняно невеликою вартістю, простотою керування, малими витратами на експлуатацію та утримання тощо. Далі розглядаються найбільш поширені застосування БПЛА у військовій та цивільній сферах.

2. Застосування БПЛА у військовій сфері

Існує багато переваг використання БПЛА при веденні військових операцій, таких як низька вартість, висока мобільність, невидимість для засобів виявлення та мінімізація ризиків людських жертв. Таким чином, у кількох недавніх локальних війнах чітко проявилася тенденція до збільшення використання БПЛА для виконання військових завдань. Коли БПЛА використовуються для виконання завдань по атаці на ворожі цілі, повинні враховуватися обмеження на вантажопідйомність БПЛА, а також тип та кількість озброєння, оснащення БПЛА, з одночасною оптимізацією маршруту. В процесі планування місії БПЛА також повинні визначатися тип і кількість зброї, яку БПЛА доставляє до кожної цілі, гарантуючи, що ця зброя може завдати досить великої шкоди цілі та задовольнити вимоги заданої місії.

Досліджено задачу маршрутизації БПЛА з конфігурацією зброї та часовим вікном (Multidepot UAV routing problem with consideration of weapon configuration and time window, MD-URP-WC&TW), яку можна розглядати як нове розширення традиційної ЗМТЗ [17]. У MD-URP-WC&TW слід спільно оптимізувати три види стратегій: конфігурації зброї в БПЛА, маршрутизації цілі та розподілу зброї до цілей. Для розв'язування задачі пропонується адаптивний алгоритм пошуку у великих околах (Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS). ALNS – розширення алгоритму пошуку у великих околах, вперше запропоновано S. Ropke та D. Pisinger [18], який широко використовувався для розв'язування складних задач маршрутизації транспортних засобів.

3. Використання БПЛА у сільському господарстві

БПЛА швидко стали важливою платформою у сільськогосподарських авіаційних операціях завдяки своїй високій ефективності, низькій трудомісткості та низьким загальним витратам. Вони широко застосовуються при проведенні посівів, аналізу їх стану, обприскуванні пестицидами та в інших сільськогосподарських операціях із використанням авіації [19, 20].

Перспективним є аналіз стану посівів за допомогою встановлених у певних місцях мікродатчиків, збір інформації із яких здійснюється БПЛА [21, 22].

У роботі [23] розглянута задача обприскування пестицидами сільськогосподарські угіддя. Характеристики задачі обприскування пестициду впливають на кількість і тривалість часового вікна, протягом якого сільськогосподарські угіддя можна обприскувати, а на ефективність обприскування пестициду впливає температура навколишнього середовища. Продуктивність БПЛА, розміри сільськогосподарських угідь, маршрут обприскування пестицидів та маршрут БПЛА між сільськогосподарськими угіддями впливають на результат задачі. Також обприскування пестицидами може вимагати кількох БПЛА для оброблення сільськогосподарських угідь. Задача полягає у тому, щоб забезпечити обприскування всіх заданих сільськогосподарських угідь, що потребує формування маршрутів одного чи декількох БПЛА, які мають облетіти декілька сільськогосподарських угідь. При обприскуванні пестицидами, не враховуючи маршрут БПЛА всередині конкретного угіддя, кожне поле можна подати як пункт завдання, а процес відвідування БПЛА всіх пунктів завдання можна охарактеризувати як задачу комівояжера.

Оптимізацію задачі обприскування пестицидів з кількома БПЛА, можна описати як вимогу, щоб декілька БПЛА обприскували пестицидами декілька сільськогосподарських угідь у часовому вікні, і щоб кожне сільськогосподарське угіддя могло бути обприскане лише одним БПЛА. З цією метою запропонована модель командного орієнтування Дубінса (Dubins Team Orienteering Problem, DTOP) – змінні часові вікна (Variable Time Windows, VTW) – модель змінного прибутку (Variable Profits, VP).

