

Кучеренко О.І.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО СИСТЕМИ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ДРОНІВ

У даній статті виконано огляд досліджень науковців щодо системи побудови маршрутів дронів у залежності від конкретних умов та поставленої мети, наприклад мінімізація витрат енергії, зниження рівня шуму, збільшення ефективної дальності польоту дрона без додаткової зарядки, мінімізація часу польоту тощо. В роботі, у тому числі, розглянуто варіанти вирішення науковцями складних задач, що не мають точного розв'язку. Також розглянуто методи оптимізації розв'язку задач для великої кількості дронів та адресатів. Проведено огляд досліджень щодо системи побудови маршрутів дронів з врахуванням різних потреб і задач, які іноді можуть бути досить суперечливими, відповідно вимагають індивідуальних алгоритмів вирішення. У той же час результати деяких досліджень можуть бути поєднані для досягнення комплексного ефекту. Важливо відмітити, що розглянуті в роботі алгоритми можна умовно поділити на дві групи: (1) ті, які для побудови маршрутів мають обраховуватись на стороні інформаційної системи та (2) технічними засобами безпосередньо безпілотного літального апарата, наприклад у випадку динамічної побудови маршруту. Розглянуто переваги використання нейромережевого моделювання в частині зменшення часу оперативного формування траєкторії польоту квадрокоптера. В роботі було розглянуто алгоритми розширення зони доставки дронами за допомогою системи громадського транспорту, комбінованої доставки вантажівкою та дроном, побудови маршрутів наземного моніторингу інфраструктури та сільського господарства, забезпечення максимального огляду місцевості камерою дрону, зміни формування групи дронів для зменшення використання енергії, мінімізації шумового забруднення безпілотними літальними апаратами. Для більшості озвучених задач існують рішення, що можуть бути використані практично. Проте, досі є зони для додаткових досліджень, оскільки ряд вхідних параметрів не було враховано взагалі або враховано за спрощеними методами.

Ключові слова: БПЛА, дрон, маршрут, доставка вантажів, оптимальний маршрут, логістика.

Постановка проблеми. У цей час розвиток технологій дає можливість людству автоматизувати надзвичайно велику кількість рутинних задач. Головною особливістю стає те, що пристрої, що виконують автоматизацію рутинних задач, стають все меншими, але у той же час «розумнішими». Однією з задач автоматизації є задача побудови маршрутів доставки вантажів на так званій ділянці «останньої милі» або в умовах жорстких обмежень, наприклад обмеженого часу, ліміт щодо затрат ресурсів, виконання завдання у час пік та ін. Зручним засобом доставки вантажів постають безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони. Завданням науковців все частіше стає розробка методологій побудови оптимальних маршрутів для тих чи інших потреб. Потреби можуть надзвичайно сильно варіюватись – від самої звичайної доставки вантажу з точки А у точку Б або розрахунку найбільш економного з точки зору витрат

маршруту, аж до доволі спеціалізованих задач, таких як, сканування поверхні певної території для виявлення об'єктів, що цікавлять, створення карт місцевості тощо. Також це можуть бути звичайні запити від зацікавлених осіб з метою підвищення рівня комфорту при використанні БПЛА. Для прикладу з метою зниження рівня шумового забруднення, полегшення процесів завантаження та розвантаження та ін. Причому одні можуть прямо суперечити іншим. Відповідно, вирішення проблеми побудови оптимального маршруту буде ризикитись у залежності від конкретної потреби.

Існує багато досліджень щодо побудови маршрутів руху БПЛА від початкової точки до пункту призначення. Натомість, через практичну цінність, великої актуальності набувають більш складні задачі, методологія планування маршрутів для яких враховує специфічні вимоги та обмеження, такі як: вплив погодних умов на дальність

