

АНОТАЦІЯ

Гац Марко Васильович. Удосконалення методики двошелонної маршрутизації вантажних автомобілів на міських поштових перевезення. – Магістерська кваліфікаційна робота. НУЗМБ ім. С.З.Гжицького, кафедра «Автомобілів і тракторів». – Львів, 2025.

Розроблено огляд відомих досліджень. Досліджено новий варіант двошелонної задачі управління міських вантажних перевезень, де вантажівки та дрони використовуються для спільної доставки всіх поштових посилок. Використано гібридний евристичний алгоритм, який об'єднує найближчого сусіда та стратегії економії коштів, щоб швидко побудувати прийнятне рішення. Змодельований алгоритм відпалу застосовано для покращення якості рішення, де для підвищення ефективності пошуку використовується список Табу. Показано, що використання спільної вантажівки та дрона для доставки посилок може значно знизити витрати на доставку порівняно з режимом лише вантажівкою. У багатьох випадках вартість режиму вантажівка-дрон навіть удвічі менша, ніж у вантажівці. Крім того, оператори сусідства також виявилися ефективним методом локальної оптимізації, і в більшості випадків витрати на початкове рішення, отримане генетичним алгоритмом, знижуються за допомогою аеродоставкою більш ніж на 30%. Випадкові екземпляри в різних масштабах використовуються для перевірки продуктивності запропонованого алгоритму. Натурний експеримент побудований на основі практичної дорожньої мережі та клієнтських вузлів відділень «Нової пошти» у м. Київ, який використовується для аналізу чутливості. Крім того, належне вдосконалення технологій для збільшення ємності корисного навантаження дрона та заряду батареї допоможе заощадити на доставці.

Ключові слова: двошелонна маршрутизація; маршрут транспортного засобу; вантажівка та дрон; евристичний; імітований алгоритм відпалу

ABSTRACT

Gats Marko Vasilyovich. Improving the methodology of two-echelon routing of trucks for urban postal transportation. – Master's qualification work. NUZMB named after S.Z. Gzhytsky, Department of "Automobiles and Tractors". – Lviv, 2025.

A review of known research is developed. A new version of the two-echelon urban freight transportation management problem is investigated, where trucks and drones are used to jointly deliver all postal parcels. A hybrid heuristic algorithm is used that combines the nearest neighbor and cost-saving strategies to quickly build an acceptable solution. A simulated annealing algorithm is applied to improve the quality of the solution, where a Tabu list is used to increase the search efficiency. It is shown that the use of a joint truck and drone for parcel delivery can significantly reduce delivery costs compared to the truck-only mode. In many cases, the cost of the truck-drone mode is even half that of the truck. In addition, neighborhood operators have also been shown to be an effective local optimization method, and in most cases, the cost of the initial solution obtained by the genetic algorithm is reduced by more than 30% using air delivery. Random instances at different scales are used to verify the performance of the proposed algorithm. A full-scale experiment is built on the basis of a practical road network and client nodes of Nova Poshta branches in Kyiv, which is used for sensitivity analysis. In addition, proper improvement of technologies to increase the payload capacity of the drone and battery charge will help save on delivery.

Keywords: two-echelon routing; vehicle route; truck and drone; heuristic; simulated annealing algorithm

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ВАНТАЖНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ В ЛІТЕРАТУРІ І НА ПРАКТИЦІ	8
1.1 Опис проблеми	8
1.2 Огляд літературних джерел	12
1.3 Висновок	19
2 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ДВОХЕШЕЛОННОЮ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЮ СИСТЕМОЮ	21
2.1 Опис проблеми та розробка моделі	21
2.2 Опис проблеми	23
2.3 Розробка моделі керування	28
2.4 Рішення	32
2.5 Алгоритм моделювання	37
2.6 Комп'ютерні експерименти та результати	43
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА	49
3.1 Опис умов проведення експерименту	49
3.2 Представлення результатів	50
3.3 Висновки	55
4 ПІДСТАВИ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБКИ	57
4.1 Загальні підходи і основні методи вирішення задач керування і їх порівняльні оцінки	57
4.2 Досвід керування у світі	61
ВИСНОВКИ	63
ЛІТЕРАТУРА	66

ВСТУП

Галузь вантажних автомобільних перевезень є основним джерелом зайнятості та підтримує економічний розвиток країни. Однак вантажні перевезення також викликають занепокоєння через затори та негативні навіколишні умови, що негативно впливає на якість життя, зокрема в міських районах. У вантажних перевезеннях існують дві основні стратегії розподілу: пряме перевезення та багатоешелонний розподіл. У прямій доставці транспортні засоби, починаючи зі складу, транспортують вантаж безпосередньо до клієнтів, тоді як у багатоешелонних системах вантаж доставляється з депо до клієнтів через проміжні точки. Зростання обсягу вантажних перевезень, а також необхідність брати до уваги такі фактори, як вплив на навіколишнє середовище та затори на дорозі, призвело до того, що дослідження в останні роки зосередилися на багатоешелонних системах розподілу, і, зокрема, двоешелонних системах. У двоешелонних системах розподілу вантажі доставляються в проміжне депо, а з цього депо - клієнтам. Багаторівневі системи, представлені в літературі, зазвичай явно розглядають проблему маршрутизації на останньому рівні транспортної системи, тоді як на вищих рівнях розглядають спрощену задачу маршрутизації.

У зв'язку з цим ця тема є актуальною, оскільки містить у собі нові задачі, які приводять до вищого рівня ефективності автомобільних перевезень.

Мета роботи – зменшити витрати на транспортування вантажів на розвізних маршрутах

Предмет дослідження – залежність вантажообігу від конфігурації двохешелонних маршрутів.

Об'єкт дослідження – процеси двохешелонної доставки вантажів.

Методи дослідження – евристичний метод «відпалу», статистичних досліджень, аналізу та синтезу.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ВАНТАЖНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ В ЛІТЕРАТУРІ І НА ПРАКТИЦІ

1.1 Опис проблеми

Протягом багатьох років повний розквіт електронної комерції стимулював швидку доставку до стрімкого зростання. Очікується, що він розповсюджуватиме товари з коротшими термінами доставки та нижчою вартістю кур'єрської доставки, що вирішить багато проблем із доставкою «останньої милі». Традиційне розповсюдження на основі наземних транспортних засобів навряд чи може задовольнити потреби клієнтів у скороченні термінів доставки, оскільки вони очікують отримати свої вантажі через один-два дні після виконання онлайн-замовлень. Транспортні засоби наземної доставки обмежені наявною інфраструктурою та географічними перешкодами, такими як дороги та річки, що значно збільшить час доставки та експлуатаційні витрати. Велика кількість наземних транспортних засобів призводить до забруднення атмосфери та заторів у містах, що, безумовно, суперечить бажанню суспільства щодо захисту навколишнього середовища. Ці проблеми спонукають багатьох дослідників шукати більш ефективні шляхи доставки і, таким чином, проявляти великий інтерес до доставки дронами [1].

Доставка за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або дронів стала можливою завдяки стрімкому розвитку технологій автоматизації та штучного інтелекту. Загалом безпілотники можуть значно скоротити вартість і час доставки, оскільки вони можуть летіти безпосередньо до одержувачів, менш заблоковані перешкодами та не враховуючи умов руху на землі. Крім того, дрони є більш екологічно чистими з меншим енергоспоживанням і меншим забрудненням повітря. Таким чином, усвідомлюючи ці переваги, багато компаній дослідили проблеми доставки дронами. На додаток до кількох перших компаній, які застосовували БПЛА, таких як Amazon, DHL і Google [26], JD також випробував доставку

безпілотниками в кількох провінціях Китаю. Alibaba Group і Baidu також використовують коптер посилок для вивезення. Однак, залежно від характеристик безпілотників, доставка безпілотником усім клієнтам може бути не оптимальною. Обмежені коротким терміном служби та низькою вантажопідйомністю, дрони мають обмежений час польоту та можуть перевозити лише невеликі пакунки.

Враховуючи ці практичні труднощі, як вантажівок, так і безпілотники мають власні обмеження та переваги, які підсумовано в таблиці 1.1. Тим не менш, якщо вони працюють разом, є кілька переваг через їх сильну взаємодоповнюваність. В першу чергу, збільшується ефективна дальність доставки дрона, коли наземний транспорт виконує роль рухомого депо для транспортування дрона. Завдяки більшій відстані подорожі та більшій вантажопідйомності наземні транспортні засоби можуть виконувати подвійну роль як мобільного депо та ресурсу доставки. Крім того, дрони менш обмежені наземним трафіком і можуть працювати краще в деяких місцях, важкодоступних для вантажівок, наприклад у деяких місцях із заторами або незручними місцями. Враховуючи ці практичні труднощі, як вантажівок, так і безпілотники мають власні обмеження та переваги, які підсумовано в таблиці 1. Тим не менш, якщо вони працюють разом, є кілька переваг через їх сильну взаємодоповнюваність. В першу чергу, збільшується ефективна дальність доставки дрона, коли наземний транспорт виконує роль рухомого депо для транспортування дрона. Завдяки більшій відстані подорожі та більшій вантажопідйомності наземні транспортні засоби можуть виконувати подвійну роль як мобільного депо та ресурсу доставки. Крім того, дрони менш обмежені наземним трафіком і можуть працювати краще в деяких місцях, важкодоступних для вантажівок, наприклад у місцях із заторами або незручним транспортом. Що стосується недовговічності дрона, його можна використовувати повторно із заміною батареї або підзарядкою на наземній техніці. Таким чином, поєднання безпілотника та вантажівок обіцяло райдужну перспективу. Деякі компанії застосували цей цікавий підхід.

Mercedes-Benz випустив концептуальний автомобіль під назвою «Vision Van» у вересні 2016 року [28]. Оснащений повністю автоматизованою системою завантаження вантажів, цей фургон розгортає безпілотник доставки, щоб швидко доставляти посилки клієнтам. Як описано, це може значно скоротити час доставки та підвищити ефективність. Крім того, UPS також розробляє проект під назвою «Остання миля» для розміщення БПЛА на мобільній вантажівці, і в лютому 2017 року було проведено пробний запуск у Флориді [13].

Таблиця 1.1 – Порівняння дрона та наземного транспортного засобу для доставки

	Дрони	Наземний транспорт
Вантажопідйомність	Малий	Висока
Діапазон витривалості	Короткий	Безлімітний
Вартість за кілометр	Низька	Висока
Викиди вуглецю	Низькі	Високі
Трафік	Без впливу	Затор на дорогах
Шлях	Прямий на повітрі	Уздовж дорожньої мережі

Була проведена новаторська робота з дослідження проблеми доставки посилок за допомогою спільної вантажівки та дрона [26]. У цих роботах вивчалася проблема сумісного маршрутизації через розширення класичної проблеми комівояжера, а також припускалося, що безпілотник може прийняти лише одну посылку в кожному польоті. Однак дрон може перевозити кілька невеликих посилок і завершити їх доставку за один політ, як показало дослідження [17]. Коли дрон може прийняти кілька посилок, проблема маршрутизації для спільної вантажівки та безпілотника стає новим варіантом проблеми маршрутизації в два ешелони, як показано на рис. 1.1, у якому стикаються нові виклики.

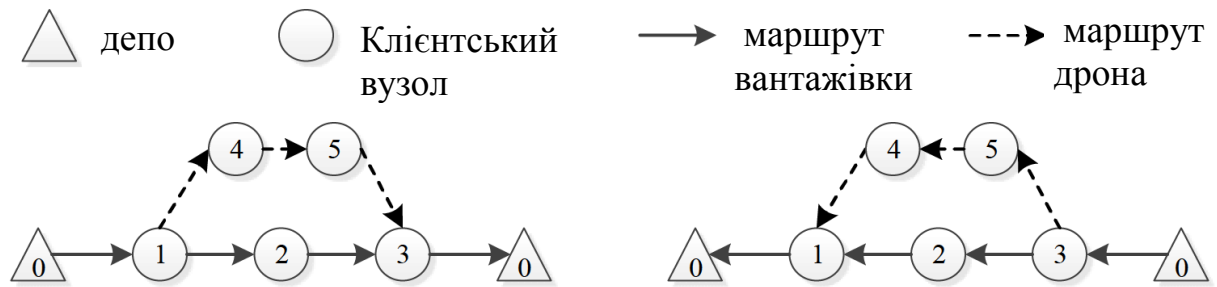


Рисунок 1.1 – Два рішення з різними напрямками для прикладу з п'ятьма клієнтськими вузлами

У задачі двоступеневої маршрутизації для вантажівки та безпілотної (2E-RP-T&D) зазвичай передбачається, що безпілотною може злетіти та приземлитися на вантажівку в будь-якому вузлі клієнта, де зупиняється вантажівка [20]. Крім того, другий ешелонний маршрут безпілотної відкритий, що відрізняється від звичайних двоешелонних завдань. Обидві відмінні риси ускладнюють проблему.

У процесі доставки посилок дроном, який перевозить кілька посилок, слід враховувати не лише вантажопідйомність і витривалість, але також процес споживання енергії батареєю дрона [15]. Рівень споживання енергії є кусково функцією в залежності від послідовності доставки посилок, і споживана енергія сильно відрізняється навіть для двох маршрутів однакової довжини в різних напрямках. Наприклад, на рис. 1.1, якщо пакунок Клієнта 4 важчий, ніж пакет Клієнта 5, дрону краще спочатку обслуговувати Клієнта 4, щоб розвантажити важкий вантаж. Однак, коли дрон рухається в протилежному напрямку, важкий корисний вантаж споживатиме більше енергії на маршруті 3→5→4, що спричинить більші витрати. Таким чином, враховуючи спрямованість шляхів, простір пошуку 2E-RP-T&D додатково розширюється порівняно з традиційними проблемами маршрутизації з двома ешелонами.

Вивчаючи нову задачу маршрутизації двох ешелонів для спільної вантажівки та безпілотної, спонукаючи як адаптацію нових технологій та

засобів доставки (безпілотник) у практичну транспортну галузь, так і наявну теоретичну прогалину в поточній літературі [10, 24, 32]. Наскільки нам відомо, це перший випадок, коли досліджується проблема спільного маршрутизації вантажівки та дрона, враховуючи такі два аспекти: (1) дрон може доставляти кілька посилок за одним маршрутом польоту та (2) ефект варіювання враховується корисне навантаження на споживання енергії. Для формулювання проблеми пропонується двоетапний підхід моделювання на основі маршруту, де оптимізуються маршрути для вантажівки та дрона. Через складність проблеми розроблено гібридну евристику за допомогою інтеграції найближчого сусіда та стратегії економії коштів, щоб побудувати можливе рішення за короткий час, а також пропонується моделювання алгоритму відпалу в поєднанні зі списком Табу для подальшого покращення якості рішення. Для перевірки запропонованих алгоритмів використовуються як випадкові випадки, так і практичні випадки, а результати обчислень показують, що наш підхід може ефективно вирішити проблему.

1.2 Огляд літературних джерел

У розподілі вантажів існують різні стратегії розподілу. Найбільш розвинена стратегія заснована на прямій доставці: вантаж починається зі складу і надходить безпосередньо до клієнтів [4]. У багатьох додатках ця стратегія не є найкращою, і використання двошелонної системи розподілу може оптимізувати кілька характеристик, таких як кількість транспортних засобів, витрати на транспортування та їх коефіцієнт завантаження. У літературі багаторівневі системи, і зокрема двоступеневі системи, стосуються головним чином проблем ланцюга постачання та запасів [3,24,25]. Ці проблеми не використовують явний підхід до маршрутизації для різних рівнів, а більше зосереджуються на питаннях управління виробництвом і ланцюгом поставок. Деякі дослідження стосуються розташування проміжних об'єктів для багатоешелонних систем розподілу [6]. Інше реальне застосування дворівневої розподільчої мережі належить Крейніку, Ріккарді та

Сторкі та пов'язане з логістикою міста [22]. Вони розробили дворівневу систему розподілу вантажів для перевантажених міських районів, використовуючи невеликі проміжні платформи, які називаються безпілотниками, як проміжні точки для розподілу вантажів. Ця система розроблена для конкретного прикладу, і узагальнення такої системи ще не сформульовано. Маршрутизація транспортних засобів стала центральною проблемою у сфері логістики та вантажних перевезень. У деяких секторах ринку транспортні витрати становлять значний відсоток доданої вартості товарів.

Основна відмінність полягає в тому, що це відповідає більш тактичному плануванню, оскільки відомі лише потенційні місця для складів або безпілотників, а використання будь-якого місця призводить до витрат на відкриття. На відміну від 2EVRP, розмір автопарку необмежений, але постійні витрати враховуються для використання кожного автомобіля. Класичні набори порівняльних показників із літератури включають різні витрати на милю для великих вантажівок першого рівня та невеликих міських вантажівок, на відміну від порівняльних випадків 2EVRP, де вартість пробігу однакова для всіх транспортних засобів. Нарешті, розділені поставки не допускаються на обох рівнях. Таким чином, ми застосували наш алгоритм до екземплярів 2ELRPSD, де рішення про місцезнаходження потрібно приймати на вторинних об'єктах. Дотримуючись нотацій [5] ми зосереджуємося на проблемах 3/T/T.