Отже, для розв'язування задачі розподілу завдань обприскування пестицидів застосовується модель Dubins Team Orienteering Problem-Variable Time Windows-Variable Profits (DTOP-VTW-VP) [24]. Розв'язування цієї моделі це типова *NP*-складна задача. Хоча точний алгоритм може бути використаний для отримання оптимального рішення DTOP-VTW-VP, важко отримати оптимальне рішення протягом поліноміального розв'язуваного часу, коли масштаб задачі збільшується. Тому для отримання рішення використовується лише евристичний алгоритм [25]. В даний час існує багато евристичних алгоритмів, що використовуються для вирішення DTOP-VTW-VP. Серед них генетичний алгоритм виявився ефективним евристичним алгоритмом розв'язування DTOP-VTW-VP. У більшості випадків він демонструє кращі результати і коротший час вирішення, ніж інші алгоритми.

4. БПЛА для порятунку при катастрофах

Швидке та точне визначення місцезнаходження потерпілих, точність та ефективність локалізації на місцях катастроф є ключем до порятунку багатьох життів під час нещасних випадків та стихійних лих, таких як землетруси, пожежі та лавини в горах. Для екстреної рятувальної місії під час землетрусу багато людей можна врятувати, якщо допомога буде надана своєчасно. Тому рятувальникам потрібно швидко і точно знати місцезнаходження осіб, які потрапили в небезпеку.

У статті [26] представлено GuideLoc – систему для безпроводної локалізації декількох цілей на основі поєднання застосування БПЛА та методу, який використовує для визначення сили прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator, RSSI) та кута прибуття (Angle of Arrival, AOA). Подібно до сучасних методів локалізації [27], GuideLoc використовує RSSI та AOA для оцінки позиціонування цілі.

Система бездротової локалізації на базі БПЛА складається з п'яти компонентів: багатороторного гелікоптера, бездротових сніферів, керованого контролера, програмного контролера та локатора цільового пристрою [28]. Процес локалізації такий, що налаштований БПЛА, оснащений системою пошуку та позиціонування, скерований БПЛА для певного маршруту. Оскільки цільовий пристрій періодично передає радіо на певній частоті [29], спрямовані антени, встановлені на БПЛА, можна використовувати для збору RSSI, оцінки AOA сигналу відповідно до RSSI і згодом отримання інформації про напрямок цілі.

GuideLoc отримує інформацію AOA та RSSI усіх цілей, оцінює місцезнаходження кожної цілі відповідно до інформації, використовує генетичний алгоритм для планування оптимального маршруту для відвідування кожної цілі з розрахунковими місцями, а потім починає пересування за визначеним оптимальним маршрутом. Коли БПЛА летить до цілі, контролюються AOA та RSSI цілі в режимі реального часу. Напрямок, де потужність сигналу найсильніша, вважається напрямком цілі. Потім БПЛА керується польотом у цьому напрямку. Після цього використовується метод

усереднення, щоб визначити, чи знаходиться БПЛА над ціллю, якщо так, координати GPS БПЛА повертаються як інформація про місцезнаходження цілі.

5. Поширення даних за допомогою БПЛА

Через велику мобільність транспортних засобів, часті збої на магістралях, спричинені динамічною топологією автомобільних спеціальних мереж (Vehicular Ad Hoc Networks, VANETs) та різноманітні перешкоди, ефективне отримання та використання даних за наявності затримок є складним питанням. Вважається, що нова техніка мобільної ретрансляції із застосуванням БПЛА сприяє більш надійному поширенню інформації у транспортних середовищах, де інфраструктура наявно-го зв'язку недоступна або мережеве з'єднання погане.

Компоненти інтелектуальної транспортної системи VANETs – це великі мобільні спеціальні мережі, що складаються з транспортних засобів із функціями зв'язку та придорожньої інфраструктури, які мають на меті надання послуг для автономного водіння та швидкісного обміну інформацією [30]. У VANETs водії в основному отримують дані про дорожні умови у режимі реального часу та інформацію про безпеку, що надсилається іншими транспортними засобами за допомогою технології бездротового зв'язку. Таким чином можна ефективно уникнути дорожньо-транспортних пригод та заторів на дорогах, а час подорожі та споживання енергії можна скоротити.