польоту дрона, заборона руху на певних висотах чи заданими районами, синхронізація місцезнаходження дрона з іншими учасниками процесу транспортування вантажів тощо. Велика кількість вхідних параметрів ускладнює алгоритми та методології вирішення поставлених задач, змушуючи дослідників або не враховувати другорядні параметри взагалі, або ж враховувати їх з використанням менш точних спрощених алгоритмів. Розвиток нових технологій, зазвичай, сприяє введенню нових вхідних даних, які також потрібно брати до уваги. Отже, можна стверджувати, що існуючі дослідження не враховують всі можливі параметри, а відповідно є області для додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача побудови маршрутів руху дронів набуває все більшого розповсюдження з розвитком технічного прогресу. Велика кількість вчених приділяла увагу цій темі, у тому числі: Алькуз Б. (Alkouz B.) [8], Бугеттайя А. (Bouguettaya A.) [8], Карлссон Й. Г. (Carlsson J. G.) [4], Чаудурі С. (Choudhury S.) [1], Делалай Д. (Delahaye D.) [9], Фелнер А. (Felner A.) [3], Гуо С. (Guo S.) [8], Габібейлі Т. (Habibbeyli T.) [6], Кохендерфер М. Дж. (Kochenderfer M. J.) [1], Лакдари А. (Lakhdari A.) [8], Мао С. (Mao X.) [2], Скоццаро Дж. (Scozzaro G.) [9], Шахзад Б. (Shahzaad B.) [8], Шарон Г. (Sharon G.) [3], Соловей К. (Solovey K.) [1], Сонг С. (Song S.) [4], Штерн Р. (Stem R.) [3], Стертевант Н. (Sturtevant N.) [3], Павоне М. (Pavone M.), Тонг Б. (Tong B.) [2], Вела А. Е. (Vela A. E.) [9], Ванг Дж. (Wang J.) [2], Ванг С. (Wang X) [2], Чжоу Ф. (Zhou F.) [2], Чжен В. (Zheng W.) [2], а також Дашкевич А. О. [7], Шоман О. В. [7], та ін.

Метою роботи є огляд досліджень щодо системи побудови маршрутів дронів, а також досліджень, що можуть вплинути на алгоритми побудови маршрутів.

Виклад основного матеріалу. У роботі [1] розглянуто проблему маршрутизації великого парку безпілотників для одночасної доставки посилок на широких міських територіях. Для збільшення ефективної дальності польоту та простору можливих доставок, а також економії заряду, розглядається можливість окрім прямих польотів, також використання засобів громадського транспорту, таких як автобуси та трамваї (рис. 1). Автори зазначають, що розрахунки ускладнені через великий розмір транзитних мереж. У роботі представлено комплексну алгоритмічну структуру, що прагне мінімізувати максимальний час для виконання будь-якої доставки та вирішує багатогранні

обчислювальні проблеми за допомогою дворівневого підходу. Перший рівень призначає дронам послідовності доставки вантажів з приблизно оптимальним поліноміальним алгоритмом розподілу часу. На другому рівні виконується розподіл шляхом періодичної маршрутизації флоту через транзитну мережу, використовуючи ефективні, обмежені неоптимальні багатоагентні методи пошуку шляху [1].

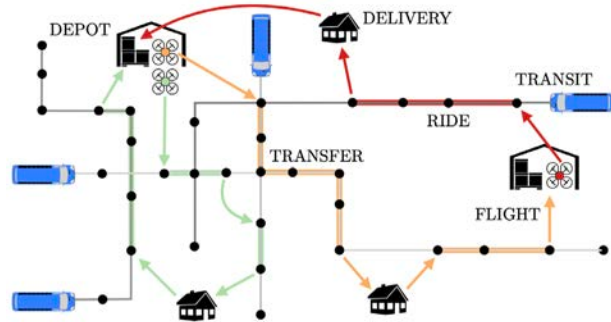


Рис. 1. Приклад побудованих маршрутів дронів з використанням засобів громадського транспорту (за Чаудурі С., Соловей К., Кохендерфер М. Дж. та Павоне М.) [1]

Автори зазначають, що вирішити поставлену задачу можна було б як змішану цілочисельну лінійну програму (MILP), однак в реальних умовах (сотні дронів, тисячі пакунків, великі транзитні мережі) навіть найсучасніші підходи MILP погано масштабуються. Тому методологія авторів полягає у розділенні проблеми на дві окремі підпроблеми, що вирішуються поетапно [1].

Задачею верхнього рівня (першого етапу) автори визначили розподіл завдань, щоб вирішити, які вантажі доставляються яким дроном і в якому порядку. У якості вхідних даних алгоритм верхнього рівня приймає склади та місця доставки посилок, а також оцінку часу подорожі дрона між кожною парою місць. Автори розробили ефективний поліноміальний алгоритм розподілу завдань із приблизно оптимальним діапазоном виконання [1].