Автори [7] були одними з перших, хто представив задачу оптимізації двоступеневого розподілу. Вони запропонували триетапну евристику для вирішення щоденного розповсюдження газет у Данії, але математичної моделі розроблено не було. Було розглянуто кілька можливих пунктів передачі газет з одного автомобіля в інший. Рішення цієї проблеми складається з трьох рівнів рішень: кількість і розташування пунктів передачі, тури від друкарні та тури від пунктів передачі до роздрібних продавців. Удосконалений алгоритм вирішення цієї ж проблеми можна знайти в роботі

[32]. Дотримуючись номенклатури авторів і класифікації в останньому дослідженні проблем маршрутизації двох [17], проблема включає рішення щодо розташування. Тим не менш, із сьогоденної точки зору, її не можна класифікувати як проблему двоступеневої маршрутизації розташування (2ELRP), оскільки немає жодних витрат на відкриття, пов'язаних із використанням проміжних засобів, і роздрібні торговці також можуть обслуговуватися безпосередньо з друкарні без використання проміжних засобів. вузлів. Крім того, проблему не можна класифікувати як 2EVRP, оскільки розділені поставки першого рівня не дозволені.

Двоешелонна проблема маршрутизації транспортних засобів [6] використовували дані для вивчення інтегрованої міської системи управління вантажними перевезеннями. Оскільки великі вантажівки не можуть проїхати вузькими вулицями в центрі міста, вони використовували проміжні засоби для перерозподілу навантаження з великих вантажівок на менші транспортні засоби. Місто було поділено на кілька комерційних і зовнішніх зон, а також було запропоновано математичне формулювання розміщення та розв'язано за допомогою комерційного розв'язувача. Порівняння рішень для доставки вантажів дозволяє зробити висновок, що проміжні об'єкти значно скорочують використання великих вантажівок, а більше роботи виконують менші міські вантажні перевізники. У роботі [9] дослідники сформулювали залежну від часу версію проблеми, включаючи часові вікна у клієнтів. Наскільки нам відомо, для цього варіанту поки що немає тестових екземплярів або підходів до вирішення. Автори [11] досліджували вплив різних дворівневих транспортних систем на загальну вартість. Згідно з їхніми результатами, 2EVRP може давати кращі рішення, ніж VRP, якщо депо розташоване не в межах клієнтської зони, а зовні. Автор [32] запровадив математичне формулювання на основі потоку та створив три набори екземплярів для 2EVRP із максимум 50 клієнтами та чотирма безпілотниками на основі екземплярів VRP. Їхній комплексний підхід дозволяє оптимально вирішувати випадки з 4 до 21 клієнтів. Автори [31] розв'язали додаткові випадки та

зменшили розрив оптимальності на інших за допомогою нових правил розрізання. дослідники [13] розв'язали 2EVRP за допомогою багатопускової евристики. Метод спочатку призначає клієнтів до безпілотників евристично, а потім розв'язує решту VRP точним методом. На етапі збурення призначення клієнтів до безпілотників змінюється, потім проблема вирішується знову, доки не буде досягнуто певної кількості ітерацій. У роботі [16] дослідники представили метод розгалуження та розрізання, розв'язавши 47 із 93 тестових екземплярів до оптимальності, 34 із них – уперше. Автори були першими, хто розглянув обмеження на кількість транспортних засобів на супутник, хоча це вже було зазначено раніше в існуючому наборі даних. Це додаткове обмеження не було враховано в попередніх публікаціях. Автори [20] розробили метаевристику, засновану на адаптивному пошуку великого сусідства (ALNS) з різними дванадцятьма операторами знищення та відновлення. Цей підхід має тенденцію віддавати перевагу точності (високоякісні рішення) над простотою та гнучкістю. Автори також представили нові більші тестові екземпляри до 200 клієнтів і п'ятьмадесятьма безпілотниками. Результати ALNS на прикладах проблеми з 50 клієнтами не можна порівняти з перевіреними оптимальними рішеннями [33], оскільки алгоритм не враховує обмеження на кількість транспортних засобів на супутник, а радше обмеження на загальну кількість транспортних засобів.

В нашій магістерській роботі ми розглядаємо розподільчу мережу з двох ешелонів, що складається з трьох непересічних наборів вершин, що відповідають потенційним місцям розташування складів (тобто джерел), потенційним місцям розташування безпілотників (тобто проміжних об'єктів) і споживачам (тобто пунктам призначення), відповідно. Клієнти знаходяться у відомих і фіксованих місцях. З іншого боку, місце розташування складів і безпілотників для використання не визначено апріорі. Для зрозумілості викладу в цьому розділі ми називаємо потенційні місця розташування депо (сателітів) скорочено депо (сателітами) [12]. Ми висвітлимо випадки, коли рішення про місцезнаходження депо чи безпілотників не беруть участі.

Вищезазначену мережу розподілу можна розкласти на два ешелони. Перший ешелон включає зв'язки між складами та безпілотниками, а також зв'язки між парами безпілотників. Другий ешелон з'єднує безпілотники і клієнтів, а також включає зв'язки між парами клієнтів. Вартість відкриття пов'язана з кожним депо та кожним супутником. Для кожного клієнта, якого необхідно обслуговувати наявним вантажем в одному або кількох складах, надається заявка. В обов'язковому порядку вантаж повинен доставлятися клієнтам через безпілотники. Уздовж розподільчої мережі вантажні перевезення здійснюються двома різними парками транспортних засобів, по одному в кожному ешелоні. Транспортні засоби, що належать до першого ешелону, називаються основними транспортними засобами, тоді як транспортні засоби другого ешелону називаються вторинними. Метою 2E-LRP є визначення місцезнаходження кількох складів та/або безпілотників серед потенційних місць і визначення набору маршрутів доставки в обох ешелонах таким чином, щоб загальна вартість системи була мінімізована. Далі ми класифікуємо 2E-LRP відповідно до позначення, введеного в роботі [15] і пізніше модифікованого [17], щоб чітко розглянути рішення щодо розташування. Зокрема, в роботі [21] автор вводить наступне позначення для синтетичного представлення задач маршрутизації багаторівневого розташування: $\lambda/M_1/\dots/M_\lambda-1$, де λ – кількість етапів, а M_i – тип режиму розподілу між етапами i та $i + 1$. Якщо між етапами i та $i + 1$ дозволені лише зворотні подорожі (тобто подорожі до та з однієї вершини), тоді $M_i = R$. Якщо подорожі, що залишають етап i , можуть бути маршрутами (тобто подорожі через декілька вершин), тоді $M_i = T$. В роботі [24] пропонують позначати накладною лінією ідентифікатор режиму розподілу (тобто R або T), якщо рішення про місцезнаходження потрібно приймати на етапі i . Враховуючи цю нотацію, ми розглядаємо як 2E-LRP проблеми $3/T/T$, $3/T/T$ і $3/T/T$, тобто проблеми, де маршрути можуть бути присутніми в обох ешелонах, і рішення щодо розташування повинні прийматися щонайменше протягом один ешелон. Ми підкреслюємо, що кілька авторів наприклад, [21] називають 2E-LRP

проблемою, коли маршрути не дозволені на першому ешелоні. Ці документи не розглядаються в цьому опитуванні. Якщо рішення щодо розташування не потрібно приймати для жодного ешелону, проблема зводиться до 2E-VRP, проаналізованої в розділі 3 і відповідній проблемі 3/T/T.

Завдяки високій ефективності та низькій вартості останніми роками дрон відкриває величезні можливості для застосування в різних галузях промисловості. Одним із застосувань є доставка посилок, яка досліджувалась у багатьох дослідженнях. Сундар і Ратінам [30] розглядають проблему маршрутизації одного дрона з кількома складами, доступними для дозаправки дрона, і мінімізують загальне паливо, необхідне дрону для відвідування всіх цілей []. Сан та ін. (2016) пропонують кроки реалізації призначення кількох дронів для ефективної доставки предметів у цільові місця. Фактичне функціонування автономних пологів спрощено, і для вирішення проблеми запропоновано генетичний алгоритм. Існує також дослідження автоматизованої системи доставки безпілотниками [14], у якій дрони можуть піднімати кілька пакетів у зоні обслуговування заданого радіуса.

Числовий аналіз використовується для мінімізації загальних витрат шляхом вивчення зв'язку між чотирма параметрами: період роботи, швидкість дрона, щільність попиту в зоні обслуговування та ємність батареї. Крім того, Хем [20] розглядає кілька транспортних засобів і часові вікна, чис дослідження розширює проблему, враховуючи, що безпілотник може або летіти назад до депо для наступної доставки, або летіти безпосередньо до іншого клієнта для отримання.

Що стосується військового застосування, безпілотні бойові літальні апарати вважаються для знищення заздалегідь визначених цілей боєприпасами, які мають обмеження нижньої та верхньої межі (Shetty, et al., 2008). Крім того, безпілотники можуть збирати розвідувальну інформацію з набору відомих цілей після оснащення датчиками. Авеллар та ін. [12] вирішують проблему мінімального часового охоплення наземних ділянок за допомогою групи дронів, оснащених датчиками зображення.

Проблема постійної розвідки, спостереження та розвідки (PISR) також розглядається шляхом мінімізації часу доставки зібраних даних на станцію керування [25].

У зазначених вище роботах витривалість встановлюється як фіксована величина. Однак, виходячи з реальної ситуації, не слід ігнорувати вплив ваги корисного вантажу на енергоспоживання дрона під час польоту. У кількох дослідженнях згадується зв'язок між витривалістю та вагою корисного навантаження. Муфаллі та ін. [25] розглядають місію спостереження, в якій доступний час польоту буде зменшено після приєднання датчика.

Дорлінг та ін. [17] пропонують два варіанти проблеми маршрутизації транспортного засобу (VRP) для доставки дроном.

Розраховане за допомогою функції лінійної апроксимації споживання енергії змінюється лінійно залежно від корисного навантаження та ваги акумулятора. Крім того, Сонг та ін. [29] в основному зосереджені на характеристиках логістичної системи БПЛА та обговорюють вплив ваги вантажу на здатність до польоту. Однак у цих задачах для доставки застосовуються лише дрони, а вантажівка не включається.

Оскільки поєднання безпілотної та вантажівки може значно підвищити ефективність доставки, ми знаємо про деякі роботи, які досліджують цю проблему. Мюррей і Чу [26] представили проблему, «Проблему комівояжера, що летить» (FSTSP), яка пропонує формулювання змішаного цілочисельного лінійного програмування та евристику. У деталях евристика базується на ідеї «Спочатку вантажівка, потім дрон», згідно з якою вони спочатку будують маршрут лише для вантажівок і періодично замінюють вузли вантажівок на вузли дронів, щоб зменшити об'єктивну цінність. Останнім часом цю проблему також вирішують деякі евристики змінного сусідства [24], які працюють набагато краще на великомасштабних екземплярах. Існує також дещо інша проблема — «Проблема комівояжера з дроном» (TSP-D) [11], у якій безпілотною має рухатися тією ж мережею доріг, що й вантажівка. Ця проблема також моделюється як формулювання MILP і

вирішується за допомогою евристики на основі локального пошуку. Крім того, досліджуються деякі варіанти цієї проблеми. На (2018) вводиться проміжок часу в TSP-D, який дрон і вантажівка можуть чекати один одного з обмеженим часом очікування. Крім того, розроблено дві евристики двох концепцій: «Спочатку дрон, потім вантажівка» (DFTS) і «Спочатку вантажівка, потім дрон» (TFDS). На відміну від попередньої статті з метою мінімізації вартості, в іншій публікації автор також намагався скоротити загальний час [21]. Однак у цих роботах на кожному маршруті польоту на дрон може бути розміщена лише одна посилка клієнта.

Співпраця між дроном і вантажівкою також широко використовується для спостереження та картографування.

Існує дослідження з використанням спільного повітряного та наземного спостереження, в якому запропоновано структуру та алгоритм для пошуку та локалізації [17]. Крім того, з обмеженням паливної ємності БПЛА Maini et al. [25] розглядають безпілотний наземний транспортний засіб з дозаправкою (UGV) для успішного виконання місії. Савуран і Каракая (2015) пропонують метод оптимізації маршруту для БПЛА, що запускається авіаносцем. У цій задачі БПЛА відвідує цілі для виконання місії, тоді як носій продовжує рухатися за власним маршрутом. Крім того, досліджується подібна проблема маршрутизації [24], і відмінність полягає в тому, що GV рухається по дорожній мережі, тоді як його БПЛА відвідує цілі за дорогою. Хоча всі ці проблеми досліджують проблему маршрутизації в поєднанні вантажівок і дронів, корисне навантаження дрона залишається незмінним під час відвідування кількох цілей одним маршрутом, у якому зв'язок між корисним навантаженням і споживанням енергії не буде залучений.

1.3 Висновок

З наведеного вище огляду ми бачимо, що новий варіант класичної проблеми маршрутизації транспортного засобу не досліджувався, а це проблема маршрутизації двох ешелонів для спільної вантажівки та дрона,

особливо коли кілька посилок можуть бути доставлені одним маршрутом польоту дрона та розглядається вплив змінного корисного навантаження на споживання енергії. Тому ця нова проблема вивчається в даній статті. Проаналізовано модель енергоспоживання дрона під час доставки посилок, і в наступному розділі розроблено математичну модель для оптимізації маршрутів як вантажівки, так і дрона.

2 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ДВОХЕШЕЛОННОЮ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЮ СИСТЕМОЮ

2.1 Опис проблеми та розробка моделі

2.1.1 Визначення та позначення. Щоб полегшити формулювання моделі, спочатку вводяться такі визначення.

Направлений головний маршрут – це замкнутий шлях, який проходить вантажівка, починаючи від депо для відвідування деяких вузлів клієнтів і повертаючись до депо, напр. $(0,1,2,3,0)$, показано на рис. 2.1(a).

Спрямований підмаршрут — це відрізок орієнтованого основного маршруту. Наприклад, у орієнтованому головному маршруті $(0,1,2,3,0)$ на рис.2.2a є десять орієнтованих підмаршрутів, які є $(0,1)$, $(1,2)$, $(2, 3)$, $(3,0)$, $(0,1,2)$, $(1,2,3)$, $(2,3,0)$, $(0,1,2,3)$, $(1,2,3, 0)$ і $(0,1,2,3,0)$.

Суміжний підмаршрут — це спрямований шлях, що включає один або кілька клієнтських вузлів, які може відвідати дрон, коли вантажівка рухається відповідним підмаршрутом. Наприклад, на рис.2.1a $(1,4,5,3)$ є суміжним підмаршрутом спрямованого підмаршруту $(1,2,3)$, що означає, що дрон злітає з вантажівки у вузлі 1, проводить завдання доставки вузлів 4 і 5, а потім повертається до вантажівки у вузлі 3. Крім того, підмаршрути $(1,4,3)$ і $(1,5,3)$ також є потенційними суміжними підмаршрутами спрямованого підмаршруту $(1,2,3)$.

Позначення, які використовуються в описі проблеми та розробці моделі, представлені наступним чином.

Набори:

G – неорієнтований граф, на якому задана задача;

N – множина вершин;

E – множина всіх дуг;

$V_0 = \{0\}$ – депо;

$V = \{1, 2, \dots, n\}$, множина всіх клієнтських вузлів;

R – набір спрямованих основних маршрутів, якими може проїхати вантажівка;

E_r – множина дуг, що входять до маршруту r , де $r \in R$;

S_r – множина спрямованих підмаршрутів, що входять до маршруту r , де $r \in R$;

V_r – набір клієнтських вузлів, які відвідує вантажівка на маршруті r , де $r \in R$ і $V_r \in V$;

V'_r – для вантажівки вибирається набір клієнтських вузлів, які має відвідати безпілотник за направленням головного маршруту r , де $r \in R$ і $V'_r = V/V_r$;

E_{rl} – множина дуг, які входять до спрямованого підмаршруту l основного маршруту r , де $l \in S_r$ і $r \in R$;

R_{rl} – набір суміжних підмаршрутів, якими може проїхати дрон, коли вантажівка рухається підмаршрутом l основного маршруту r , де $l \in S_r$ і $r \in R$;

V_{rlm} – набір клієнтських вузлів, які відвідує дрон у суміжному підмаршруті m , що відповідає спрямованому підмаршруту l основного маршруту r , де $m \in R_{rl}$, $l \in S_r$ і $r \in R$.

