

Система оптимального управління маршрутами літальних засобів з урахуванням точок приземлення

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Досліджено проблему маршрутизації транспортних засобів, зокрема безпілотників, з використанням алгоритмів, таких як детермінований локальний пошук та заборонений пошук. Робота висвітлює перехід безпілотників з військового використання в цивільні сфери, зокрема в доставку пакетів.

Ключові слова: маршрутизація транспортних засобів, безпілотники, детермінований локальний пошук

Abstract

The problem of routing transportation vehicles, particularly drones, using algorithms such as deterministic local search and forbidden search, has been investigated. The work highlights the transition of drones from military applications to civilian sectors, specifically in package delivery.

Keywords: transportation vehicle routing, drones, deterministic local search, forbidden search.

Вступ

Аналіз поточного стану завдань маршрутизації транспортних засобів та завдань маршрутизації БПЛА полягав у докладному огляді літератури та наукових публікацій, спрямованих на вивчення проблем маршрутизації транспортних засобів та використання БПЛА в цьому контексті. Також було проаналізовано історію розвитку проблеми, включаючи роботи Джорджа Данцига та Джона Рамсера, які відзначилися в 1959 році.

У ході огляду доступних методів вирішення проблем маршрутизації транспортних засобів за наявності кількох стоянок було проведено дослідження різноманітних підходів, враховуючи різні види стоянок чи точок видаленого обслуговування. Також було визначено переваги та недоліки різних методів, охоплюючи традиційні та інноваційні рішення.

У рамках розробки алгоритмів для вирішення задачі маршрутизації дронів за наявності кількох складів було створено низку алгоритмів для ефективного вирішення цієї задачі. Досліджено різні методи, такі як детермінований локальний пошук, заборонений пошук, алгоритм імітації відпалу та алгоритм прискореного імовірного моделювання.

Ці дослідження визначили ключові аспекти проблеми маршрутизації транспортних засобів у зв'язку з використанням БПЛА та надали конкретні алгоритмічні рішення для оптимізації маршрутів, що допомагає ефективніше використовувати ці нові технології у практиці.

Результати дослідження

1.1 Класифікація задач маршрутизації транспортних засобів

Проблема маршрутизації транспортного засобу (VRP) — це завдання пошуку найкращого маршруту транспортування товарів, об'єктів дослідження тощо від початкової точки до пункту призначення. Метою такого завдання є пошук набору маршрутів, які обслуговують клієнтів із певною кількістю ТЗ у заданому середовищі.

1.1.2 Задача маршрутизації в загальному вигляді

Класичний ЗМТЗ належить до класу комбінаторних задач [4]. Його можна виразити у вигляді графіка $G(V,E)$,

Де $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ - множина вершин (v_0 - склад, $v_1; \dots, v_n$ - точка доставки, клієнт); E - множина ребер, що відповідає шляху $\{(v_i, v_j) | i \neq j\}$;

C – матриця ваг ребер (вартості шляху) c_{ij} між вершинами, m – кількість транспортних засобів, які беруть участь у перевезенні вантажів;

R_i маршрут i -го автомобіля ($i=1, m$);

$C(R_i)$ – вартість маршруту R_i ;

q_i кількість товару для відвантаження в i -ту точку доставки.

Кожна вершина v_i пов'язана з певною кількістю товару, який необхідно доставити клієнту у відповідну точку доставки. Завдання маршрутизації полягає у визначенні набору маршрутів з мінімальною вартістю (відповідно до значення m - кількості ТК), щоб кожна вершина була відвідана лише один раз одним ТК. Усі маршрути мають починатися й закінчуватися на сайті v_0 .

Рішення проблеми полягає в тому, щоб розділити множину V на підмножини (шляхи) і вказати порядок обходу вершин на кожній підмножині (розташування вершин шляху). Рішення задачі є прийнятним, якщо всі шляхи задовольняють додатковим обмеженням задачі. Цільовою функцією (TF) є загальна вартість перевезення:

$$F_{VRP} = \sum_{i=1}^m C(R_i), \quad (1.1)$$

де $C(R_i)$ - сума вартості шляху (ваги країв) маршруту R_i .