У якості задачі для нижнього рівня дослідники визначили задачу планування маршруту для кожного з безпілотників, щоб виконати призначені завдання доставки. Розроблений алгоритм нижнього рівня генерує детальні маршрути розташування безпілотників у просторі та часі, а також транзитних транспортних засобів. Тут же відбувається врахування зміни транзитної мережі в часі. Цей рівень також відповідає за те, що кілька безпілотників не сядуть на транспортний засіб одночасно, жоден транзитний транспортний засіб не

перевищить свою вантажопідйомність, а також за дотримання обмеження щодо енерговитрат дрона. Для ефективного вирішення індивідуальних обмежень та обмежень між дронами, автори розглядають проблему маршрутизації як розширення багатоагентного пошуку шляху (MAPF) до транзитних мереж. Вони адаптували масштабований, обмежений субоптимальний варіант високоефективного вирішувача MAPF під назвою Conflict-Based Search [3] для вирішення проблеми планування набору маршрутів, по одному для кожного дрона (для доставки поточного пакета). Повна послідовність завдань доставки виконується у манері відступаючого горизонту, переплановуючи маршрут наступного завдання дрона після того, як він виконає поточне [1].

Для узгодження розрахунків вищого та нижчого рівнів автори використали сурогатну оцінку витрат. Чим краще сурогатна оцінка, яка використовується для розподілу завдань на першому етапі, тим вищий рівень поєднання зв'язків, тобто тим краще рішення першого етапу для другого [1].

Дослідники продемонстрували ефективність підходу за допомогою широкомасштабного моделювання з двома реальними транзитними мережами, використанням до 200 дронів, 5000 відправлень і до 8000 зупинок у транзитній мережі. Структура виявилась здатною до масштабування, обчислюючи рішення, близькі до оптимальних, які задовольняють численні системні обмеження, як правило, протягом декількох секунд. Дослідники встановили, що їх підхід дозволяє збільшити ефективну дальність польоту за допомогою наземного транспорту до 360% [1].

В роботі [2] розглянуто проблему побудови оптимального маршруту для доставки вантажівкою з безпілотником. Науковці Тонг Б., Ванг Дж., Ванг С., Чжоу Ф., Мао С., Чжен В. зазначають, що більшість наявних досліджень про розв'язання проблеми доставки парою вантажівка-дрон, що є окремим випадком задачі комівояжера з дроном (TSP-D), ігнорують час очікування вантажівки в точках зустрічі. Тому автори створили змішану цілочисельну модель нелінійного програмування, яка враховує часові обмеження та обмеження маршруту, з метою мінімізації загального часу доставки. Запропонована модель розв'язана за допомогою алгоритму пошуку зі змінною околицею та забороненими рухами (Variable Neighborhood Tabu Search Algorithm). На рисунку 2 представлена блок-схема алгоритму [2], де K – кількість ітерацій, T_L – список табу, Ω^K – поточне рішення, Ω^B – оптимальне рішення,

Ω^N – рішення для сусідства, τ^K – поточне значення цільової функції, τ^N – значення цільової функції для рішення по сусідству.

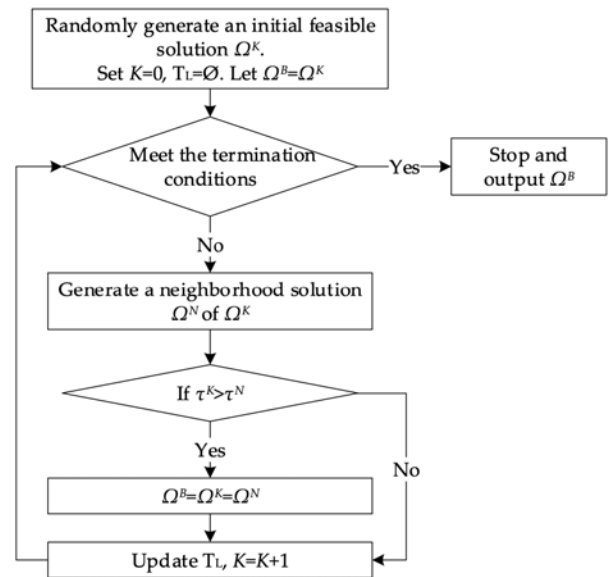


Рис. 2. Блок-схема алгоритму пошуку зі змінною околицею та забороненими рухами за Тонг Б., Ванг Дж., Ванг С., Чжоу Ф., Мао С., Чжен В. [2]