Параметри:

w_i – вага доставки, яку необхідно доставити клієнтам i , де $i \in V$;

d_{ij}^1 – відстань, яку проїхала вантажівка між будь-якими двома клієнтами (або клієнтами та депо) i та j , де $i, j \in V_0 \in V$;

d_{ij}^2 – відстань польоту дрона між будь-якими двома клієнтами (або клієнтами та депо) i та j , де $i, j \in V_0 \in V$;

ρ_1 – одиниця вартості проїзду за кілометр вантажівки, грн.;

ρ_2 – вартість одиниці польоту за кіловат-годину дрона грн.;

w_d – маса дрона, кг;

WH – максимальне корисне навантаження дрона, кг;

D – максимальна ємність акумулятора дрона;

P – максимальна потужність польоту дрона;

T_H – максимальний час витривалості дрона;

G_i – корисне навантаження дрона, коли він залишає клієнта (або депо) i , де $i \in V_0 \cap V$;

v_{ij} – швидкість польоту дрона, коли дрон залишає замовника (або депо) i до замовника (або депо) j , де $i, j \in V_0 \cup V$;

c_{ij}^T – вартість подорожі вантажівки від клієнта i до клієнта j ;

c_r – вартість проїзду вантажівки прямим маршрутом r , де $r \in R$;

c_{rlm} – вартість подорожі дрона суміжним підмаршрутом m , що відповідає спрямованому підмаршруту l основного маршруту r , де $m \in R_{rl}$, $l \in S_r$ і $r \in R$;

$a_{ijrl} = 1$ якщо дуга $(i, j) \in E_{rl}$, 0 інакше, де $i, j \in V_r'$, $l \in S_r$ і $r \in R$;

$b_{irlm} = 1$, якщо $i \in V_{rlm}$, 0 в іншому випадку, де $i \in V_r'$, $m \in R_{rl}$, $l \in S_r$ і $r \in R$;

Змінні:

$x_r = 1$, якщо для вантажівки вибрано спрямований головний маршрут r , $x_r = 0$ інакше, де $r \in R$;

$y_{rlm} = 1$, якщо для дрона вибрано суміжний підмаршрут m , який відповідає спрямованому підмаршруту l у спрямованому головному маршруті r , 0 в іншому випадку, де $m \in R_{rl}$, $l \in S_r$ і $r \in R$.

2.2 Опис проблеми

2.2.1 Формулювання проблеми. У задачі маршрутизації двох ешелонів для вантажівки та безпілотної (2E-RP-T&D) передбачається, що місткості вантажівки завжди достатньо для всіх вантажів, і тому її можна розглядати як достатню. Вантажопідйомність дрона обмежена та відома. Задача спрямована на пошук оптимального спрямованого основного маршруту вантажівки та набору спрямованих прилеглих підмаршрутів дрона для завершення доставки всіх вантажів, при цьому не порушуються обмеження вантажоемності дрона щодо корисного навантаження та його акумулятора.

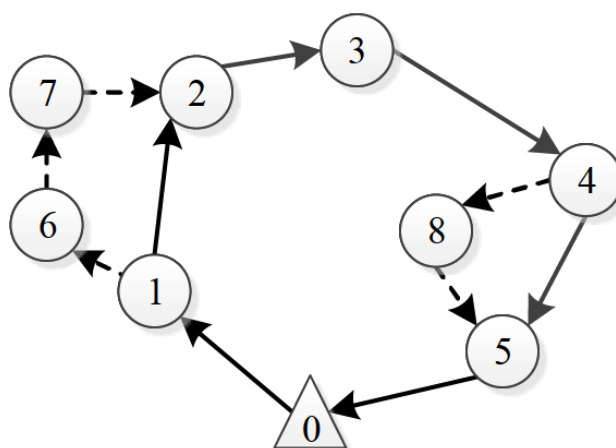


Рисунок 2.1 – Ілюстрація рішення для прикладу 2E-RP-T&D

Вантажівка стартує з депо, забираючи всі посилки та дрон. Вантажівка може їздити лише по мережі доріг і доставити посилку своєму клієнту. Коли вантажівка доставляє посилку, дрон також може перевозити деякі невеликі посилки та злітати з вантажівки, щоб одночасно виконати деякі завдання доставки. Ми припускаємо, що безпілотник може злетіти/приземлитися на вантажівку лише тоді, коли вона зупиняється на клієнтських вузлах (або депо), де дрон можна зарядити або змінити акумулятор. Після завершення доставки всіх посилок вантажівка повинна повернутися в депо разом з дроном. Мета полягає в тому, щоб знайти головний маршрут для вантажівки та всі суміжні підмаршрути для дрона, щоб завершити доставку всіх посилок і мінімізувати загальну вартість подорожі вантажівки та дрона.

2.2.2 Процес споживання енергії для акумулятора дрона на суміжному підмаршруті. Не можна нехтувати вагою кожного посилки порівняно з власною вагою дрона. Рівень споживання енергії дроном залежить від його власної ваги та ваги вантажів, які він перевозить, які поступово зменшуватимуться після того, як вантажі будуть вививантажені на клієнтських вузлах. Модель споживання енергії для суміжного підмаршруту з декількома клієнтськими вузлами є важливою для оцінки вартості цього підмаршруту.

Після вибору суміжного підмаршруту та призначення завдань доставки дрон завантажував би всі відповідні посилки по порядку. Потім він подорожував би до призначених клієнтів і вивантажував пакети один за одним, що означає, що корисне навантаження демонструвало б поетапне зменшення.

Оскільки швидкість споживання енергії може змінюватися лінійно залежно від корисного навантаження [16], форма функції для оцінки цієї швидкості буде показувати кускову форму, яка стає нижчим кроком на етапі доставки посилок клієнтам. На рис.2.2(а) показано зміни заряду батареї дрона на підмаршруті з 3 вантажами, тоді як на рис.2.2(б) показано зміни заряду батареї, що залишилася на цьому маршруті.

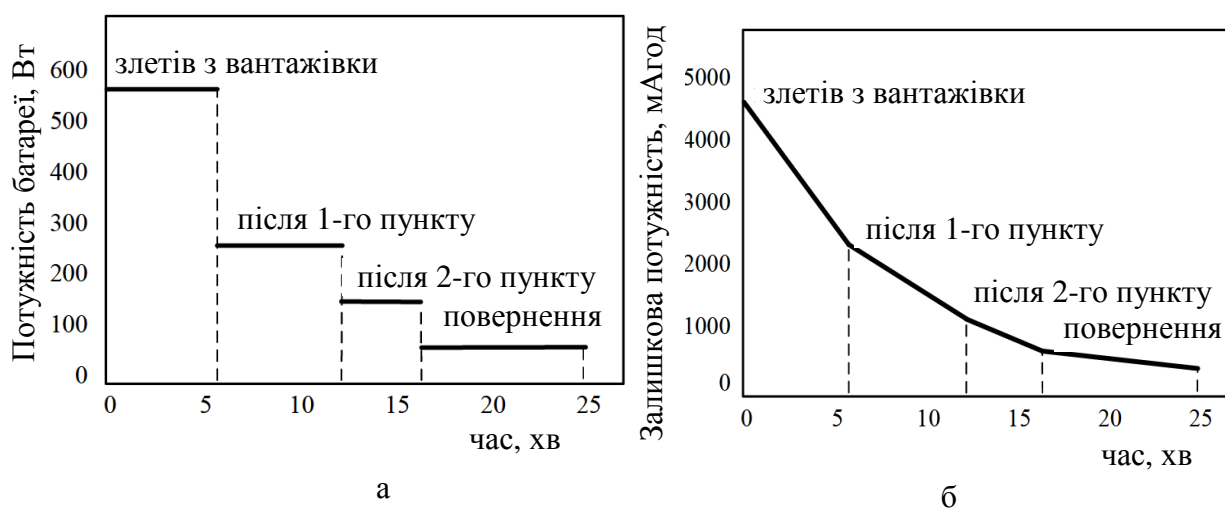


Рисунок 2.2 – Ілюстрація процесу споживання енергії для дрона на підмаршруті з 3 вантажами

Коли від клієнта (або парку) i до клієнта (або до парку) j ($i, j \in V_0 \cup V$), ми припускаємо, що дрон має власну вагу w_d і корисне навантаження G_i . Крім того, швидкість польоту дрона позначається як v_{ij} . Тоді на сегменті шляху від клієнта i до клієнта j потужність акумулятора p_{ij} може бути представлена таким чином:

$$p_{ij} = \frac{(w_d + G_i)v_{ij}}{370\eta\gamma} + e, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

де η – ефективність перетворення двигуна;
 γ – коефіцієнт підйомної сили;
 e – втрати енергії акумулятором дрона [16].

Тоді час польоту від клієнта i до клієнта j і відповідне споживання енергії є такими, як показано нижче:

$$t_{ij} = \int_0^{d_{ij}} \frac{1}{v_{ij}} ds, \text{ с}, \quad (2.2)$$

$$W_{ij} = \int p dt = \left[\frac{(w_d + G_i)v_{ij}}{370\eta\gamma} + e \right] \cdot \int_0^{d_{ij}} \frac{1}{v_{ij}} ds, \text{ мАгод}. \quad (2.3)$$

Коли марка та тип дрона визначені заздалегідь, значення всіх відповідних параметрів у (2.1)-(2.3) є відомі. Зазвичай дрон має максимальну потужність P через обмеження акумулятора та двигуна. Щоб отримати найвищу ефективність доставки, ми припускаємо, що дрон зберігатиме максимальну потужність під час польоту, тобто:

$$p_{ij} = P. \quad (2.4)$$

Таким чином, виходячи з наведеного вище припущення, швидкість і час польоту від клієнта i до клієнта j можна оцінити, як представлено нижче.

$$v_{ij} = \frac{370\eta\gamma(P - e)}{w_d + G_i}, \text{ км/год}. \quad (2.5)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}(w_d + G_i)}{370\eta\gamma(P - e)}, \text{ год.} \quad (2.6)$$

Базуючись на наведених вище виразах, ми можемо розрахувати загальну кількість енергії, спожитої дроном на суміжному підмаршруті, і таким чином судити, чи перевищує вона ємність батареї. Також можна отримати вартість суміжного підмаршруту.

2.2.3 Приклад розрахунку. Використовуючи найбільш розповсюджений вантажний дрон типу октокоптер DJI Spreading Wings S1000 Plus ARF, який має такі параметри [2]:

- діагональна база – 1045 мм;
- довжина променя – 386 мм;
- вага променя (з мотором, регулятором, гвинтом) – 325 грам;
- діаметр центральної рами – 337мм;
- вага центральної рами (з базою шасі, сервоприводами) – 1520 г;
- розмір шасі – 460 мм (довжина); 511мм (ширина); 305мм (висота).

Характеристики моторів:

- розмір статора – 41 * 14мм;
- обороти – 400 хв⁻¹ / В
- максимальна потужність – 500 Вт;
- вага (з вентилятором охолодження) – 158 гр.

Льотно-технічні характеристики:

- злітна вага - 6.0 ~ 11.0 кг
- власна маса - 4.4 кг
- батарея живлення - LiPo (6S, 10000 mAh ~ 20000 mAh, 15C (мін.));
- максимальна споживана потужність – 4000 Вт;
- потужність, споживана на висінні – 1500 Вт (при злітній вазі 9.5 кг);
- тривалість висіння – 15 хв (з акумуляторами 15000 mAh при злітній вазі 9.5 кг);

- ефективність перетворення двигуна – 0,5;
- коефіцієнт підйомної сили – 1,45.

Знаючи такі характеристики, обчислимо параметри підмаршруту дрона з трьома вантажами (поштовими посилками) з вагою 3 кг кожен. Адресати знаходяться рівновіддалено один від одного по прямій ≈ 3 км.

Швидкість польоту:

$$v_{ij} = \frac{370 \cdot 0,5 \cdot 1,45 (4000 - 1500)}{9 + 4,4} = 50,4 \text{ км/год.}$$

Тривалість польоту між двома споживачами $t_{ij}=3,57$ хв.

Витрати енергії на один політ довжиною 15 км:

$$W = \left[\frac{(9 + 4,4)50,4}{370 \cdot 0,5 \cdot 1,45} + 1500 \right] \cdot \frac{15}{50,4} = 447 \text{ мАгод.}$$

Враховуючи, що ємність акумуляторів 15000 мАгод., і ми не врахували залежності на рис.2.2, то заряду батареї вистачить, щонайменше, на 3 подібні підмаршрути.

2.3 Розробка моделі керування

2.3.1 Бінарна модель керування. Коли безпілотник доставляє кілька посилок за один політ, розробка моделі для проблеми маршрутизації в два ешелони стає досить складною [18]. Таким чином, щоб запропонувати більш точне розуміння визначення проблеми, ми представили двоетапне математичне формулювання на основі маршруту. Враховуючи мережу $G = (N, E)$, ми припускаємо, що всі можливі спрямовані головні маршрути вантажівки можна перерахувати, і нехай R буде множиною цих основних маршрутів. Кожен маршрут $r \in R$ починається від депо $V_0 = \{0\}$, відвідує одного або кількох клієнтів у V і повертається до місця відправлення, наприклад, 0,1,2,3,4,5,0 (див. рис. 2.1). Для будь-якого спрямованого головного маршруту r ($r \in R$) його вартість можна обчислити та позначити як c_r . Коли для вантажівки вибрано маршрут r ($r \in R$), нехай V_r — це набір клієнтів, яких

відвідала вантажівка, а V_r' — це набір клієнтів, які здійснюють безпілотники. Крім того, ми припускаємо, що всі спрямовані підмаршрути в даному головному маршруті r ($r \in R$) можна перерахувати, і нехай S_r буде множиною всіх підмаршрутів у головному маршруті r . Подібним чином, нехай E_{rl} буде позначено як набір дуг, які включені в спрямований підмаршрут l , а R_{rl} буде позначено як набір усіх можливих суміжних підмаршрутів, якими може проїхати дрон, коли вантажівка рухається підмаршрутом l у маршрут r . Кожен суміжний підмаршрут m ($m \in R_{rl}$) починається від першого клієнта відповідного підмаршруту l і закінчується в останнього клієнта l після відвідування одного або кількох клієнтів у V_r' . Крім того, V_{rlm} — це набір клієнтських вузлів, які відвідує дрон у суміжному підмаршруті m ($m \in R_{rl}$), що відповідає спрямованому підмаршруту l у маршруті r . Відповідно до моделі енергоспоживання, вартість подорожі дрона суміжним підмаршрутом m можна розрахувати та позначити як c_{rlm} .

Нехай $x_r \in \{0,1\}$ — двійкова змінна, яка дорівнює 1, якщо для вантажівки вибрано спрямований маршрут r ($r \in R$), і 0 в іншому випадку. Дано маршрут вантажівки $r \in R$ і спрямований підмаршрут $l \in S_r$, нехай $y_{rlm} \in \{0,1\}$ буде двійковою змінною, що дорівнює 1, якщо суміжний підмаршрут m ($m \in R_{rl}$) вибрано для дрона, і 0 інакше. Крім того, задано два клієнти i, j ($i, j \in V_0 \in V$) та суміжний підмаршрут m ($m \in R_{rl}$), нехай $a_{ijrl} \in \{0,1\}$ буде двійковим параметром, що дорівнює 1, якщо $a_{rc}(i, j) \in E_{rl}$ і 0 в іншому випадку, нехай $b_{irlm} \in \{0,1\}$ буде двійковим параметром, що дорівнює 1, якщо $i \in V_{rlm}$ і 0 в іншому випадку.

Базуючись на наведених вище припущеннях і визначеннях, ми розробляємо двоетапну математичну формулу на основі маршруту для 2E-RP-T&D [12]. На першому етапі пропонується модель оптимізації суміжних підмаршрутів дрона для заданого основного маршруту вантажівки, яку можна використовувати щоб розрахувати мінімальну вартість дрона для всіх

можливих основних маршрутів у R . На другому етапі оптимізується загальна вартість вантажівки та дрона.

2.3.2 Модель 1. Оптимізація суміжних підмаршрутів дрона. Для будь-якого заданого маршруту вантажівки r ($r \in R$) визначаються набори E_r , V_r і V_r' . На цій основі можуть бути відомі всі можливі та здійсненні суміжні субмаршрути, що відповідають маршруту r . Тоді мінімальну вартість для суміжних підмаршрутів безпілотної для відвідування всіх вузлів у V_r' можна розрахувати за допомогою моделі 1, яка формулюється наступним чином.

$$\min z_r = \sum_{l,m} c_{rlm} y_{rlm}, \quad (2.7)$$

$$\sum_{l,m} a_{ijrl} y_{rlm} \leq 1, \forall i, j \in E_r, \quad (2.8)$$

$$\sum_{l,m} b_{ijrl} y_{rlm} = 1, \forall i \in V_r', \quad (2.9)$$

$$y_{rlm} \in \{0,1\}, \quad \forall m \in R_r, l \in S_r. \quad (2.10)$$

Цільова функція (2.7) мінімізує витрати дрона на доставку всіх посилок, які не доставлені вантажівкою на маршруті r . Враховуючи маршрут вантажівки r ($r \in R$), обмеження (2.8) гарантує, що кожен сегмент шляху маршруту вантажівки r може відповідати щонайбільше одному суміжному підмаршруту, який унікає перетину маршрутів дронів. Обмеження (2.9) передбачає, що всі клієнтські вузли у V_r' повинні бути відвідані рівно один раз. Нарешті, обмеження (2.10) визначають змінні рішення.