У статті [31] досліджується ефективно розповсюдження даних у кооперативних БПЛА за допомогою VANETs та формулюється максимізація пропускної спроможності мережі для знаходження кращих стратегій доставки та вибору оптимальних шляхів доставки даних, враховуючи швидкість передачі та затримками при поширенні даних. Для розв'язування задачі розроблено алгоритм максимізації пропускної здатності.

6. Використання систем на основі БПЛА для моніторингу забруднення повітря

Моніторинг забруднення повітря останнім часом став надзвичайно важливою цивілізаційною проблемою. Незважаючи на те, що підходи масового збору даних можуть бути адекватним рішенням для міських територій, вони не можуть бути реалізовані у сільському середовищі. Враховуючи це, пропонується використовувати БПЛА, оснащені стандартними датчиками, для виконання завдань з моніторингу забруднення повітря. Запропоновано алгоритм керування забрудненнями з використанням БПЛА (Pollution-driven UAV Control, PdUC) [32], який базується на метаевристиці гемотаксису та стратегії оптимізації роєм частинок. Це і дозволяє автоматично здійснювати моніторинг певної зони за допомогою БПЛА.

Алгоритм PdUC заснований на метаевристичній концепції гемотаксису, для пошуку території з найвищими концентраційними рівнями забруднення. Як тільки така точка забруднення буде знайдена, БПЛА обстежує всю територію, слідуючи спіральним рухом, починаючи з найбільш забрудненого місця. Алгоритм складається з двох фаз: пошуку, на якій БПЛА шукає максимальне глобальне значення забруднення, і розвідки, де БПЛА досліджує навколишню територію після спірального руху поки має місце така умова: він охоплює всю територію, дозволений час польоту закінчується або він знаходить інше максимальне значення, в цьому випадку він повертається до фази пошуку. Фаза розвідки ґрунтується переважно на двох раніше згаданих методиках: метаевристиці гемотаксису та алгоритмі оптимізації роєм частинок. Оптимізація роєм частинок – це метод, запропонований у [33], в якому розв'язок задачі оптимізації подається як частинка, рій яких рухається у певному просторі одночасно; кожна частинка зберігає свою позицію та найкращий стан (розв'язок), а при виборі стратегії подальшого руху в просторі враховує також і кращі стани, знайдені іншими частинками [34].

Висновок. Подано огляд робіт щодо проблем маршрутизації з використанням БПЛА та задач, які вони породжують, тенденцій дослідження та останніх розробок. Джерела класифіковано від-

повідно до сфер застосування БПЛА; згадано методи, які включають точні, евристичні, мета-евристичні та змішані алгоритми.

Зазначено, що у значному відсотку публікацій розглядаються питання використання різних видів транспортних засобів для доповнення плану маршрутизації БПЛА.