Дослідники встановили, що доставка у тандемі вантажівкою та дроном може ефективно скоротити загальний час доставки на 20,1% порівняно з традиційною доставкою виключно вантажівкою; більша кількість пар вантажівка-дрон може ефективно зменшити загальний час доставки, але гранична вигода поступово зменшується; збільшення лише швидкості вантажівки або швидкості дрона не може мінімізувати час доставки, через необхідність чекати у точці зустрічі. Автори прийшли до висновку, що лише синхронне збільшення швидкостей обох, вантажівки та дрона, можуть суттєво зменшити загальний час доставки [2], а також зазначають, що їх результат узгоджується з висновком, зробленим Карлсоном та Сонгом у [4].

Науковці Карлссон Й. Г. та Сонг С. у своїй роботі [4] зайнялись визначенням ефективності гібридного підходу доставки дроном та вантажівкою. Вони досліджували скільки покращень можна реалізувати математично обґрунтованим способом, за якого БПЛА (або парк БПЛА) надає послуги клієнтам, виконуючи доставки вантажів на кінцевій частині маршруту, повертаючись до вантажівки після доставки вантажу, яка також рухається. Автори зазначають, що незважаючи на те, що апаратне забезпечення для таких систем вже створено та існує (одна конкретна реалізація, яка називається «HorseFly», що була розро-

блена спільно AMP Electric Vehicles та Університетом Цинциннаті), проте поки що не зрозуміло, наскільки такий підхід може насправді забезпечити покращену якість обслуговування [4].

Автори підкреслюють, що проблему маршрутизації «HorseFly» надзвичайно важко розв'язати до оптимальності, оскільки це узагальнення проблеми комівояжера, яка вимагає розгляду місць зустрічі вантажівки та БПЛА. Таким чином, до цієї проблеми використаний підхід з парадигми безперервної апроксимації, в якій замість детальних даних використовуються короткі підсумки, а замість числових методів аналітичні моделі. Автори вирішили звести задачу до невеликого набору параметрів, а потім визначити, як ці параметри впливають на розв'язок задачі. Якщо коротко, розроблена модель припускає, що клієнти розподілені відповідно до відомої щільності ймовірності в евклідовій площині [4].

Карлсон та Сонг у своєму дослідженні зробили формальне визначення проблеми маршрутизації, в якій необхідно координувати вантажівку та один БПЛА (маршрутизація «HorseFly» з однією вантажівкою та одним БПЛА). Оптимальний тур точками p_1, \dots, p_n – розв'язок оптимізаційної задачі

$$\underset{x_1, \dots, x_n, \sigma \in S_n}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^n \max \left\{ \frac{1}{\phi_0} \|x_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)}\|, \frac{1}{\phi_1} (\|x_{\sigma(i)} - p_{\sigma(i)}\| + \|p_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)}\|) \right\}$$

де p_1, \dots, p_n – набір точок на площині, $\phi_0, \phi_1 > 0$ – швидкості вантажівки та БПЛА відповідно, причому $\phi_0 < \phi_1$, $S_n \in \sigma$ – множина всіх перестановок набору $\{1, \dots, n\}$, з доданою умовою, що $\sigma(n+1) = \sigma(1)$ [4].

Автори провели дві обчислювальні симуляції, які підтвердили, що використаний ними підхід безперервної апроксимації є дійсним на практиці. Перше моделювання вони провели в евклідовій площині, тоді як друге використовувало інформацію про пересування в режимі реального часу у дорожній мережі за допомогою Google Directions API [4, 5].

Використовуючи асимптотичний теоретичний аналіз у евклідовій площині, а також набір обчислювальних експериментів, дослідники дійшли висновку, що підвищення ефективності завдяки доповненню вантажівки доставки дроном є пропорційним кореню квадратному зі співвідношення швидкостей вантажівки та дрона. Проте, автори зазначили, що у їх аналізі є слабе місце – вони використовують евристичні методи для обчислення скоординованих маршрутів між вантажівкою та дроном, а не справжнє глобально оптимальне рішення [4].

У роботі [6] Тунджай Габіббейлі (Tunjay Nabibbayli) розповідає про використання техноло-

гічних рішень компанії DJI для керування квадрокоптерами з інтелектуальними режимами польоту з метою наземного моніторингу інфраструктури та сільського господарства, що характеризується великими гірськими та лісовими районами. Мова йде про вирішення задач автоматичного керування [6].