2.3.3 Модель 2. Оптимізація спрямованого основного маршруту вантажівки. Щоб розв'язати задачу, ми маємо перерахувати всі можливі спрямовані основні маршрути для вантажівки та знайти оптимальний результат із мінімальною сумарною вартістю як для вантажівки, так і для

дрона, у якому оптимальна вартість дрона для кожного маршруту вантажівки r , z_r^* , розраховується шляхом вирішення моделі 1.

Модель для оптимізації спрямованого основного маршруту вантажівки позначена як Модель 2 і представлена так.

$$\min Z = \sum_r c_r x_r + \sum_r x_r z_r^*, \quad (2.11)$$

$$\sum_r x_r = 1, \quad (2.12)$$

$$x_r \in \{0,1\}, \quad \forall r \in R. \quad (2.13)$$

Цільова функція (2.11) мінімізує загальну вартість, визначену двома основними компонентами, якими є вартість подорожі вантажівки та вартість польоту дрона. z_r^* отримується шляхом вирішення моделі 1. Обмеження (2.12) гарантують, що можна вибрати лише один маршрут вантажівки. Обмеження (2.13) визначають змінні рішення. Для деякого спрямованого основного маршруту $r(r \in R)$ у моделі 1 може бути неможливо отримати можливе рішення, і в цій ситуації ми допускаємо значення z_r^* як $+\infty$.

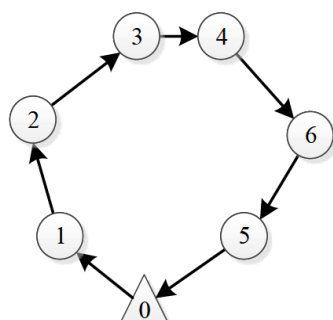
Ми бачимо, що 2E-RP-T&D можна розв'язати, використовуючи моделі 1 і 2. По-перше, усі можливі спрямовані основні маршрути вантажівки слід перерахувати, щоб отримати набір R . Для кожного основного маршруту r ($r \in R$), слід перерахувати всі суміжні підмаршрути, а оптимальні підмаршрути безпілотника можна отримати шляхом розв'язання моделі 1. Тоді оптимальне рішення для мінімізації загальної вартості вантажівки та дрона можна розрахувати за допомогою моделі 2. Однак цей підхід може вирішити проблеми лише з дуже невеликою кількістю клієнтських вузлів. Це тому, що 2E-RP-T&D є NP-складним, оскільки він узагальнює інші відомі NP-складні проблеми, такі як Capacitated VRP (CVRP). Стало б набагато важче досліджувати простір рішень із збільшенням розміру екземпляра, що означає,

що масштабну проблему неможливо вирішити за допомогою двоетапного підходу. Таким чином, необхідно розробити ефективні евристичні алгоритми.

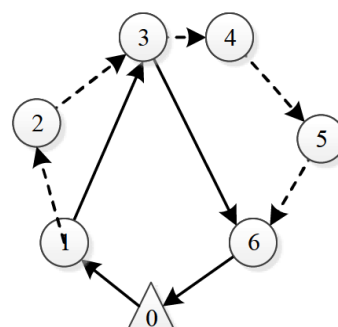
2.4 Рішення

У цьому розділі пропонується алгоритм рішення на основі імітації відпалу [24]. Початкове рішення спочатку створюється за допомогою нової евристики, яка об'єднує найближчого сусіда та стратегії економії коштів. Потім алгоритм імітованого відпалу в поєднанні зі списком Tabu застосовується для покращення вихідного рішення.

2.4.1 Гібридна евристика. Об'єднує стратегії найближчого сусіда та збереження. Гібридна евристика розроблена на основі ідеї «спочатку вантажівка, потім дрон», яка об'єднує як найближчого сусіда, так і стратегії збереження.



а) рішення для поїздок лише вантажівкою, розроблене NNS



б) рішення для вантажівок і безпілотників шляхом економії заміни

Рисунок 2.3 – Ілюстрація рішення для шести клієнтських вузлів

По-перше, пошук найближчого сусіда (NNS) використовується для побудови спрямованого основного маршруту для відвідування вантажівкою всіх вузлів клієнтів [18]. Потім використовується ідея максимальної економії коштів, щоб знайти набір суміжних підмаршрутів безпілотника шляхом заміни деяких вузлів вантажівки на вузли дрона.

2.4.2 Побудова спрямованого головного маршруту на основі стратегії найближчого сусіда. Евристика, заснована на пошуку найближчого сусіда, є добре відомим алгоритмом конструктивного пошуку, який є одним із найперших методів, запропонованих для вирішення проблем TSP [13]. Евристика пошуку найближчого сусіда використовується для побудови повного туру для відвідування всіх клієнтів на вантажівці. Він використовує принцип вибору наступного найближчого невідвіданого вузла, доки не будуть охоплені всі вузли. Він працює швидко, однак оптимальність турів, які він створює, сильно залежить від компонування вузлів клієнта.

2.4.3 Побудова суміжних підмаршрутів на основі стратегії економії витрат. Після завершення пошуку найближчого сусіда можна побудувати спрямований головний маршрут, який формує список клієнтів. Вага посилок для різних клієнтів різна. Одні з них — важкі пакунки, які можна доставити лише вантажівкою, а інші — легкі, які можна доставити безпілотником. Для легких посилок у повному маршруті, отриманих у розділі 2.1, якщо їх можна доставити за допомогою дрона, ми використовуємо дрон, щоб замінити вантажівку для їх доставки. Процес заміни виконується один за одним відповідно до стратегії економії витрат, запропонованої Кларком і Райтом (1964) [21]. Алгоритм CW спочатку був застосований до задачі маршрутизації транспортного засобу (VRP), метою якої є пошук оптимальних маршрутів для доставки всіх заданих клієнтів. Його головна ідея полягає в тому, щоб об'єднати два маршрути в один маршрут з урахуванням обмежень навантаження автомобіля та знайти максимальне скорочення відстані. Подібним чином алгоритм у цій статті намагається максимально заощадити, замінивши клієнта вантажівки клієнтом безпілотника.

Зокрема, для того, щоб знайти клієнта, який найбільше заощаджує в кожній операції заміни, визначаються чотири умови відповідно до способів доставки першого та останнього клієнта. Чотири умови проілюстровано на рис.2.4. В умові 1 є три клієнти, яких послідовно відвідує вантажівка, і посилка середнього (Клієнт 2) є легкою, спосіб доставки якої можна змінити з

вантажівки на дрон. Безпілотник буде запущений від Клієнта 1 і повернеться до Клієнта 3 після обслуговування Клієнта 2, і може бути згенерований новий суміжний підмаршрут. Тоді можна розрахувати економію вартості цієї заміни як $(c_{12}^T + c_{23}^T) - (c_{13}^T + c_{1-2-3}^D)$, де c_{1-2-3}^D – вартість польоту дрона суміжного підмаршруту, (1,2,3).

В умові 2 вузол відвідування вантажівки, який також є посадковим вузлом суміжного підмаршруту дрона, додається в кінець цього суміжного підмаршруту. Як показано на рис.2.4 (б), Клієнт 1 доставляється безпілотником, а Клієнти 2 і 3 послідовно доставляються вантажівкою. У цьому випадку необхідно оцінити можливість обслуговувати безпілотник Клієнта 2 після завершення доставки Клієнта 1. Окрім обмеження корисного навантаження, необхідно перерахувати споживання енергії на всьому маршруті згідно з методом у розділі 2.2. Таку ж перевірку слід провести і для третьої та четвертої умов. Якщо заміна в умові 2 можлива, економія вартості може бути розрахована як $(c_4^{T2} + c_2^{T3} + c_{...}^D_{1-2}) - (c_4^{T3} + c_{...}^D_{1-2-3})$, де c_{1-2-3}^D – це польотна вартість вихідного підмаршруту (---1-2), а $c_{...}^D_{1-2-3}$ — польотна вартість підмаршруту з додаванням клієнта 3.

В умові 3 вузол відвідування вантажівки, який є вузлом зльоту суміжного підмаршруту дрона, додається до початку цього суміжного підмаршруту. Як показано на рис.2.4 (с), клієнта 2 відвідує вантажівка, і він є вузлом зльоту дрона. Якщо посилку клієнту 2 можна доставити безпілотником і додати до початку суміжного підмаршруту, економія вартості може бути розрахована як

$$(c_{12}^T + c_{24}^T + c_{2-3...}^D) - (c_{14}^T + c_{1-2-3...}^D),$$

де $c_{2-3...}^D$ – польотна вартість вихідного підмаршруту (2-3---),

$c_{1-2-3...}^D$ — польотна вартість підмаршруту з доданим вузлом 1 .

В умові 2.4 два суміжні підмаршрути дрона об'єднані, що показано на рис.2.4 (д). Можна побачити, що на рис. 2.4 (д). Клієнта 2 відвідує вантажівка,

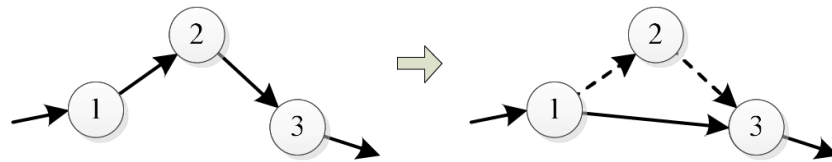
яка є вузлом посадки суміжного підмаршруту (---1-2) і вузлом зльоту суміжного підмаршруту (2-3---). Якщо два суміжних підмаршрути можна об'єднати в один суміжний підмаршрут, економія вартості може бути розрахована як

$$\left(c_{42}^T + c_{25}^T + c_{\dots 1-2}^D + c_{2-3\dots}^D\right) - \left(c_{45}^T + c_{\dots 1-2-3\dots}^D\right) \quad (2.14)$$

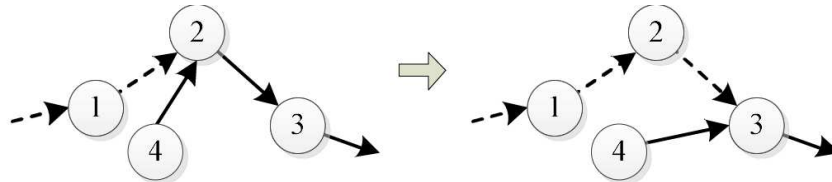
де c_{1-2}^D – польотна вартість підмаршруту (---1-2);
 $c_{2-3\dots}^D$ – польотна вартість підмаршруту (2-3---);
 $c_{1-2-3\dots}^D$ – вартість польоту підмаршруту (---1-2-3---).

Виходячи з чотирьох вищевказаних умов, перевірте всі вузли, відвідані вантажівкою, обчисліть зекономлені витрати для кожного можливого вузла та замініть вузли з максимальною економією на відвідування дроном. Повторюйте цю оцінку та крок заміни, доки не буде досягнуто позитивної економії, що означає, що загальну вартість неможливо зменшити шляхом зміни способів доставки до клієнтів.

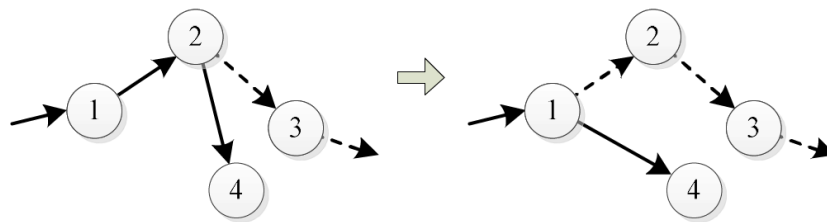
2.4.4 Основна процедура оптимізації. Основна процедура для гібридної евристики показана в алгоритмі 1. Спочатку, відповідно до фактичної відстані дороги, вантажівці призначається виїзд із депо та вибір обслуговування найближчого клієнта щоразу, доки всі посилки не будуть доставлені. Коли вантажівка повертається до депо, генерується маршрут лише для вантажівок (рядок 1). Тоді цикли виконуватимуться відповідно до послідовності списку клієнтів у цьому основному маршруті. У кожному циклі кожен клієнтський вузол буде оцінюватися, чи може він обслуговуватися дроном. Ми розраховуємо економію, якщо до неї можна отримати доступ за допомогою дрона (рядок 3).



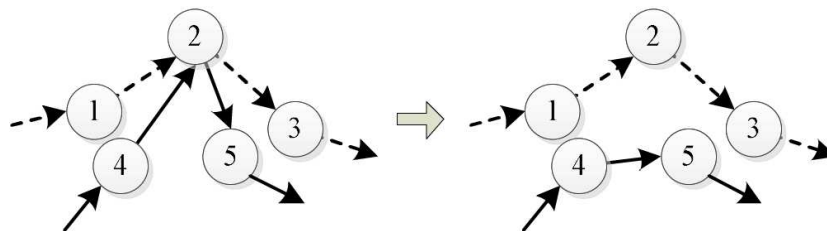
(a) Умова 1: створення нового суміжного підмаршруту



(b) Умова 2: додавання вузла в кінці суміжного підмаршруту дрона



(c) Умова 3: додавання вузла на початку суміжного підмаршруту дрона



(d) Умова 4: об'єднання двох суміжних підмаршрутів дрона.

Рисунок 2.4 – Чотири умови для заміни вузла відвідування вантажівки на вузол відвідування дрона

Якщо одного або кількох клієнтів можна знайти, виберіть клієнта, який найбільше заощадить, і налаштуйте маршрути з двома ехо-сигналами, щоб

змінити спосіб доставки вибраного клієнта (рядок 5). Якщо ні, завершіть цикл (рядок 7) і виведіть рішення, яке є маршрутом у два ешелони для вантажівки та дрона (рядок 10).

1	COMPUTE truck-only route
2	WHILE (1) DO
3	Find MostSavingCustomer
4	IF MostSavingCustomer THEN
5	change the delivery way of MostSavingCustomer
6	ELSE
7	break
8	END IF
9	END WHILE
10	PRINT truck & drone routes

Рис. 2.5. Алгоритм 1: Гібридна евристика

2.5 Алгоритм моделювання

2.5.1 Алгоритм моделювання відпалу. Алгоритм був запропонований Kirkpatrick та ін. (1983) [22]. Оскільки він приймає гірше рішення з певною ймовірністю, у процес пошуку вводяться випадкові фактори, і, можливо, буде отримано глобальне оптимальне рішення. Цей алгоритм забезпечує ефективний спосіб вирішення проблеми комівояжера (ПК) і маршрутизації транспортного засобу (МТЗ), які важко вирішити традиційними методами [28]. Симуляція відпалу – це евристика, заснована на аналогії теорії термодинаміки зі способом охолодження та відпалу металів. Основна ідея полягає в тому, щоб не обмежувати кроки пошуку лише тими рішеннями, які зменшують значення цільової функції, що дозволяє уникнути передчасного захоплення локальним мінімумом. Основний алгоритм наведено нижче (рис.2.6). Спочатку процедура оптимізації починається з визначення кількох параметрів, таких як температура початку та температура завершення (рядок 1).

```

1  INITIALIZE startTemperature, endTemperature, iterationNumber, coolingRate
2  COMPUTE initialSolution
3  INITIALIZE currentSolution, bestSolution
4  currentTemperature = startTemperature
5  iteration = 0, tabuList = []
6  WHILE currentTemperature > endTemperature DO
7      WHILE iteration < iterationNumber DO
8          find tempSolution in neighborhood of the currentSolution and add tabuList
9          detaObjective = tempObjective - currentObejective
10         IF detaObjective < 0 THEN
11             currentSolution = tempSolution
12             IF tempObjective < bestObjective THEN
13                 bestSolution = tempSolution
14             END IF
15         ELSE
16             IF random([0,1]) < exp(-detaObjective/currentTemperature) THEN
17                 currentSolution = tempSolution
18             END IF
19         END IF
20         iteration ++
21     END WHILE
22     currentTemperature = currentTemperature × coolingRate
23     release tabuList
24 END WHILE
25 PRINT bestSolution, bestObjective

```

Рисунок 2.6 – Псевдокод програми за алгоритмом моделювання відпалу

Після побудови початкового рішення за допомогою гібридної евристики (рядок 2) початкове рішення буде призначено найкращому рішенню для ініціалізації та записано як поточне рішення (рядок 3). При кожній температурі кількість ітерацій заздалегідь визначена, а список Tabu ініціалізується для покращення продуктивності моделювання відпалу у внутрішньому циклі (рядок 5). Потім на кожній ітерації алгоритм знаходить тимчасове рішення з околиць поточного рішення (рядок 8), яке буде пояснено пізніше більш детально. Також деякі недійсні ходи будуть додані до списку

табу (рядок 8). Якщо було отримано покращення (рядок 10), тимчасове рішення стане поточним рішенням для наступної ітерації (рядок 11). І це було б визнано найкращим рішенням, якщо його мета краща за найкращу на даний момент (рядок 13). Однак гірше рішення також може бути прийнято з невеликою ймовірністю, яка визначається поточною температурою та об'єктивною різницею придатності, яка відома як функція Больцмана (рядок 17) [19]. За цієї умови найкраще рішення не буде змінено. Коли кількість ітерацій досягає умов завершення, температура буде знижена (рядок 22), а список Табу буде випущено (рядок 23). Коли поточна температура охолоджується до кінцевої температури, алгоритм припиняється і виводиться найкраще рішення (рядок 25).