У класичному варіанті ЗМТЗ необхідно знайти прийнятне рішення з мінімальними витратами. Часто в реальних ЗМТЗ виникає багато додаткових обмежень, що призводить до подібного набору проблем.

1.1.3 Найбільш поширені класи задач маршрутизації транспортних засобів

Однією з найпростіших ЗМТЗ є задача комівояжера (ТСП). Він полягає в знаходженні найкоротшого Г-гамільтонового циклу на графіку. Тобто агент повинен один раз пройти всі вершини графа, а потім повернутися до початкової вершини з найменшою пройденою відстанню або найменшим витраченим часом.

Існує багато типів ЗМТЗ: обмеження пропускної здатності, «часові вікна», альтернативні динамічні склади, повернення та доставка товарів, різні транспорти, маршрути за розкладом тощо. У літературі існує багато різних класифікацій занять ЗМТЗ. Рисунок 1.1 показує одну з таких можливих ієрархій.

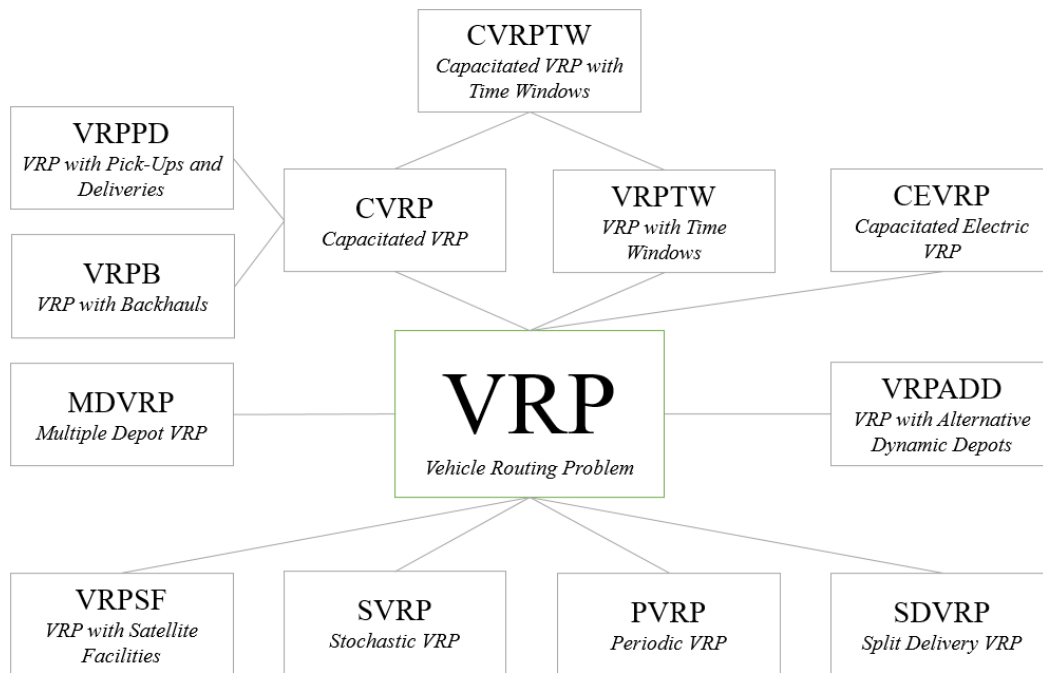


Рисунок 1.1 - Ієрархія основних класів ЗМТЗ

Розглянемо докладніше кожен із типів задач, зображених на рисунку 1.1.

Здатний VRP, CVRP [5]. Іншим обмеженням проблеми є те, що маса вантажу на кожному маршруті не повинна перевищувати заданого значення обсягу вантажу, який необхідно доставити в певну точку. Метою такого завдання є мінімізація загальної вартості перевезення. Задачі маршрутизації з обмеженнями навантаження можна розширити додатковими обмеженнями і отримати принципово нові класи задач.