Т. Габіббейлі відзначає, що в умовах відсутності необхідної кількості інформації неможливо побудувати точну математичну модель керування маршрутом польоту дрона. Автор пропонує застосовувати методи нечіткої логіки в управлінні квадрокоптером, які передбачають компіляцію евристичних знань та використання інтуїтивно зрозумілих даних. Т. Габіббейлі окреслив два аспекти нечітких підходів до вирішення задач автоматичного керування. Перший – це створення класифікатора можливих ситуацій, де описані цілі та завдання функціонування динамічної системи. Другий підхід передбачає пряме нечітке регулювання змінних об'єкта керування. Автором запропоновано алгоритм створення «розумної» системи уникнення перешкод для автопілотування дрона на основі комбінованого використання системи нечіткого логічного висновку та багатошарової прямої нейронної мережі [6].

В роботі [6] за основу взято квадрокоптер DJI Mavic 2, оснащений шістьма датчиками для виявлення перешкод у всіх напрямках. Завдяки системі автопілота Flight Autonomy всі дані передаються та обробляються постійно в режимі реального часу. У якості алгоритму формування траєкторії польоту запропоновано використати нечітку систему висновків на основі аналізу експертних та емпіричних даних. Цей алгоритм забезпечує наземне автопілотування дрона, оснащеного датчиками виявлення перешкод у п'яти секторах фронтального огляду [6].

Дослідник запропонував свій алгоритм формування маршруту автопілотування квадрокоптера в п'яти напрямках, в якому розглядається обмежений набір логічно послідовних правил у вигляді дев'ятнадцяти інформаційних фрагментів. Наприклад, «Якщо на траєкторії польоту квадрокоптера не виявлено будь-якої перешкоди або вона знаходиться занадто далеко, то немає необхідності змінювати напрямок, висоту і знижувати швидкість» і так далі. На основі фрагментів запропоновано створити правила у символічній формі, які узгоджуються з необхідними діями (реакціями) одного з параметрів: швидкість, поворот, крок. В результаті формується таблиця коефіцієнтів. Вхідними параметрами є дані з п'яти секторів, вихідними: коефіцієнти зміни швидкості, повороту, кроку.

Отримана таблиця є евристичною базою знань, що використовується багаточисловою нейронною мережею для побудови аналітичної моделі формування траєкторії польоту дрона. Результатом роботи нейромережі є робоча апроксимована модель формування траєкторії польоту, у якій врахований відносний вплив кожного з вхідних параметрів [6].

У роботі [7] науковці Дашкевич А.О. та Шоман О.В. пропонують підхід, за допомогою якого можна визначити набір точок, які забезпечать максимальний огляд місцевості камерою дрону. Зазначається, що це може бути корисним у плануванні маршрутів польоту дронів при аерофотозйомці територій [7].

Спосіб вирішення задачі максимального огляду місцевості автори формулюють наступним чином. У якості вхідних даних використовується полігональна модель місцевості. Алгоритм передбачає розташування півсфери у центрі кожного полігону, з центру якого «випускаються» промені заданої відстані. У результаті отримується множина точок-кандидатів, яку потрібно дискретизувати на регулярну сітку площини. Далі проводиться пошук полігонів видимих з точок-кандидатів за допомогою просторового хешування. Після операцій сортування, розрахунку кількості видимих полігонів та тестування коефіцієнту покриття, отримується вихідна множина точок з максимальним оглядом [7].

Автори провели низку експериментів з метою вивчення впливу таких параметрів як роздільна здатність сітки та ін. на результати роботи свого алгоритму [7].

Як зазначають автори, запропонований метод дає можливість визначити мінімальну кількість точок розташування дронів для досягнення максимального огляду поверхні місцевості. Недоліком розробленого методу є неможливість аналітичного визначення роздільної здатності сітки [7].

Інше цікаве дослідження провела група авторів Гуо С., Алькуз Б., Шахзад Б., Лакдарі А., Бугеттайя А. [8]. Вони у своїй роботі дослідили залежність кількості використаної енергії роєм дронів в залежності від їх формування у повітрі [8]. Автори зазначають, що формування у зграї є природною поведінкою птахів. Наприклад при міграції гуси летять у формі V для збереження енергії за рахунок підйомної сили, яка створюється сусідніми птахами. Це може бути використане при одночасній доставці вантажів групою дронів. Автори розглянули чотири формування: фронт (Front), ряд (Column), V або ешелон (Echelon) (рис. 3).