Список літератури

1. Gupta R., Kumari A., Tanwar S., Kumar, N. Blockchain-envisioned softwarized multi-swarming uavs to tackle covid-19 situations. *IEEE Network*. 2020. **35** (2). P. 160–167. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000439>
2. Erdelj M., Natalizio E. UAV-assisted disaster management: Applications and open issues. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. Kauai, HI, USA, 15–18 February 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCNC.2016.7440563>
3. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y., Debbah M. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *arXiv* 2018, arXiv: 1803.00680. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
4. Fernández-Caramés T.M., Blanco-Novoa O., Froiz-Míguez I., Fraga-Lamas P. Towards an Autonomous Industry 4.0 Warehouse: A UAV and Blockchain-Based System for Inventory and Traceability Applications in Big Data-Driven Supply Chain Management. *Sensors* 2019. 19. 2394. <https://doi.org/10.3390/s19102394>
5. Гуляницький Л.Ф., Коткова А.А. До класифікації задач маршрутизації транспортних засобів. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія "Математика і інформатика"*. 2020. **1** (36). С. 73–84. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2020.1\(36\).73-84](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2020.1(36).73-84)
6. Rodrigues A.J., Lima G. L. A metaheuristic to support the distribution of COVID-19 vaccines. Published in SciELO - Scientific Electronic Library Online. 2021. **31**. e20210031. <https://www.redalyc.org/journal/3967/396766539025/movil/> (звернення: 14.12.2021)
7. Bocewicz G., Nielsen P., Banaszak Z., Thibbotuwawa A. A Declarative Modelling Framework for Routing of Multiple UAVs in a System with Mobile Battery Swapping Stations. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*; Springer: Berlin, Germany, 2019. P. 429–441. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3_42
8. Dorling K., Heinrichs J., Messier G.G., Magierowski S. Vehicle Routing Problems for Drone Delivery. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.* 2016. **47**. P. 70–85. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2582745>
9. Ehsan T., Vahid K. Enhanced intelligent water drops and cuckoo search algorithms for solving the capacitated vehicle routing problem. *Information Sciences*. 2016. 334. P. 354–378. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.11.036>
10. Ilker K., Nursel O. An advanced hybrid meta-heuristic algorithm for the vehicle routing problem with backhauls and time windows. *Computers & Industrial Engineering*. 2015. **86**. P. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.014>
11. Yao C., Chen S., Yang Z.. Vehicle Routing Problem with Flexible Time Window. *A Bi-level Approach*. arXiv:2109.03539v1 [eess.SY] 8 Sep 2021. <https://arxiv.org/abs/2109.03539> (звернення: 14.12.2021)
12. Montoya-Torres J.R., Franco J.L., Isaza S.N., Jim'enez H.F., Herazo-Padilla N. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*. 2015. **79**. P. 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>
13. Sung I., Nielsen P. Zoning a Service Area of Unmanned Aerial Vehicles for Package Delivery Services. *J. Intell. Robot. Syst.* 2019. **97**. P. 719–731. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01045-7>
14. Mohammad M.-J., Seokcheon L. The customer-centric, multi-commodity vehicle routing problem with split delivery. *Expert Systems with Applications*. 2016. **56**. P. 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.03.030>
15. Gendreau M., Laporte G., Séguin R. Stochastic vehicle routing. *Eur. J. Oper. Res.* 1996. **88**. P. 3–12. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00050-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00050-X)
16. Wang Z., Sheu J.-B. Vehicle routing problem with drones. *Transportation research part B: methodological*. 2019. **122**. P. 350-364. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005>
17. Zhou T., Zhang J., Shi J., Liu Z., Huang J. Multidepot UAV Routing Problem with Weapon Configuration and Time Window. *Journal of Advanced Transportation*. May, 2018. P.3. <https://doi.org/10.1155/2018/7318207>
18. Ropke S., Pisinger D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*. 2006. **40** (4). P. 455–472. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0135>