VRP Pickup and Delivery (VRPPD) [6, 7]. Ця проблема відрізняється від класичної проблеми тим, що клієнт у пункті доставки може повернути товар, який транспортний засіб повинен привезти назад у двір. Умовою повернення товару є те, що транспортний засіб не має бути перевантаженим, тобто має бути врахована вантажопідйомність. Такі ЗМТЗ складно вирішувати, оскільки вони породжують багато проблем: можливість неефективного використання транспорту, збільшення вартості маршруту та загальної кількості транспортних засобів у депо тощо. Для простоти прийнято розглядати задачі з додатковими обмеженнями. Наприклад, товар відправляється тільки в пункт видачі і тільки повертається на склад, тобто обмін товаром між пунктами видачі не відбувається. Ще один спосіб спростити – зняти обмеження про те, що всі точки доставки можна відвідувати лише один раз. Є й інший спосіб: припустимо, що вантажівки спочатку доставляють усі вантажі, а потім починають забирати їх із пункту доставки (VRP з Backhauls, VRPB, описано нижче). Ціль місії: мінімізація транспортних витрат і розміру автопарку. Обмеження: кількість товарів, які доставляються та забираються від клієнтів, не може перевищувати вантажопідйомність транспортного засобу в будь-якій точці маршруту. Однією зі складних проблем VRRPD є гетерогенна VRP зі змішаними транзитними та часовими вікнами (HVRPMBTW) [8]. Завдання характеризується обмеженим обсягом традиційних знань, різними можливостями та витратами.

VRP with backhaul (VRPB) [9, 10]. У попередньому завданні VRRPD вам потрібно було врахувати, що всі товари, які повертатиме клієнт, мають відповідати ТЗ. Але місія VRPB інша: усі товари мають бути доставлені, перш ніж клієнти зможуть їх повернути. Це пояснюється тим, що більшість ТК зазвичай завантажуються ззаду або зверху, утворюючи стопку. Тому переставляти товар під час кожної доставки економічно не вигідно.

VRP з часовими вікнами (VRPTW) [11]. Основним обмеженням цього завдання є те, що ТЗ має доставити товар протягом певного часу. Такі завдання мають верхній і нижній ліміт часу. Тому, якщо товар буде доставлено в це місце після обмеженого часу, вони не зможуть прийняти товар, інакше його оштрафують. Якщо ТЗ доставить товар раніше нижньої межі, то він повинен почекати. Метою цього завдання є мінімізація загальної вартості транспортування, розміру автопарку та загального

часу очікування. Такі завдання допомагають визначити найкращий час для від'їзду транспортного засобу зі стоянки та уникнути простою. Подальшим розвитком проблеми VRPTW є розв'язання VRP за допомогою Backhauls and Time Windows (VRPBTW). Проблема включає пропускну здатність, окупність продукту, часові вікна та вирішується за допомогою гібридного метаевристичного алгоритму. Метою є мінімізація загальної відстані транспортування [12]. Інша проблема полягає в тому, що VRP забезпечує м'які часові вікна для багатьох типів традиційних знань і контролює забруднення навколишнього середовища від транспортування. Мета полягає в тому, щоб дослідити взаємозв'язок між витратами на розподіл, задоволеністю клієнтів і забрудненням навколишнього середовища. Для вирішення цієї проблеми був розроблений гібридний генетичний алгоритм, результати якого показали, що швидкість транспортного засобу має сильну кореляцію з експлуатаційними витратами та забрудненням навколишнього середовища, тоді як вантажопідйомність впливає на експлуатаційні витрати, задоволеність споживачів та забруднення навколишнього середовища [13].

Можливий VRP із часовими вікнами (CVRPTW). Якщо ми поєднаємо ЗМТЗ з обмеженнями потужності та «часовими вікнами», ми матимемо такий тип проблеми. Вони будуть враховувати вантажопідйомність транспортного засобу та часові обмеження, протягом яких товар повинен бути доставлений.