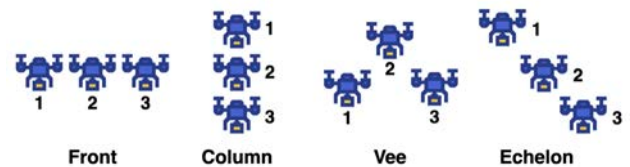


Рис. 3. Види формувань зграї дронів за Гуо С., Алькуз Б., Шахзад Б., Лакдарі А., Бугеттайя А. [8]

У результаті вони зібрали набір даних про формування дронів. Результати були отримані за рахунок моделювання впливу вітру на політ дрона на закритому випробувальному стенді з використанням спеціально створеної системи глобального позиціонування на основі зображень. У якості зграї використовувалась група з трьох безпілотників, які літали напротязі однієї хвилини у кожному з формувань за трьох умов впливу вітру (без вітру, фронтальний та боковий вітер). Швидкість вітру 6,1 км/год. Збирались такі види даних як: кути нахилу, крену, повороту, швидкість осей (x, y та z), найнижча та найвища температури в градусах Цельсія, відсоток заряду батареї, вимірювання барометра, час роботи двигуна і прискорення по осях (x, y і z) [8].

На рис. 4 представлені показники середнього споживання енергії всіх дронів у різних формуваннях та умов вітру протягом однієї хвилини. Так, у випадку відсутності вітру найменш енергозатратним виявилось V формування. Однак дане формування споживає найбільшу кількість енергії при бічному вітрі. А ось формування у вигляді ряду споживає найменшу кількість енергії при бічному вітрі, який забезпечує підйомну силу для всіх дронів [8].

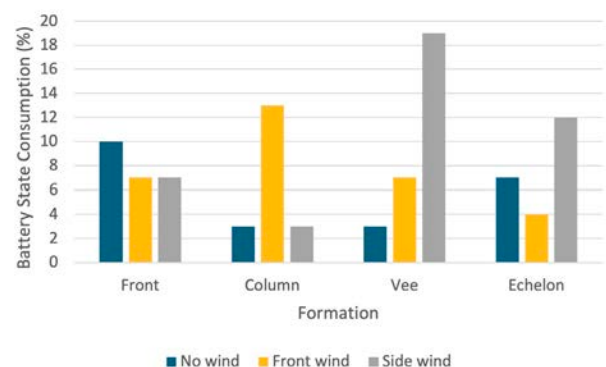


Рис. 4. Витрати заряду акумулятора різних формувань за Гуо С., Алькуз Б., Шахзад Б., Лакдарі А., Бугеттайя А. [8]

У роботі [9] група авторів (Скоззаро Дж., Делайгай Д. та Вела А. Е.) розповідає про значне збільшення повітряного руху БПЛА в міських районах і, як наслідок, зростання рівня шуму останніми роками, не дивлячись на технічний прогрес щодо зменшення шумності двигунів. Автори

посилаються на результат дослідження, зробленого Національним управлінням з авіонавтики та дослідження космічного простору (NASA), яке говорить про набагато більшу роздратованість людей шумом, створюваним БПЛА, а ніж традиційним авіаційним шумом [10]. Тому автори сконцентрувались на застосуванні основ дослідження операцій для мінімізації шумового забруднення парку БПЛА [1].

Вирішувати проблему зменшення рівня шуму автори вирішили за рахунок розподілу трафіку. Для подолання проблем, пов'язаних зі стандартною транспортною задачею, дослідники використовують лінійні маршрути сегментів. Для подолання проблем, пов'язаних з доцільністю обчислень у великих просторах пошуку, вони обрали алгоритм Імітованого відпалу (Simulated annealing), де генерація маршрутів виконується в сітці (рис. 5), розмірність якої пов'язана із розміром частин міста, наприклад 20x20 кв.м. За задумом авторів кожній клітинці відповідають свої максимальна висота будівлі та рівень чутливості до шуму з врахуванням зонування (житлова, комерційна, промислова). Вони також врахували ефект маскування шуму сусідніми будівлями [9].