Оскільки двоступеневі маршрути представляють велику складність, це дасть багато нездійснених рішень із традиційними структурами сусідства, які використовуються в задачах ПК і МТЗ, що має велику кількість марних обчислень. Таким чином, у цьому розділі розглядаються різні ситуації, коли переміщення сусідства виконується в змішаних клієнтах і застосовуються деякі коригування, щоб переконатися в здійсненності рішення. Якщо говорити конкретно, запроектовано три мікрорайони. У кожній ітерації всі ці околиці поточного рішення шукаються. І згенеровані можливі рішення порівнюватимуться для вибору рішення про найменшу вартість.

2.5.2 Околиці 1: видалення-повторне вставлення. Околиці видалення-повторної вставки зазвичай використовуються для вирішення проблем, пов'язаних із ПК, коли клієнт видаляється та повторно вставляється в іншу позицію в попередньому рішенні. На відміну від традиційних проблем ПК, існує два типи маршрутів: наземні транспортні засоби та безпілотні.

Ми обмежуємо, що видалений вузол можна повторно вставити лише в маршрут того ж типу, тобто інструмент доставки посилки для клієнтів не повинен бути змінений. У ході видалення можна або випадково вибрати клієнта, або видалити клієнта, який має найбільший вплив на відстань маршруту. Зокрема, цей хід починається з генерації випадкового числа для

визначення способу видалення. Якщо його видалити на основі відстані, відстань між обома сторонами кожного клієнта буде обчислено, і клієнт із найбільшою відстанню між двома сторонами буде видалено. Однак, якщо його видалити випадковим чином, простір пошуку рішення буде різноманітним. Що стосується операції повторного вставлення, вона жадібно вибере найкраще положення введення з мінімальним збільшенням вартості після розгляду всіх можливостей.

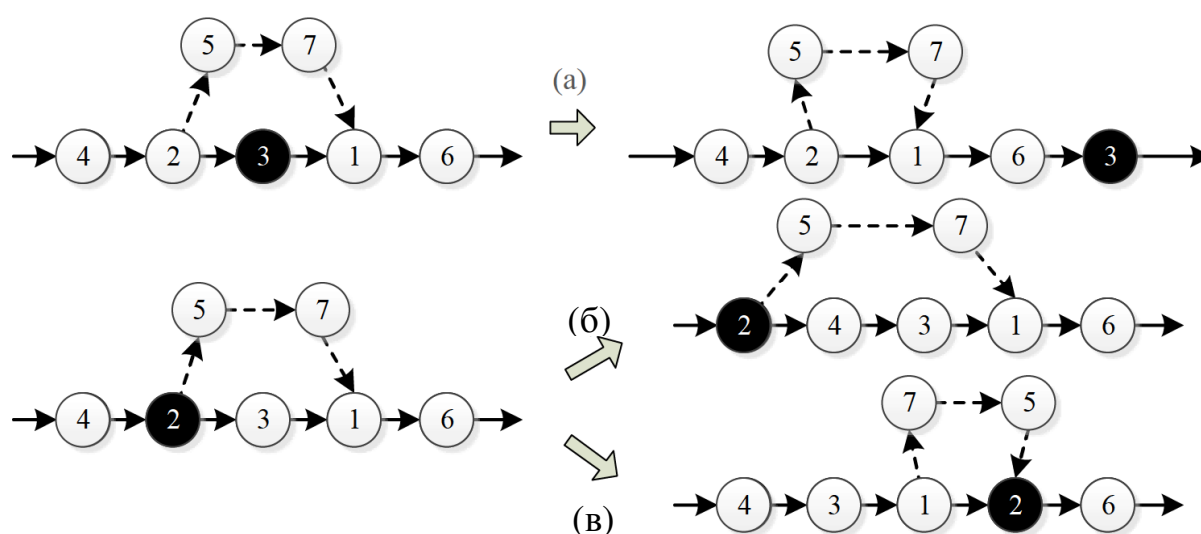


Рисунок 2.7 – Схема ескізу для повторних вставок вузлів, відвіданих вантажівкою

Оскільки клієнти знаходяться лише на одному маршруті дронів, повторне включення клієнтів буде обмежено лише витривалістю та потужністю дрона. Тим не менш, це складніше для клієнтів вантажівок. Кілька типових операцій для околиці видалення-повторного введення представлено на рис. 2.7. На рис. 2.7 (а) показано відносно простий рух, у якому клієнт 3 знаходиться лише на маршруті вантажівки, а повторне введення клієнта 3 не впливає на маршрут дрона. Крім того, операції, представлені на рис.2.7 (б) і (в), переміщують клієнта 2, перебуваючи як на маршруті вантажівки, так і на маршруті безпілотної. У випадку (б),

незважаючи на те, що маршрут вантажівки змінено, дрон все одно запускається з клієнта 2. Однак у випадку (в) маршрут дрона інвертується, перетворюючи клієнта 2 на зворотний вузол маршруту дрона. Згідно з моделлю споживання енергії, енергія, яку дрон споживає на цьому маршруті, зміниться.

2.5.3 Околиці 2.

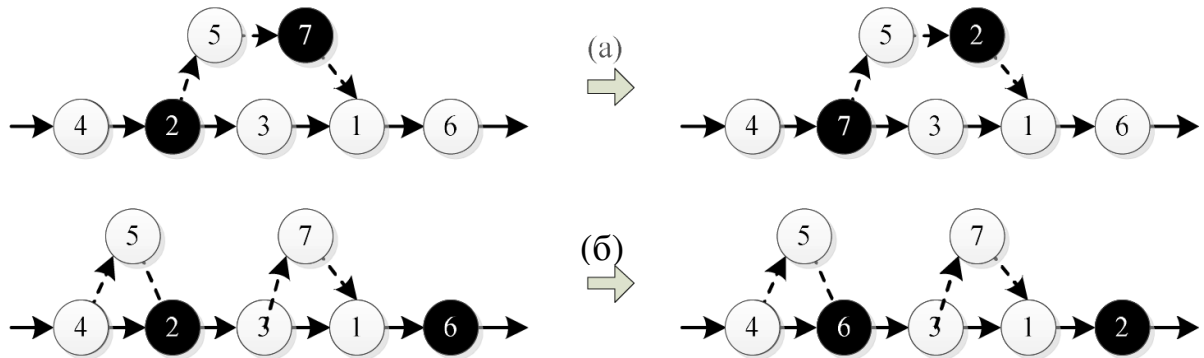


Рисунок 2.8– Ескіз карти для 2-х ешелонів

Сусідство з двома обмінами означає обмін клієнта іншим у рішенні. Через складність маршрутів з двома ешелонами, тут операція з двома пересадками є складнішою, ніж та, яка використовується в традиційній задачі ПК, а також потужності щодо витривалості та корисного навантаження дрона слід перевіряти під час кожної операції. Обмін між двома вузлами в маршруті одного типу, наприклад, маршрут вантажівки або безпілотної літака є простий, якщо структура двоешелонних маршрутів не змінюється. В інших випадках, якщо вузол відвідування вантажівки служить вузлом запуску або посадки, роль цього вузла в маршруті дрона має бути замінена іншим вузлом обміну. Деякі спеціальні випадки представлені на рис.2.8. Як показано на рис.2.8(а), вузол відправлення дрона змінюється з клієнта 2 на клієнта 7, і новий маршрут дрона потрібно перевірити. На рис.2.8 (б), якщо запуск і повернення клієнтів залишаються незмінними, маршрут дрона (3, 7, 1) буде всередині іншого маршруту дрона (4, 5, 2). Таким чином, передбачається виконати

певне коригування після обміну та вибрати клієнта 6 як нового клієнта, що повернувся.

Околиці переміщення схожі на околиці видалення-повторної вставки, і їх основна відмінність полягає в тому, що переміщення має змінити спосіб доставки вантажів клієнтам. Клієнтів, які відвідують дрони, легко перетворити на відвідувачів, які відвідують вантажівки, тому ми зосередимося на тому, як перетворити клієнтів, які відвідують вантажівки, на клієнтів, які відвідують дрони. На рис.2.9 представлено три типові переміщення для вузлів переміщення між маршрутом вантажівки та маршрутом безпілотної.

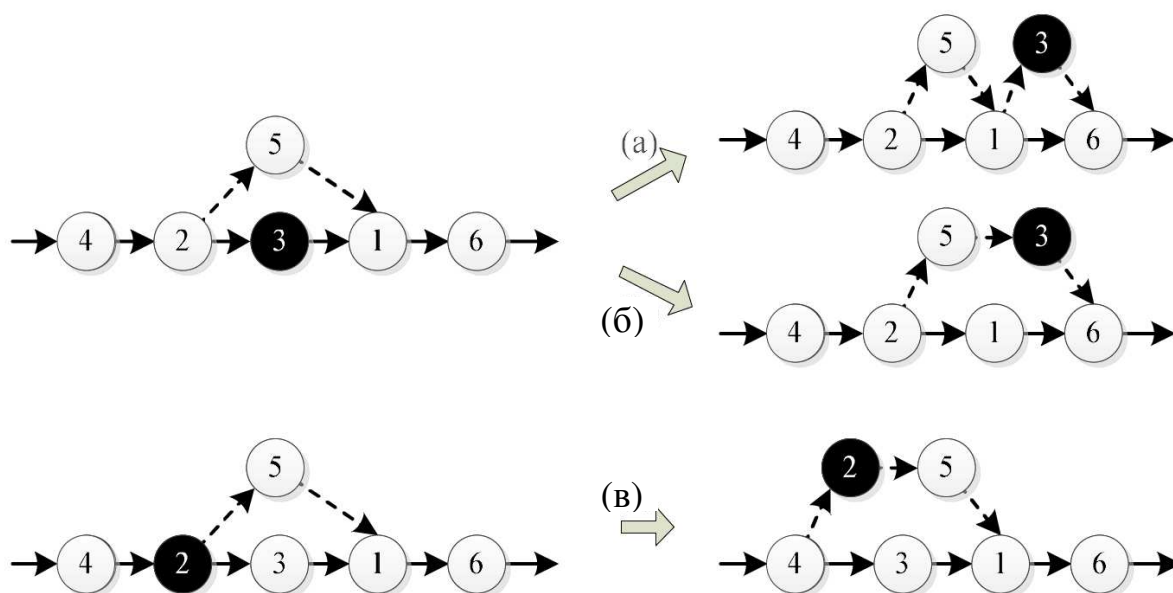


Рисунок 2.8 – Ескізна карта для деяких випадків переміщення між вузлами вантажівки та дрона

Після видалення клієнта з маршруту вантажівки найпростішим способом є вставити його в нову поїздку дрона, як показано на рис.2.9 (а). Крім того, як показано на рис.2.9 (б), ще одним методом є введення клієнта в поточний маршрут дрона. Порівнюючи два можливі рішення, буде обрано краще з меншою вартістю. Слід зазначити, що якщо вибраний клієнт

вантажівки є вузлом запуску або вузлом посадки, альтернативний клієнт потрібен після перетворення вибраного клієнта на клієнта безпілота.

Наприклад, щоб переконатися в здійсненості рішення, слід вибрати іншого клієнта для запуску дрона після того, як клієнта 2 відвідає дрон, наприклад клієнта 4 на рис.2.9 (в).

У поєднанні з ймовірністю переходу, змодельований алгоритм відпалу має можливість уникнути локальних оптимумів у процесі пошуку рішення. Однак недолік пам'яті можна розглядати як головний недолік цього методу, який призведе до короткочасного циклу та повторного перегляду (El-Bouri та ін., 2007) [18]. Таким чином, із запам'ятовуванням списку заборонених ходів (Табу список) продуктивність імітованого відпалу може бути покращена. А інтеграція списку Табу в алгоритм моделювання відпалу виявилася ефективною в попередньому відомому дослідженні [33].

У кожній взаємодії деякі околиці будуть вибрані для створення нового рішення околиць. Якщо нове рішення краще (з нижчою вартістю) за старе, воно буде прийнято. Або якщо нове рішення має гіршу об'єктивну придатність, ніж старе, нове може бути прийнято з певною ймовірністю. Щойно нове рішення буде прийнято, вибрані райони буде додано до списку Табу. Відповідно, околиці зі списку Табу не можна вставляти в нове рішення, доки вони не будуть звільнені після зниження температури.

2.6 Комп'ютерні експерименти та результати

У цьому розділі проводяться експерименти на основі випадково згенерованих екземплярів, щоб перевірити ефективність запропонованих алгоритмів, і практичний випадок застосований для аналізу чутливості щодо деяких критичних факторів, якими є співвідношення легких посилок, потужність дрона щодо корисного навантаження та потужність акумулятора дрона.

2.6.1 Структура експерименту. Значення параметрів, пов'язаних з вантажівкою та безпілотником, встановлюється відповідно до типових для

практичного використання. Вага дрона становить близько 4,4 кг з максимальним корисним навантаженням 9,5 кг, а його відстань витривалості становить близько 10 кілометрів за умови максимального корисного навантаження. Що стосується вартості вантажівки, типова вантажівка для доставки посилок проїжджає 6 км на літр дизельного палива, що означає споживання палива 0,392 л/км. 8 січня 2024 року середня національна ціна на дизельне паливо становить 54 грн. за літр. Крім того, оцінюється, що змінна експлуатаційна вартість вантажівок становить 16 грн. на км⁻¹ після врахування вартості технічного обслуговування, амортизаційних відрахувань і зарплати [3]. Таким чином, вартість одиниці шляху для вантажівки становить в еквіваленті \$0,794 км. Що стосується вартості дрона, за замовчуванням встановлено, що вартість одиниці відстані вантажівки в 25 разів перевищує вартість одиниці відстані дрона [21]. З потужністю батареї 5000 мАгод. і максимальною дистанцією подорожі 10 кілометрів можна оцінити, що одинична вартість енергії для дрона становить $\$0,635 \cdot 10^{-4} / \text{мАгод.}$ Таким чином, після звернення до загальнодоступних параметрів різних дронів спочатку визначається продуктивність двох транспортних засобів і повідомляється в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Визначення параметрів двох засобів

Вантажівка	швидкість	50 км/год
	вартість одиниці переміщення	\$0.794 /км
	вантажопідйомність	3 кг
	максимальна потужність	160 Вт
Дрон	заряд акумулятора	5000 мАгод.
	коефіцієнт $k = 370^{y(P-e)}$	1280
	вартість одиниці енергії	$\$0.635 \times 10^A(-4) / \text{мАгод}$

Випадковий експеримент проводиться з екземплярами в трьох різних масштабах, які відображені в таблиці 2.1. При генеруванні положення вузлів використовується метод квартування, тобто розділення карти на чотири частини та випадкове генерування рівної кількості вузлів у кожній частині. Що стосується ваги посилок, то «Нова пошта», наприклад, оголосила, що

близько 90% - 95% її посилок не важчі за 5 фунтів (приблизно 2,27 кг) [8]. Таким чином, після деяких попередніх досліджень вага посилки попередньо встановлена в діапазоні 0-10 кг, а посилки вагою менше 2,3 кг становлять 90%. Якщо посылка занадто важка для доставки за допомогою дрона, вона вважається важкою, інакше – легкою.

Таблиця 2.2 – Приклади в трьох різних масштабах

Масштаб	Кількість вузлів	Розмір карти
Мала	20	8км*8км
Середня	40	10км*10км
Велика	100	12 км* 12 км

На рис. 2.10 представлено приклад маломасштабного екземпляра. Депо представлено блоком трикутника. Крапки позначають усіх клієнтів із розміром, що розрізняє важку та легку посылку.

2.6.2 Результат експерименту. Щоб дослідити адекватність алгоритму, десять екземплярів для кожного різного масштабу випадковим чином генеруються методом, описаним вище, і використовуються для проведення експерименту. Для кожного випадку порівнюються результати для початкового рішення, отриманого за допомогою гібридної евристики (ГЕ), і кінцевого покращеного рішення (КПР), отриманого за допомогою алгоритму імітованого відпалу (AIV) [18].

Крім того, результат для маршруту лише вантажівкою для кожного екземпляра (ОРВ) обчислюється за допомогою імітованого алгоритму відпалу, який можна розглядати як оптимальне рішення, якщо посилки доставляються лише традиційною вантажівкою.