19. Torres-Sanchez J., López-Granados F., Peña J.M. An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. **114**. P. 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.019>
20. Qin W.-C., Qiu B.-J., Xue X.-Y., Chen C., Xu Z.-F., Zhou Q.-Q. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*. 2016. **85**. P. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.018>
21. Гнатієнко Г.М., Домрачев В.М., Єрмак В.В., Сайко В.Г. Технології використання дронів у агрокібернетиці. В кн.: *Ідеї академіка В.М. Глушкова і сучасні проблеми теоретичної кібернетики*. Мат. ІХ Всеукр. наук.-практ. конф. «Глушковські читання» (Київ, 2020 р.). 2020. С.43–46.
22. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O. Wireless Smart Biosensor for Sensor Networks in Ecological Monitoring. Proceeding of the 9th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2017. Bucharest, Romania. September 21–23, 2017. P. 679 – 683. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095177>
23. Luo H., Niu Y., Zhu M., Hu Y., Ma H. Optimization of Pesticide Spraying Tasks via Multi-UAVs Using Genetic Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. November 12, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7139157>
24. Edison E., Shima T. Integrated task assignment and path optimization for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms. *Computers & Operations Research*. 2011. **38** (1). P. 340 – 356. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.06.001>
25. Lin S.-W., Yu V.F. A simulated annealing heuristic for the team orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*. 2012. **217** (1). P. 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.08.024>
26. Wang A., Ji X., Wu D., Bai X., Ding N., Pang J., Chen S., Chen X., Fang D. GuideLoc: UAV-Assisted Multitarget Localization System for Disaster Rescue. *Mobile Information Systems*. March, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1267608>
27. Pehlivanoglu Y.V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV. *Aerospace Science and Technology*. **16** (1). P. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.02.006>
28. Birk A., Wiggerich B., Bülow H., Pflingsthorst M., Schwertfeger S. Safety, security, and rescue missions with an unmanned aerial vehicle (UAV): aerial mosaicking and autonomous flight at the 2009 european land robots trials (ELROB) and the 2010 response robot evaluation exercises (RREE). *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2011. **64** (1). P. 57 – 76. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9546-8>
29. Rahman E.U., Zhang Y., Ahmad S., Ahmad H.I., Jobaer S. Autonomous vision-based primary distribution systems porcelain insulators inspection using UAVs. *Sensors*. 2021. **21** (3). P. 974. <https://doi.org/10.3390/s21030974>
30. Lee Y.S., Park J.W., Barolli L. A localization algorithm based on AOA for ad-hoc sensor networks. *Mobile Information Systems*. 2012. **8** (1). P. 61 – 72. <https://doi.org/10.1155/2012/986327>
31. Fan X., Huang C., Fu B., Wen S., Chen X. UAV-Assisted Data Dissemination in Delay-Constrained VANETs. *Mathematical Problems in Engineering*. October, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8548301>
32. Cunha F., Villas L., Boukerche A. et al. Data communication in VANETs: protocols, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*. 2016. **44**. P. 90 – 103. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.02.017>
33. Boussa I., Lepagnot J., Siarry P. A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences. An International Journal*. 2013. **237**. P. 82–117. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.02.041>
34. Li X., Clerc M. Swarm Intelligence. In: Handbook of Metaheuristics. Third Edition (Ed. M. Gendreau, J.-Y. Potvin). Springer International Publishing AG, 2019. P. 353 – 384. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_11
35. Wang X., Poikonen S., Golden B. The vehicle routing problem with drones: several worst-case results. *Optimization Letters*. 2017. **11** (4). P. 679 – 697. <https://doi.org/10.1007/s11590-016-1035-3>

Одержано 13.12.2021

Ньорба Ірина Мирославівна,

аспірантка Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.

iryanorba@gmail.com

UDC 519.8

Iryna Norba

Vehicle Routing Problem When Using UAVs

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

Correspondence: irynanorba@gmail.com

Introduction. In recent years, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) is growing rapidly. Initially introduced for military purposes, drones and related technologies have been successfully switched to a number of new civilian applications in the last few years, such as delivery, logistics, surveillance, entertainment, and more. They also opened up new opportunities, such as working in difficult or dangerous areas. The UAV has the potential to solve the problem of air mobility, allowing to change transport and logistics in the future. Combining UAVs with traditional land vehicles can solve the last-mile delivery problem by achieving significant improvements in distribution costs and speed of vehicle delivery. One of the biggest challenges is to plan UAV routes with a number of constraints, including time, distance or energy costs, cargo weight, environmental and environmental conditions (such as wind direction or obstacles), UAV battery life, and demand requirements. users you want to visit. Thus, it revealed the need to classify different types of research and study the general characteristics of the study area. This article aims to help identify the main topics and new areas of research, as well as provides a published overview of the current state and contribution to the problem of UAV routing, as well as a general categorization of the problem of vehicle routing (VRP).

The purpose of the paper is to analyze the scientific contributions to the problem of UAV routing to determine the main characteristics of these problems, as well as trends in research and recent improvements.

Results. Sources are classified according to the areas of application of UAVs; methods that include exact, heuristic, metaheuristic, and mixed algorithms are mentioned.

Conclusions. An overview of the work on routing problems using UAVs and the tasks they generate, trends in research and recent developments.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, routing, vehicle, optimization.