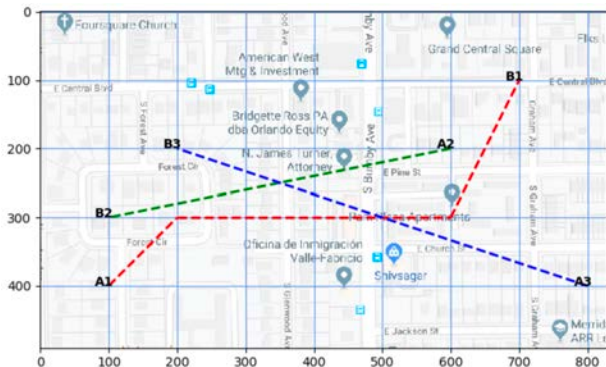


Рис. 5. Карта міста розділена на квадрати (за Скоззаро Дж., Делагай Д. та Вела А. Е.) [9]

Для генерації нового маршруту, що зменшуватиме рівень шуму відносно основного, автори використали алгоритм Єна [11], який дозволяє перерахувати k-найкоротші шляхи між двома точками і, таким чином, підрахувати всі шляхи між двома точками. Оптимізацію своєї моделі автори виконали шляхом обрання оптимального шляху із запропонованих алгоритмом Єна варіантів з врахуванням порогу допустимого рівня шуму (55dB), а також з використанням вагового коефіцієнту для балансування впливу шуму та енерговитрат. Автори зазначають, що задача оптимізації є NP складною, й пропонують використати мета-евристику для її вирішення, а саме метод Імітованого відпалу. Науковці відзначають його перевагу – можливість ретельно дослідити простір станів, за рахунок прийняття переходів, що погіршу-

ють ціль. Це означає, що у результаті може бути побудований такий компромісний маршрут, на певних ділянках якого буде перевищений шумовий поріг, але в цілому загальна кількість шуму буде найменша з усіх варіантів. У реалізації свого алгоритму автори використовують метод активного видалення існуючих траєкторій та введення нових, з обов'язковим перерахунком шумового сліду після кожної такої операції та оновленням показників ефективності для всіх рішень. Цей принцип узагальнено на рис. 6 [9].

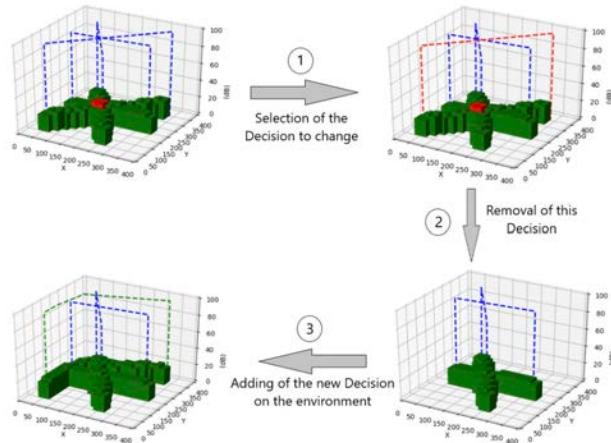


Рис. 6. Ілюстрація оптимізації (за Скоззаро Дж., Делагай Д. та Вела А. Е.) [9]

Хоча в роботі [9] не враховано багато параметрів, таких як: час, оцінка шумового роздратування, колізії БПЛА, проте виконана авторами симуляція показала можливість зменшення рівня шумового забруднення до значення нижче порогового (55dB) до 99,1% випадків [9].

Висновки. У статті зроблено огляд досліджень щодо системи побудови маршрутів дронів з врахуванням різних потреб і задач, які іноді можуть бути досить суперечливими, відповідно вимагають індивідуальних алгоритмів вирішення. У той же час результати деяких досліджень можуть бути поєднані для досягнення комплексного ефекту. В роботі було розглянуто алгоритми розширення зони доставки дронами за допомогою системи громадського транспорту, комбінованої доставки вантажівкою та дроном, побудови маршрутів наземного моніторингу інфраструктури та сільського господарства, забезпечення максимального огляду місцевості камерою дрону, зміни формування групи дронів для зменшення використання енергії, мінімізації шумового забруднення безпілотними літальними апаратами. Для більшості озвучених задач існують рішення, що можуть бути використані практично. Проте, досі є зони для додаткових досліджень, оскільки ряд вхідних параметрів не було враховано взагалі або враховано за спрощеними методами.