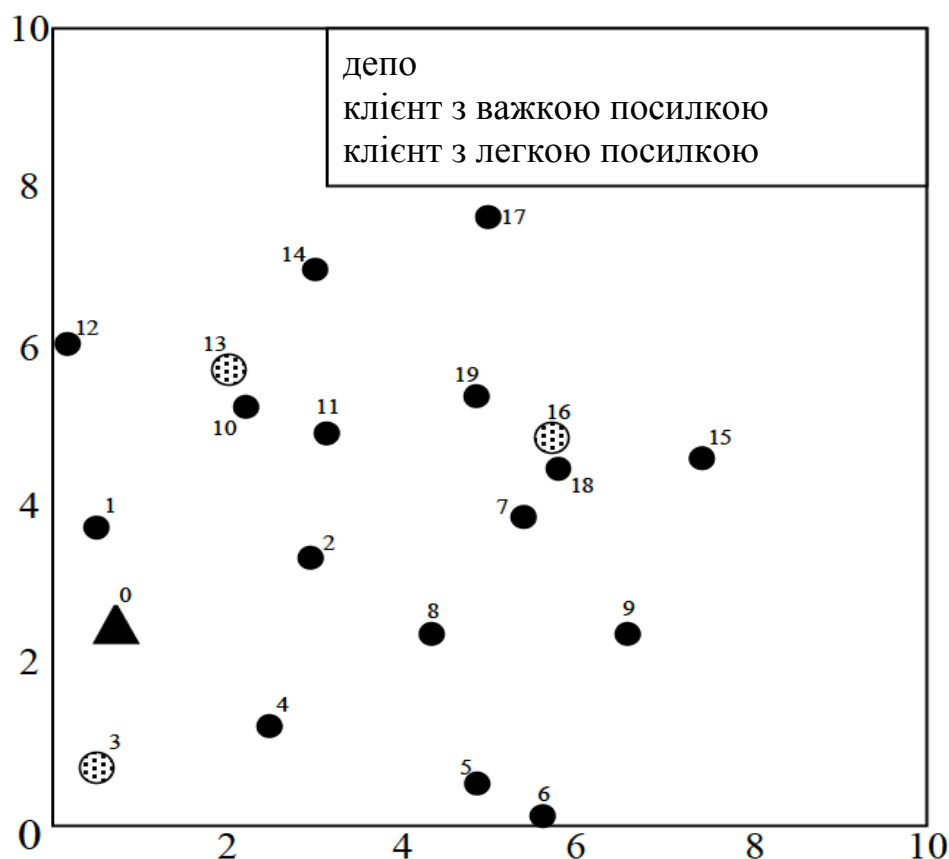


Рисунок 2.10 – Приклад розподілу вузлів для маломасштабного екземпляра

Потім також представлено порівняння між остаточним рішенням АІВ і оптимальним рішенням лише для вантажівки (ОРВ), яке демонструє вплив на загальну вартість у режимі безпілотної.

У таблиці 2.3 представлені результати обчислень для всіх десяти примірників малого масштабу. Ми бачимо, що алгоритм АІВ може значно покращити початкові рішення, отримані алгоритмом ГЕ, а вартість покращеного рішення, представленого АІВ, зменшується з 13,47% до 57,14% порівняно з вартістю початкових рішень ГЕ. З появою безпілотної кінцеві витрати, отримані АІВ для режиму доставки вантажівкою-дроном, зменшуються з 20,92% до 65,63% порівняно з витратами в режимі лише вантажівка. Час обчислення для всіх малих екземплярів контролюється 12 секунд.

Таблиця 2.3 – Результати обчислень 10 випадкових випадків у малому масштабі

Масштаб карти	Витрати, \$			Порівняння	
	Тільки вантажівка	Вантажівка + дрон (ГЕ)	Вантажівка + дрон (АІВ)	(ГЕ-АІВ)/ГЕ	(ОРВ-КІР)/ОРВ
Малий	58.36	45.74	27.47	39.94%	52.93%
	47.14	37.66	20.33	46.02%	56.87%
	61.08	51.24	27.82	45.71%	54.45%
	56.39	45.32	27.59	39.12%	51.07%
	52.20	45.25	32.86	27.38%	37.05%
	58.61	35.93	26.50	26.25%	54.79%
	55.01	50.27	43.50	13.47%	20.92%
	52.66	48.86	32.95	32.56%	37.43%
	57.36	53.06	26.64	49.79%	53.56%
	48.82	39.15	16.78	57.14%	65.63%

У таблиці 2.4 представлені результати для десяти випадків середнього масштабу.

Таблиця 2.4 – Результати 10 випадкових випадків у середньому масштабі

Масштаб карти	Витрати / \$			Порівняння	
	Тільки вантажівка	Вантажівка + дрон (ГЕ)	Вантажівка + дрон (АІВ)	(ГЕ-АІВ)/ГЕ	(ОРВ-КІР)/ОРВ
Середній	84.39	75.40	38.21	49.32%	54.72%
	85.86	71.36	39.95	44.02%	53.47%
	98.13	83.26	57.04	31.49%	41.87%
	88.14	75.18	54.62	27.35%	38.03%
	98.28	85.03	52.73	37.99%	46.35%
	98.67	75.87	53.89	28.97%	45.38%
	95.45	77.55	44.02	43.24%	53.88%
	102.21	86.19	52.82	38.72%	48.32%
	94.95	71.94	51.16	28.89%	46.12%
	83.82	69.30	49.64	28.37%	40.78%

Ми бачимо, що рішення, отримані ГЕ, можуть бути покращені АІВ на 27,35% - 49,33%. Кінцеві витрати на режим доставки вантажівкою з дроном зменшуються на 38,03% - 54,72% порівняно з витратами на режим доставки лише вантажівкою. Таблиця 2.5 показує результати для десяти випадків

великого масштабу. Можна побачити, що час обчислення для великих екземплярів набагато довший, ніж для середніх екземплярів, хоча він прийнятний і контролюється за 62 секунди. Продуктивність SA щодо покращення рішення для великих екземплярів подібна до середніх екземплярів.

Таблиця 2.5 – Результати 10 випадкових випадків у великому масштабі

Масштаб карти	Витрати / \$			Порівняння	
	Тільки вантажівка	Вантажівка + дрон (ГЕ)	Вантажівка + дрон (AIB)	Тільки вантажівка	Вантажівка + дрон (ГЕ)
Великий	184.05	150.08	99.64	33.61%	45.86%
	173.21	146.02	102.79	29.61%	40.66%
	170.53	136.21	94.27	30.79%	44.72%
	188.55	170.21	101.80	40.19%	46.01%
	170.94	150.85	93.44	38.06%	45.34%
	181.98	172.02	82.87	51.83%	54.46%
	191.25	159.25	85.27	46.46%	55.41%
	186.92	160.30	91.31	43.04%	51.15%
	163.57	146.10	84.87	41.91%	48.11%
	201.65	179.79	82.41	54.16%	59.13%

Із загальних результатів, представлених у таблицях 2.3-2.5, можна помітити, що використання спільної вантажівки та дрона для доставки посилок може значно знизити витрати на доставку порівняно з режимом лише вантажівкою. У багатьох випадках вартість режиму вантажівка-дрон навіть удвічі менша, ніж у вантажівці. Крім того, оператори сусідства також виявилися ефективним методом локальної оптимізації, і в більшості випадків витрати на початкове рішення, отримане ГЕ, знижуються за допомогою AIB більш ніж на 30%.

Крім того, продуктивність усього алгоритму більш стабільна з більш масштабними екземплярами. У невеликих випадках розподіл клієнтів є відносно розкиданим. У цей час на процес оптимізації безпосередньо впливає розташування вузлів, що є причиною того, чому пропорції оптимізації в таблиці 4 сильно відрізняються. Щільність клієнтів збільшуватиметься зі збільшенням масштабу, що є більш сприятливим для доставки дронами.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

3.1 Опис умов проведення експерименту

3.1.1 Карта ділянки. Натурний експеримент побудований на основі практичної дорожньої мережі та клієнтських вузлів відділень «Нової пошти» у м. Київ, який використовується для аналізу чутливості. Як показано на рис.3.1, у східній частині міста Київ розташовано 95 перехресть головних доріг і позначено 30 вузлів клієнтів.

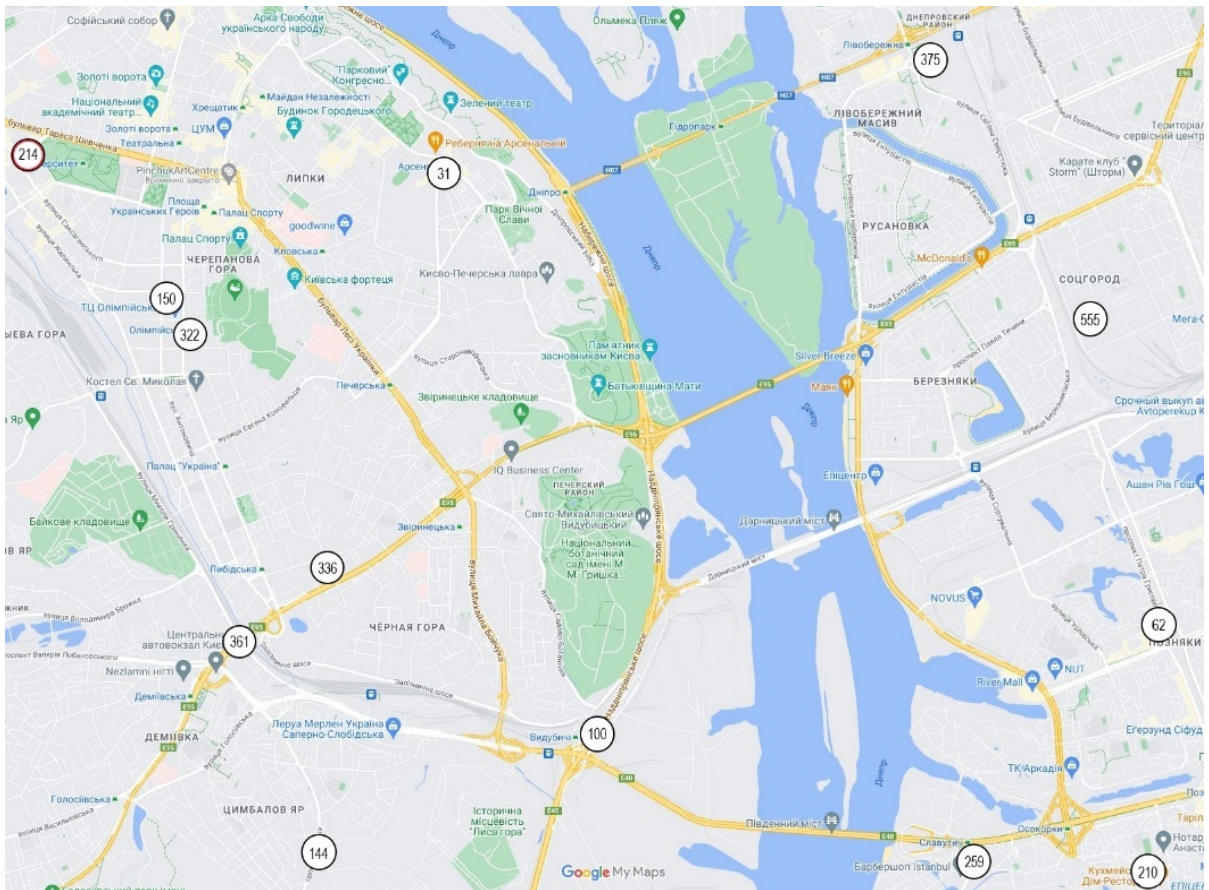


Рисунок 3.1 – Розташування пунктів доставки вантажів на карті Києва

3.1.2 Умови моделювання:

початкова точка (депо) – гілка №214 (вул. Саксаганського, 102);

маршрут доставки вантажу кільцевий, з послідовними доставками;

критерієм оптимізації є мінімізація сумарних витрат часу на доставку вантажу в задані пункти і повернення в депо;

переоптимізація маршруту відбувається після прибуття автомобіля в кожную точку доставки.

З'єднуючи ці переходи, утворюється мережа доріг для вантажівок.

Зокрема, координати широти та довготи перехресть отримані з карти Google. Що стосується відстані вантажівки, інструмент, наданий Google, використовується для розрахунку відстані фактичних сегментів дороги, створюючи початкову матрицю відстані. Потім матриця відстані перетину заповнюється алгоритмом Флойда, щоб отримати найкоротшу відстань між будь-якими двома перехрестями на основі дорожньої мережі [31]. Вага для кожного клієнта генерується випадковим чином із згаданим коефіцієнтом ваги 90%.

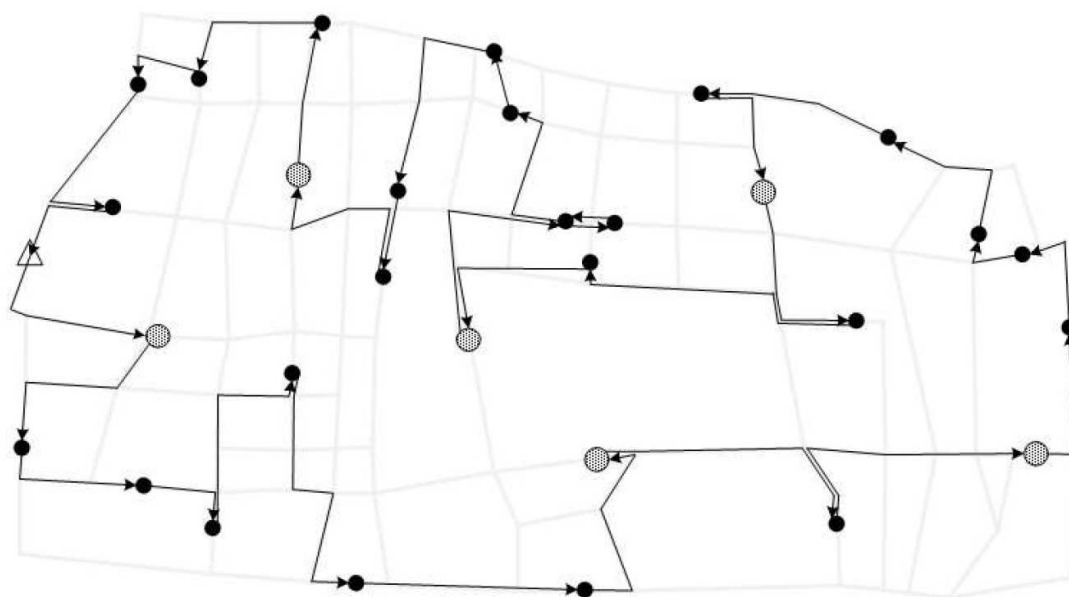
3.2 Представлення результатів

Для візуального відображення результату базовий змодельований алгоритм відпалу та створений алгоритм застосовуються для вирішення прикладу на рис.3.1, а результат показаний на рис.3.2. На рис.3.2(а) представлено оптимальне рішення лише для вантажівки з вартістю 28,63, тоді як (б) — остаточне рішення для вантажівок і безпілотників із вартістю 16,72. У остаточному рішенні 10 клієнтів доставлено вантажівкою, у тому числі 6 клієнтів із важкими посилками. Інші 20 клієнтів відвідують безпілотником, що значно знижує вартість доставки. А час обчислення становить 9,39 секунди.

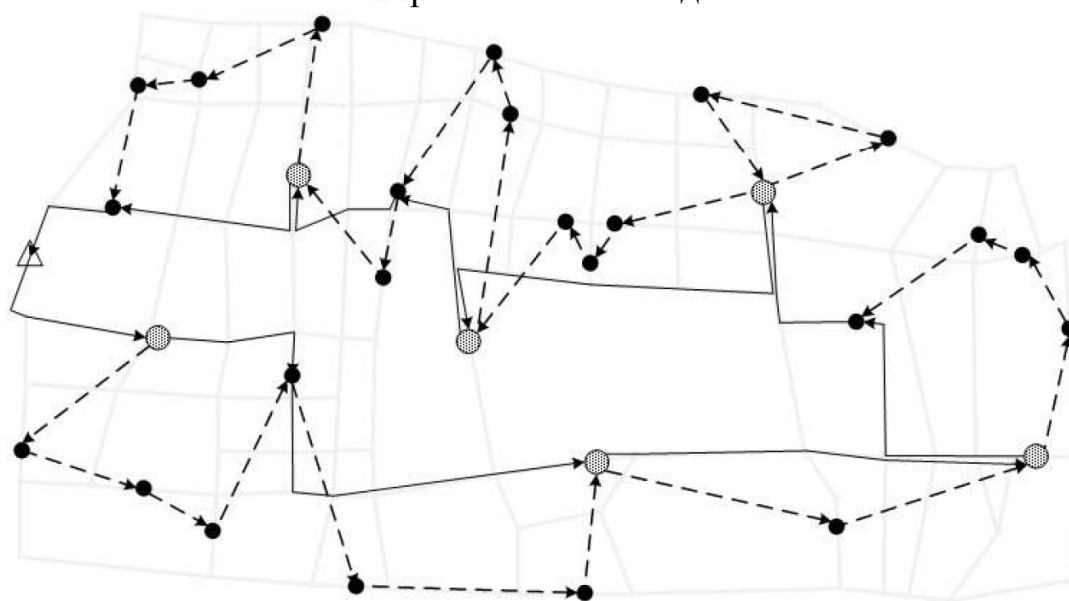
3.2.1 Аналіз чутливості. У тестах на чутливість враховуються три критичні фактори, а саме співвідношення легких посилок, ємність дрона щодо корисного навантаження та ємність заряду батареї дрона.

3.2.2 Аналіз впливу для співвідношення легких ділянок.

$\triangle$ Центр доставки $\bullet$ клієнти з важкими посылками $\bullet$ клієнти з легкими посылками
 $\leftarrow$ маршрут вантажівки $\leftarrow - -$ маршрут дрона



(а) розв'язок тільки для вантажівок



(б) кінцевий розв'язок для вантажівок і безпілотників

Рисунок 3.2 – Порівняння рішень для різних способів доставки

Під час генерування ваги посилок клієнтів визначається співвідношення легких посилок, що означає відсоток легких посилок менше 2,3 кг у всіх посылках. Щоб контролювати вплив цього співвідношення, порівняльні

експерименти проводяться з різними співвідношеннями від 0,50 до 0,95. Результати представлені на рис.3.3.

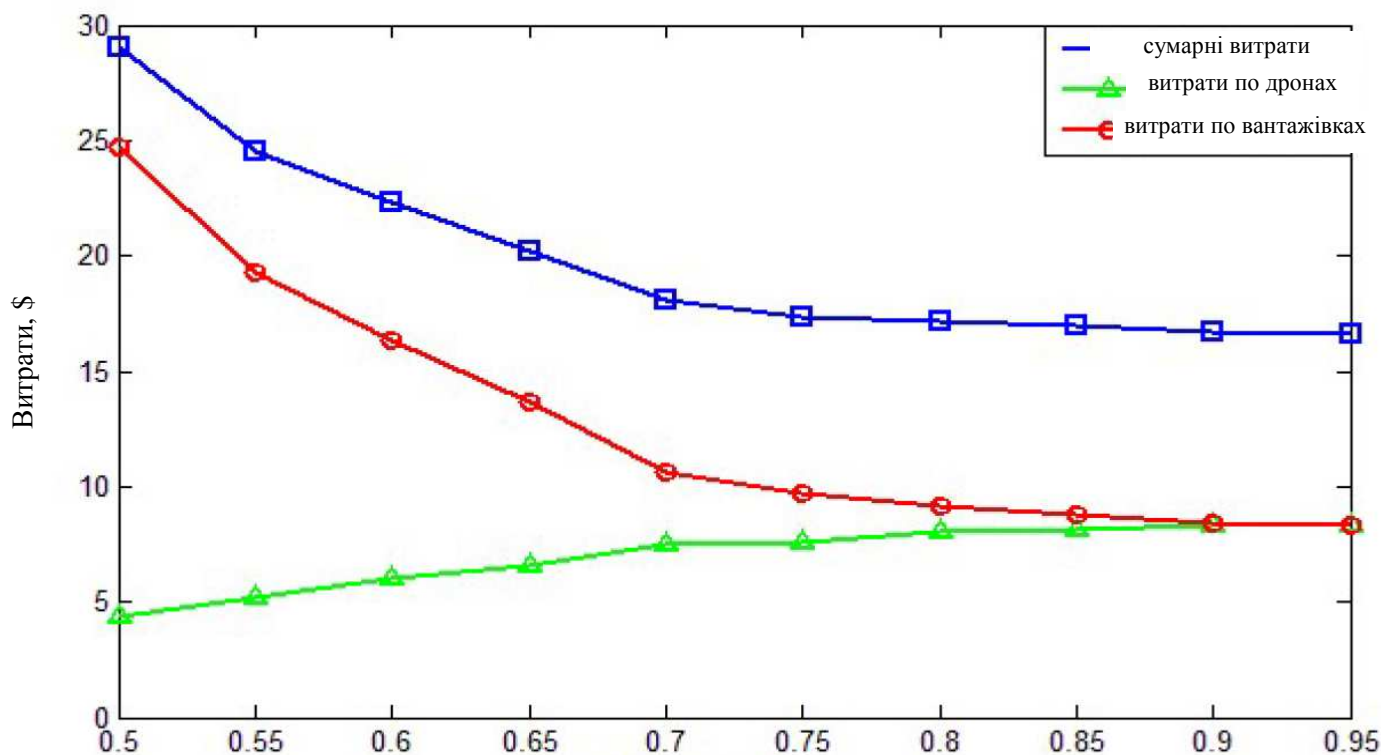


Рисунок 3.3 – Результати обчислень при різних співвідношеннях легких/важких посилок

Зі збільшенням коефіцієнта легких посилок загальна вартість витрат демонструє очевидне зниження з 29,07 до 16,63. І вартість, створена вантажівкою, також падає з 24,69 до 8,30, а вартість, створена дроном, зростає з 4,38 до 8,33. Можна зробити висновок, що зі збільшенням частки посилок у межах максимального корисного навантаження дрона дрон обслуговуватиме більше клієнтів, що може заощадити загальну вартість доставки. Крім того, коли коефіцієнт упаковки перевищує 0,8, витрати не змінюються. У цей час ємність корисного навантаження більше не обмежує доставку дрона, але витривалість стає основним обмеженням.

3.2.3 Аналіз впливу потужності дрона на корисне навантаження. Спосіб збільшення потужності дрона щодо корисного навантаження залежить від

того ж способу покращення співвідношення легких посилок, що може сприяти ефективності використання дрона. Таким чином, результат зміни корисного навантаження з 2 кг до 8 кг подібний до наведеного вище випробування, яке показано на рис. 3.4.

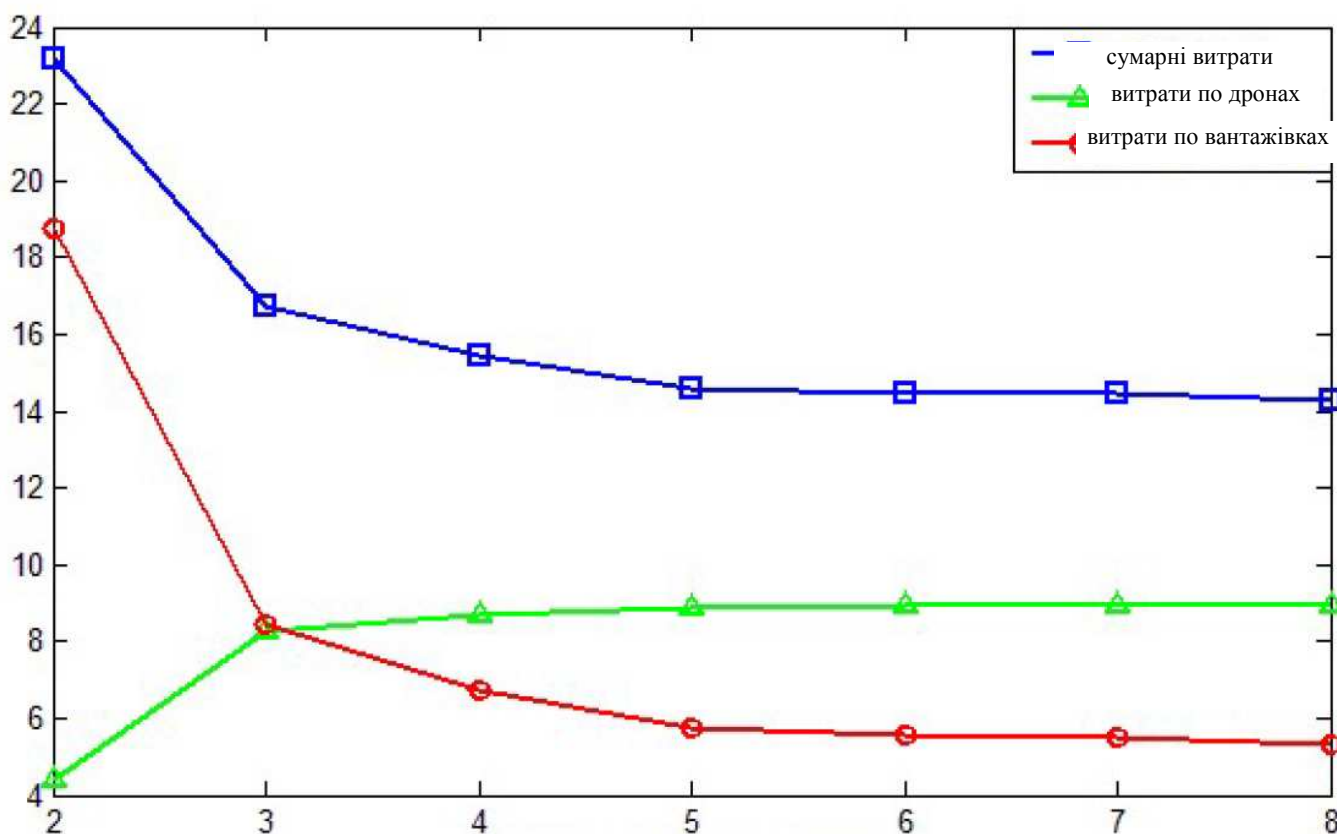


Рисунок 3.4 – Результати обчислень за різної потужності корисного навантаження дрона

Очевидно, що як загальна вартість, так і вартість вантажівки суттєво знизилася зі збільшенням вантажопідйомності дрона, особливо з 2,0 кг до 3,0 кг. Загальна вартість зменшується з 23,16 до 14,27, а для вантажівки – з 18,78 до 5,33. Це можна помітити що вартість дрона буде більшою, ніж вартість вантажівки з максимальним корисним навантаженням понад 3 кг, з чого можна зробити висновок, що доставка безпілотною відіграватиме важливу роль, якщо вона позбудеться обмежень вантажопідйомності. Однак, коли максимальне корисне навантаження дрона перевищує 5,0 кг, постійне

збільшення максимального корисного навантаження не призведе до значного зниження загальної вартості. Це тому, що обмеження на витривалість дрона обмежують його використання для доставки більшої кількості посилок одним маршрутом.

3.2.4. Аналіз впливу заряду акумулятора дрона. Щоб дослідити вплив ємності акумулятора дрона, тест на чутливість виконується таким чином, що єдиною відмінністю є заряд акумулятора від 4000 до 8000 мАг. Як показано на рис.3.5, коли ємність акумулятора збільшується з 3000 до 5500 мАг, загальна вартість зменшується в широкому діапазоні від 29,16 до 15,41.

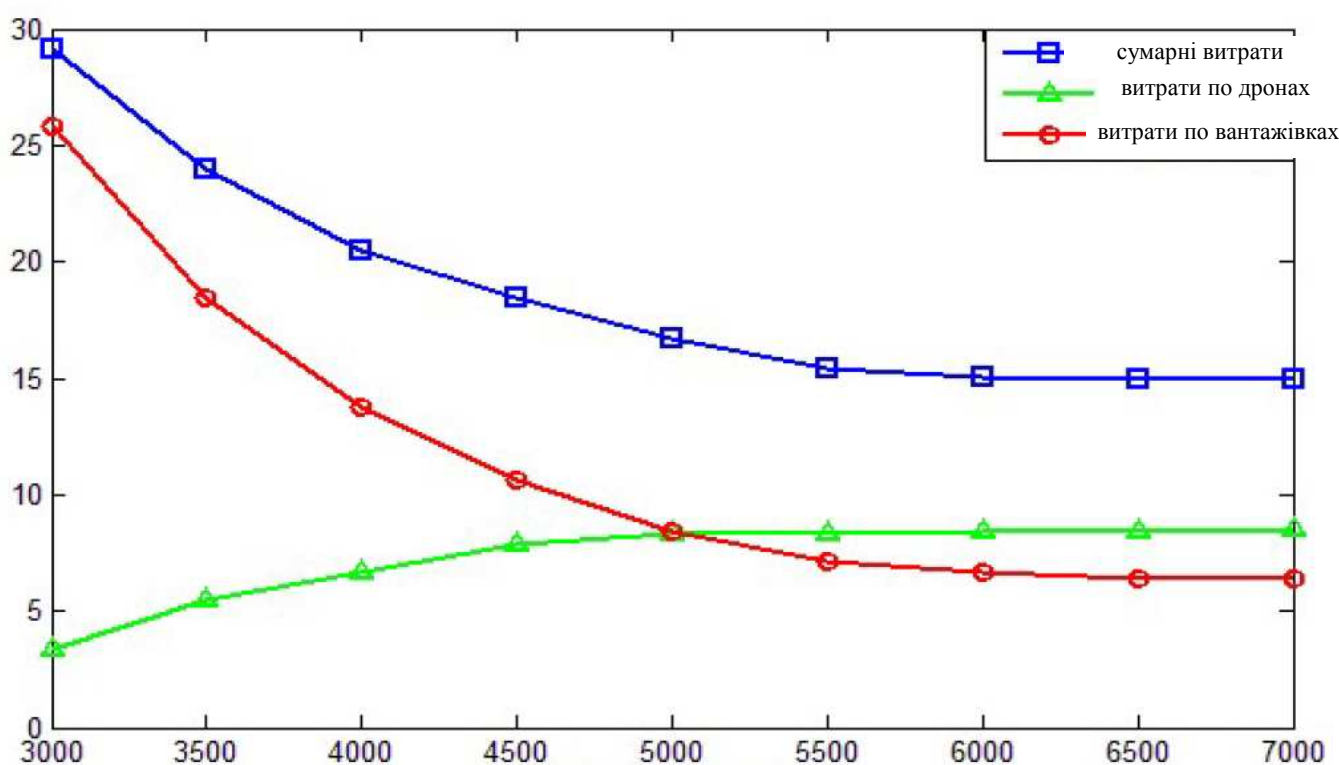


Рисунок 3.5 – Результати обчислень за різної ємності акумуляторної батареї дрона

Очевидно, що збільшення потужності батареї може бути ефективним способом зниження вартості доставки. Що стосується іншої частини вартості, то вартість вантажівки значно зменшується з 25,78 до 7,09, а вартість дрона зростає з 3,38 до 8,32. Однак загальна вартість в основному залишається

незмінною, коли ємність батареї перевищує 6000 мАг, оскільки витривалість дрона не буде основним обмеженням для доставки дрона. У цій ситуації, через обмеження корисного навантаження дрона, дрон не може обслуговувати більше клієнтів на одному маршруті, хоча потужності все ще достатньо.

3.3 Висновки

Оскільки безпілотник допускає доставку кількох посилок за один політ, досліджувану задачу можна розглядати як новий варіант двошелонної задачі маршрутизації. Крім того, оцінюється вплив корисного навантаження на енергоспоживання за допомогою запропонованої моделі енергоспоживання. Потім представлений алгоритм, заснований на моделюванні відпалу. Евристичний алгоритм, що поєднує алгоритм найближчого сусіда та алгоритм збереження, призначений для створення початкового рішення. І локальний пошук змінної виконується з операторами видалення та оператором вставки на кожній ітерації, щоб знайти краще рішення.

Проведені тестові експерименти за методикою рандомізації з різними масштабами, які показали ефективність запропонованого алгоритму [19]. Крім того, у тестах чутливості на основі практичного випадку враховуються три фактори, а саме співвідношення легких посилок, максимальне корисне навантаження дрона та заряд акумулятора дрона. Експериментальні результати показують, що використання дрона може заощадити більше коштів, коли для доставки є більше легких посилок. Крім того, належне вдосконалення технологій для збільшення ємності корисного навантаження дрона та заряду батареї допоможе заощадити на доставці.

Останніми роками в доставці посилок використовується дрон, який співпрацює з вантажівкою. Є багато дослідницьких тем, які не вивчаються в галузі дослідження управління та експлуатації, наприклад, проблеми маршрутизації двох ешелонів вантажівок і безпілотників із часовим вікном, кількома транспортними засобами та кількома складами. Більше цікавих і

цінних варіантів цієї проблеми чекають свого дослідження. Через складність оптимізації двоешелонних маршрутів у майбутній роботі також необхідно розробити більш ефективні алгоритми.

4 ПІДСТАВИ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБКИ

4.1 Загальні підходи і основні методи вирішення задач керування і їх порівняльні оцінки

Призначення завдань безпілотникам — це проблема призначення набору завдань (або цілей, доставки) набору безпілотників відповідно до певних знань про навколишнє середовище та вимог до завдань. Кількість завдань не обов'язково повинна дорівнювати кількості дронів [11]. Призначення завдань безпілотникам є важливою проблемою в таких сферах застосування, як логістика безпілотників, військові місії та операції з ліквідації наслідків стихійних лих. Загальна мета – мінімізувати вартість, задовольняючи заданий набір обмежень [21].

Подібно до звичайних задач розподілу завдань, формулювання транспортними системами є поширеним підходом до моделювання проблем розподілу завдань для дронів. Декілька методів, які використовуються для вирішення проблеми призначення завдань безпілотникам, – це генетичний алгоритм [17], генерація стовпців [29], оптимізація рою частинок, метод крос-ентропії (КЕ) у поєднанні з алгоритм розгалуження та зв'язку [22], високоефективна штучна імунна система [23] та ієрархічна структура в динамічному середовищі [12].