Перспективами подальших досліджень є: оптимізація розміщення складів та депо у багатоагентних системах; розширення можливостей використання транзитних мереж при доставці дронами за допомогою залучення нових видів транспорту; винахід нових формувань дронів та оцінка їх впливу на споживання енергії та швидкість руху; вдосконалення існуючих алгоритмів планування маршрутів, що базуються на використанні сенсорів дрона; оцінка рівня шуму у реальних умовах міста та проведення експериментів на людях для визначення рівня шумового роздратування;

пошук нових конструкцій дронів з метою зменшення рівня створюваного шуму; покращення алгоритмів побудови маршрутів руху дрона у парі з вантажівкою, а саме врахування невизначеності, наприклад, швидкості вантажівок і дронів протягом усього часу доставки, часу обробки посилок в пунктах обслуговування клієнтів; розробка алгоритмів планування маршрутів таким чином, щоб якомога частіше дрони літали зграями, економлячи енергію; пошук нових областей застосування дронів, постановка задач та розробка специфічних алгоритмів, що будуть їх вирішувати.

Список літератури:

1. Efficient Large-Scale Multi-Drone Delivery using Transit Networks / S. Choudhury et al. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2021. Vol. 70. P. 757–788.
2. Optimal Route Planning for Truck–Drone Delivery Using Variable Neighborhood Tabu Search Algorithm / B. Tong et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 529.
3. Conflict-Based Search For Optimal Multi-Agent Path Finding / G. Sharon et al. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 26, no. 1. P. 563–569.
4. Carlsson J. G., Song S. Coordinated logistics with a truck and a drone. *Management science*. 2018. Vol. 64, no. 9. P. 4052–4069.
5. Google Maps Directions API. *Google Maps Platform*. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/overview>.
6. Habibbayli T. H. Formation of the quadcopter flight path under overland monitoring using neuro-fuzzy modeling methods. *Mathematical machines and systems*. 2022. Vol. 3. P. 97–107.
7. Dashkevich A., Shoman O. Method of determining the set of drone positions to cover maximum visibility of the terrain. *Modern problems of modeling*. 2020. Vol. 18. P. 99–105.
8. Drone Formation for Efficient Swarm Energy Consumption / S. Guo et al. *2023 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, Atlanta, GA, USA, 13–17 March 2023. 2023.
9. Scozzaro G., Delahaye D., Vela A. E. Noise abatement trajectories for a uav delivery fleet. *SID 2019, 9th SESAR innovation days*. 2019.
10. Christian A. W., Cabell R. Initial investigation into the psychoacoustic properties of small unmanned aerial system noise. *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Denver, Colorado. Reston, Virginia, 2017.
11. Martins E. V., Pascoal M. B. A new implementation of Yen's ranking loopless paths algorithm. *Quarterly journal of the belgian, french and italian operations research societies*. 2003. Vol. 1, no. 2.

Kucherenko O.I., Vakaliuk T.A. OVERVIEW OF RESEARCH ON THE DRONE ROUTE CONSTRUCTION SYSTEM

This article provides an overview of scientists' research on the drone route construction system depending on specific conditions and the set goal, for example, minimizing energy consumption, reducing noise, increasing the effective flight range of the drone without additional charging, minimizing flight time, etc. In the work, among other things, options for solving complex problems that do not have an exact solution are considered by scientists. Methods of optimizing the solution of problems for a large number of drones and addressees are also considered. A review of research on the drone route construction system was conducted, taking into account various needs and tasks, which can sometimes be quite contradictory, respectively, requiring individual solution algorithms. At the same time, the results of some studies can be combined to achieve a complex effect. It is important to note that the algorithms considered in the work can be conditionally divided into two groups: (1) those that must be calculated on the side of the information system for route construction and (2) by technical means directly of the unmanned aerial vehicle, for example in the case of dynamic route construction. The advantages of using neural network modeling in terms of reducing the time of operational formation of the quadcopter flight trajectory are considered. The work considered the algorithms for expanding the drone delivery area using the public transport system, combined delivery by truck and drone, building routes for ground monitoring of infrastructure and agriculture, ensuring the maximum overview of the area with a drone camera, changing the formation of a group of drones to reduce energy use, and minimizing noise pollution by drones aircraft. For most of the stated problems, there are solutions that can be used practically. However, there are still areas for additional research, as many input parameters were not taken into account at all or taken into account using simplified methods.

Key words: UAV, drone, route, cargo delivery, optimal route, logistics.