У цьому розділі ми коротко представляємо інші проблеми, пов'язані з впровадженням безпілотних літальних апаратів, які досі не розглянуті. Зокрема, проблеми щодо встановлення зв'язків, збір даних, розташування об'єкта та формування групи транспортування.

Безпілотники можна використовувати для встановлення зв'язку між базовою станцією та мобільними пристроями. Коли приймаються рішення про розгортання безпілотника, слід розглянути місця, які мінімізують комунікаційні перешкоди, де діє теорія ймовірності.

Крім того, споживання енергії є типовими характеристиками дронів. У нещодавньому дослідженні запропоновано розгортання дронів для

забезпечення зв'язку в зоні лиха з використанням алгоритму відповідної гри [22]. Дрони також можуть бути корисні для збору даних у бездротовій сенсорній мережі (БСМ), де стаціонарні бездротові датчики повинні передавати дані про навколишнє середовище на базову станцію через дрони. Операції маршрутизації дрона повинні враховувати кількість прямих передач інформації, які називаються стрибками, між вузлами (сенсором або дроном) або базовою станцією (рис.4.1). Через обмежену дальність зв'язку датчики або здійснюють передачу з двох стрибків (датчик-дрон-база) (рис.4.2).

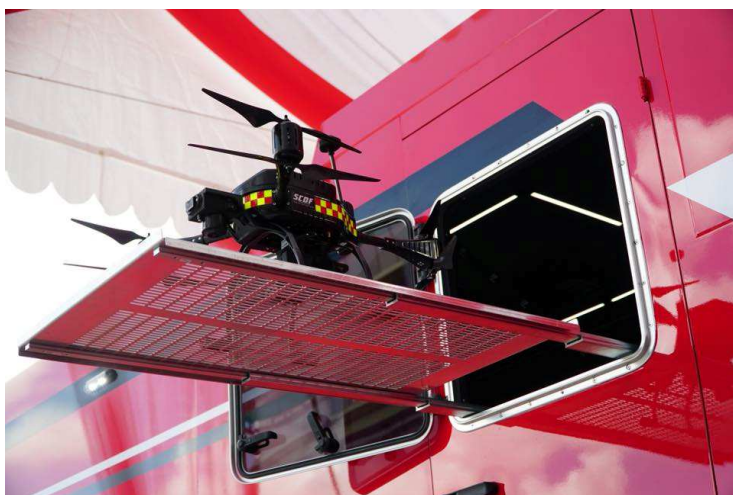


Рисунок 4.1 – Використання дрона на боковій панелі пожежного автомобіля



Рисунок 4.2 – Поштовий гібридний автомобіль + дрон



Рисунок 4.3 – Водій завантажує дрон через клітку, підвішену до днища дрона, яка тягнеться до задньої частини вантажівки

Тест, який проводився в США, штат Флорида, включав октокоптер Workhorse HorseFly для доставки вантажів, складається з прикріпленого до даху однієї з лінійки електричних/гібридних вантажівок Workhorse. Дрон HorseFly може перевозити пакунки вагою до 10 фунтів (4,5 кг) і має час польоту 30 хвилин. Він також перезаряджається, коли встановлений на даху вантажівки [15].

Октокоптер Workhorse HorseFly відправляється в дорогу разом з вантажівкою. Це випробування відрізняється від усього, що проводили раніше з безпілотниками. Це має наслідки для майбутніх поставок, особливо в сільській місцевості, де вантажним автомобілям часто доводиться долати відстані, щоб здійснити одну доставку. Якщо уявити трикутний маршрут доставки, де зупинки розташовані за км одна від одної дорогою. Надсилання дрона з вантажного автомобіля, щоб зробити лише одну таку доставку може скоротити дорогі маршрути [33].

Фірма UPS підрахувала, що скорочення маршруту водія лише на одну милю (1,6 км) на день заощадило б компанії до 50 мільйонів доларів США на рік і було б корисним для маршрутів доставки в сільській місцевості, які є

дорожчими та займають більше часу, ніж доставки в населених пунктах області.



Рисунок 4.4 – Вантажний дрон



Рисунок 4.5 – Вантажівка з дроном



Рисунок 4.6 – Відправка посилки дроном

У світі, де керують швидкість і ефективність, і де обсяги посилок уже досягли неймовірного рівня, Пол Вілліс запитує, чи існує якийсь сценарій, за якого доставка повітряними дронами дійсно має сенс. Засновник Amazon Джефф Безос заснував ритейлер в орендованому гаражі в штаті Вашингтон, перетворивши його на одну з найбільших компаній на планеті. І все ж для людини, яка зробила, здавалося б, неможливе реальністю, є одна мрія, яку він ще не здійснив [8].

Через десять років після інтерв'ю американській телерадіокомпанії CBS, у якому Безос передбачив, що нам залишилося всього чотири-п'ять років до доставки безпілотниками «останньої милі», його мета заселити небо наших містечок дронами Amazon все ще здається довгою/

4.2 Досвід керування у світі

Ян Керр, засновник і ведучий подкасту Postal Hub, не здивований відносною невдачею мрії про доставку безпілотником «останньої милі», яка, за його словами, ніколи не мала економічного сенсу. «Була фантазія про доставку безпілотником, що це буде звільняючим, швидким і екологічно чистим», — каже Керр. «А реальність така, що у вас є ця машина, яка

дзижчить, яка доставляє одну річ за раз на останній милі, і це не дуже ефективний спосіб займатися справами».

Існують випадки використання безпілотних літальних апаратів, коли безпілотник є найкращим способом доставки або де дуже важко ефективно чи результативно доставляти будь-які інші засоби. Доставка дронами має знайти свою нішу, де вона буде ефективною та прибутковою, а не заважатиме людям, які живуть поблизу траєкторії польоту.

Як приклад однієї з цих ніш він вказує на американського виробника безпілотників Zipline, чий літак розгортається для перевезення крові та інших необхідних медичних вантажів в Африці на південь від Сахари. У вересні компанія Zipline, яка є одним із партнерів Walmart із виробництва дронів, отримала дозвіл від Федерального авіаційного управління США (FAA) на здійснення польотів за межами прямої видимості (BLOS) у повітряному просторі США, відкривши для компанії шлях до поставки туди.

Zipline нещодавно представила гвинтокрилий безпілотник наступного покоління, але важливо зазначити, що до цього часу більшість його операцій виконувалися за допомогою безпілотника, схожого на планер під назвою P1 Zip. Конструкція P1 Zip з фіксованим крилом, здатна здійснювати польоти туди й назад на відстань 193 км, означає, що йому потрібна посадкова смуга для зльоту та посадки. Ця вимога до посадки робить дрони непридатними для доставки на останню милю. Однак вони споживають менше енергії, ніж гвинтокрилі дрони, а це означає, що їх можна побудувати більшими.

Існує два випадки використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для доставки посилок: доставка за фактичними адресами людей і масове переміщення пошти. Ми зосередилися на останньому. По-перше, це небажання замінити поштових перевізників, які, будучи обличчям доставки «останньої милі», залишаються однією з наших найбільших переваг. Друга причина – безпека. Якщо ви летите між двома фіксованими точками, ви, очевидно, можете керувати ризиком набагато легше, ніж якщо ви летите до мультипл.

ВИСНОВКИ

1. У цій роботі ми надали обширний огляд літератури з дослідження операцій щодо проблем двоешелонної маршрутизації, тобто класу проблем, які вивчають оптимальну маршрутизацію вантажів у двоешелонних системах розподілу.
2. Дана область досліджень привертає все більшу увагу як практиків, так і науковців через відповідні додатки в реальному житті (серед іншого, міська логістика та мультимодальний транспорт) та інтелектуальні виклики, які ставить їх дослідження. Ми класифікували літературу про проблеми маршрутизації двох ешелонів на три класи: задачі маршрутизації розташування двох ешелонів, задачі маршрутизації транспортних засобів у два ешелони та задачі маршрутизації вантажівок і причепів. Для кожного класу задач ми надали загальний опис, формально представили основну проблему класу, визначили основні варіанти, вивчені в літературі, і розглянули найбільш точні та евристичні підходи до вирішення, запропоновані. Незважаючи на його важливість для практичного застосування, ця область досліджень все ще є відносно невивченою. Більшість внесків, наведених у цьому огляді, зосереджені на основних проблемах і пропонують евристичні підходи до вирішення. Отже, перспективними напрямками дослідження є, з одного боку, дослідження варіантів основної проблеми, що містять більш реалістичні ознаки, а з іншого боку, розробка точних методів.
3. Лише в кількох роботах розглядаються варіанти основних задач, де враховується час. Наприклад, лише кілька авторів досліджували варіанти задач із часовими вікнами або варіанти, де задано обмеження на загальну тривалість кожного маршруту. Інші варіанти, які варто дослідити, це двоешелонна маршрутизація місця розташування та проблеми двоешелонної маршрутизації

транспортного засобу з обмеженнями супутникової синхронізації. У цих варіантах вводяться часові обмеження на прибуття транспортних засобів до супутника таким чином, що коли основний транспортний засіб вивантажує свій вантаж, він негайно завантажується на вторинний транспортний засіб. Такі обмеження синхронізації моделюють доставку швидкопсувних товарів (наприклад, заморожених продуктів), коли вантаж потрібно безперервно переміщувати з одного транспортного засобу до іншого. Іншим цікавим варіантом двоешелонної задачі маршрутизації транспортних засобів є її версія з кількома депо, тобто більше одного депо доступне для обслуговування безпілотників у першому ешелоні. Що стосується проблеми маршрутизації вантажівки та причепа, з одного боку, більш реалістичні версії проблеми повинні враховувати вартість (та/або витрачений час) на перенесення вантажу між вантажівкою та її причепом, а також на приєднання та від'єднати причіп. З іншого боку, розвиток точних методів на даний момент є дуже обмеженим і також є цікавою областю досліджень. Нарешті, дослідження динамічних версій задач і стохастичних моделей також видаються перспективними напрямками досліджень.

4. Безпілотники — це одна з нових технологій, яка одночасно надає можливості та виклики. Зокрема, деякі сфери застосування, які страждають від, наприклад, високої вартості робочої сили, небезпечного робочого середовища та недоступності, можуть отримати значну вигоду від розгортання безпілотників, зокрема моніторинг дикої природи, ліквідація наслідків стихійних лих, екстрена доставка медикаментів, перевірка інфраструктури. , і т. д. Для максимізації таких потенційних переваг обов'язковою умовою є добре спланована робота дронів із застосуванням найсучасніших методів оптимізації.

5. Відзначимо, що ефективність і ефективність застосування дронів на транспорті можна значно підвищити, якщо дрони поєднати з іншими транспортними засобами, наприклад, вантажівками.
6. Дослідження взаємодії вантажівок з дронами все ще знаходяться на початковій стадії, і потрібен деякий час, щоб дослідження зріло.
7. Дослідження поточного статусу досліджень може мати вирішальне значення для розуміння сучасного стану та визначення майбутніх напрямків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гриняк Д. Г. Характеристика видів транспорту в логістиці. *Матеріали X Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти за підсумками досліджень у 2022 р.* (6-10 лютого 2023, м. Мелітополь). Мелітополь: ТДАТУ, 2023. 252 с.
2. Деркач Е. М. Д Концептуальні засади господарсько-правового регулювання транспортної діяльності: монографія. Вінниця. ДонНУ імені Василя Стуса, 2021. 376 с.
3. Кузьменко С. В. Сучасні тенденції розвитку логістики в Україні: аналітичний погляд на успіхи компанії «Нова Пошта». *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення* випуск 83: матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції, (Тернопіль, Україна, м. Ополе, Польща, 7-8 грудня 2023 р.) Тернопіль: ФО-П Шпак ВБ 2023. 198 с.
4. Кучеренко О. І. Огляд можливостей доставки вантажів за допомогою дронів [Електронний ресурс]. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 28-30 листопада 2023 р.* / гол. Є. І. Сокол ; оргком.: Р. П. Мигущенко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. Електрон. текст. дані. Харків, 2023. С. 108-109.
5. Мельник, А. В. Метод автоматизованого планування маршрутів пересування безпілотних транспортних засобів на базі мурашиного алгоритму : кваліфікаційна робота магістра : 122 *Комп'ютерні науки*. Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький. 2022. С. 11 – 19.
6. Пономаренко, І. О., Тарасов, В. А., Ігнатченко, А. С., Химченко, Ю. В., Ковальов, Б. Л. Економічна ефективність використання дронів у сільському господарстві. *Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка*. 2021. № 4. С. 235–240. DOI: 10.21272/1817-9215.2021.4-27.

7. Tesla почала випуск повністю автономних автомобілів [Електронний ресурс]. Українська правда. 2016. Режим доступу : <http://www.epravda.com.ua/news/2016/10/22/608728/>.
8. Експерти прогнозують різке зростання кількості безпілотних автомобілів в недалекому майбутньому [Електронний ресурс]. Новое время. 2016. Режим доступу : <http://nv.ua/ukr/techno/auto/eksperti-prognozujut-rizke-zbilshennja-kilkosti-bezpilotnih-avtomobiliv-vnedalekomu-majbutnomu-145045.html>.
9. Остапенко В. Технології майбутнього: дрони в сільському господарстві [Електронний ресурс] Режим доступу : <http://agravery.com/uk/posts/show/tehnologii-majbutnogo-droni-vsilskomu-gospodarstvi>.
10. Безпілотний транспорт позбавить роботи 3 млн. далекобійників [Електронний ресурс]. 2017. Режим доступу : <http://expres.ua/news/2017/09/28/264292-bezpilotnyy-transport-pozbavyt-roboty-3-mln-dalekobiynykiv-ssha-ministr>
11. Agatz N., Bouman P., Schmidt, M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*. 2018. 14(192). P. 45-62.
12. Beenish, Hira, et al. A Novel Markov Model-Based Traffic Density Estimation Technique for Intelligent Transportation System. *Sensors* No 23.2. 2023. P. 768.
13. Cachon G. P. Retail store density and the cost of greenhouse gas emissions. *Management Science*, 2014. No 60(8). P.1907-1925.
14. Choi Y., Schonfeld P. M. Optimization of multi-package drone deliveries considering battery capacity. In *Proceedings of the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, (2017, January). Washington, DC, USA P. 8-12.

15. Chung S. H., Bhawesh S., Lee J. Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. *Computers & Operations Research*. 123. 2020. P. 105004.
16. D'Andrea R. Guest editorial can drones deliver. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014. No 11(3). P. 647-648.
17. Dorling K., Heinrichs J., Messier G. G., Magierowski S. Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017. No 47(1). P. 70-85.
18. El-Bouri A., Azizi N., Zolfaghari S. A comparative study of a new heuristic based on adaptive memory programming and simulated annealing: The case of job shop scheduling. *European Journal of Operational Research*, 2007. No 177(3). P. 1894-1910.
19. Freitas J. C., Penna, P. H. V. A Randomized Variable Neighborhood Descent Heuristic to Solve the Flying Sidekick Traveling Salesman Problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2018. No 66. P. 95-102.
20. Ham A. M. Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time- window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018. No 91. P. 1-14.
21. Ha Q. M., Deville Y., Pham Q. D., Hà M. H. On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018. No 86. P. 597-621.
22. Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P. Optimization by simulated annealing. *science*, 1983. No 220(4598). P. 671-680.
23. Lin S. W., Vincent F. Y., Chou S. Y. Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic. *Computers & Operations Research*, (2009). 36(5), P. 1683-1692.
24. Luo Z., Liu Z., Shi J. A two-echelon cooperated routing problem for a ground vehicle and its carried unmanned aerial vehicle. *Sensors*, 17(5), 2017. P. 1144.

25. Maini P., Sujit, P. B. On cooperation between a fuel constrained UAV and a refueling UGV for large scale mapping applications. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015 International Conference. p. 1370-1377.
26. Murray C. C., Chu, A. G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015. No 54. P. 86-109.
27. Savuran H., Karakaya M. Route optimization method for unmanned air vehicle launched from a carrier. *Lecture Notes on Software Engineering*, 2015. No 3(4). P. 279.
28. Shetty V. K., Sudit M., Nagi R. Priority-based assignment and routing of a fleet of unmanned combat aerial vehicles. *Computers & Operations Research*, 2008. No 35(6). P. 1813-1828.
29. Song B. D., Park K., Kim, J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 2018. No 120. P. 418-428.
30. Sundar K., Rathinam S. Algorithms for Routing an Unmanned Aerial Vehicle in the Presence of Refueling Depots. *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, 2014. No 11(1). P. 287-294.
31. Vahidi A., Sciarretta A. Energy saving potentials of connected and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 95. 2018. P. 822-843.
32. Tsugawa S., Jeschke S., Shladover Se. A review of truck platooning projects for energy savings. *IEEE Trans Intell Vehicles*. 2016. No 1(1). P. 68-77.
33. Weng Y., Rong-Yu Wu, Yu-Jun Zheng. Cooperative Truck–Drone Delivery Path Optimization under Urban Traffic Restriction. *Drones* 7.1. 2023. No 59. P.238-250.