ЗМТЗ має кілька складів (багатоскладські ВРП, МДВРП) [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Це завдання вимагає розподілу клієнтів по різних складах найбільш вигідним способом і визначення найкращих маршрутів доступу до них. Кожен склад має власний парк транспортних засобів, кожен з яких обслуговує клієнтів, а потім повертається. Метою таких місій є мінімізація транспортних витрат і розміру флоту. У деяких випадках може бути кілька складів, які обслуговують клієнтів. Якщо клієнти зосереджені біля кожного складу, то завдання можна розділити на кілька незалежних завдань. Але якщо клієнти і склади знаходяться в будь-якому місці, то потрібно шукати рішення ЗМТЗ з декількома складами.

ЗМТЗ має можливість перезавантаження (ВРП із супутниковими засобами, ВРПСФ) [23]. Особливістю класичного ЗМТЗ є те, що транспортні засоби при проходженні маршруту повинні починати і закінчувати маршрут в депо. Це пов'язано з обмеженою вантажопідйомністю: вантажівка повинна бути перевантажена після того, як буде доставлений весь вантаж. Для деяких завдань вигідно перевантажувати машину безпосередньо на маршруті без повернення в депо. Цього можна досягти за допомогою додаткових традиційних знань. Типовою ситуацією є велика кількість клієнтів, які бажають регулярних поставок від центрального постачальника. Метою задачі є мінімізація витрат на транспортування протягом заданого часу. Можливим недоліком цієї проблеми є те, що загальна вартість вирішення проблеми є вищою в короткостроковій перспективі, ніж у випадку зі звичайним VRP через додаткові витрати на додаткові ТК.

ЗМТЗ (Random VRP, SVRP) з випадковими даними [24, 25]. Для цього типу ЗМТЗ характерна випадкова поведінка окремих компонентів задачі. Випадковість виражається як: випадкові клієнти - кожна точка розподілу є значенням ймовірності; Випадкові запити - кількість товарів, які потрібно доставити клієнту, і відстань між пунктами доставки є випадковими значеннями. Вирішення таких завдань відбувається в два етапи. На першому етапі рішення отримують без урахування інших змінних. На другому етапі попередньо отриманий розв'язок коригується за випадковими значеннями. Мета задачі - мінімізація загальної вартості транспортування. Якщо деякі точки доставки невідомі, повинні бути накладені додаткові обмеження: певні умови виконуються із заданою ймовірністю, або повинна бути побудована модель корекції, яка буде виконуватися, коли певні обмеження порушуються. Наприклад, у задачі СВРП про повернення товарів і обмеження вантажопідйомності транспортного засобу методом корекції буде: повернення в депо при перевантаженні транспортного засобу, повернення на маршрут після розвантаження, повернення в депо при перевантаженні транспортного засобу і потім знову оптимізуйте маршрут, що залишився; навіть якщо транспортний засіб не повністю завантажений, заплануйте повернення в гараж якомога раніше. Для такої модифікованої моделі вирішення проблеми може залежати від кількості зібраного товару та відстані до складу. Якщо вантажопідйомність наступного клієнта перевищує вантажопідйомність транспортного засобу, транспортний засіб може повернутися в депо.

ЗМТЗ (Періодичний ВРП, ПВРП) з періодичною маршрутизацією [26]. Такі завдання характеризуються розширеними термінами планування від одного до кількох днів. Метою цієї місії є мінімізація транспортних витрат і розміру автопарку. Додаткові обмеження: транспортний засіб може бути повернено в гараж в іншу дату, ніж дата його вибуття; кожному точку доставки необхідно відвідати

принаймні один раз протягом M -днів. Кожна заявка клієнта повинна бути виконана одним ТЗ за одне відвідування. Якщо плановий період $M = 1$, то задача спрощується до класичної ВРП. Кожна точка розподілу в періодичній задачі маршрутизації має бути відвідана k разів, і $1 < k < M$. У класичному PVRP щоденні замовлення клієнта є фіксованими. Тому таку задачу можна розглядати як задачу щоденного складання набору маршрутів, якщо маршрути задовольняють обмеженням і загальна вартість перевезення мінімізована.

ЗМТЗ має різні способи доставки (Split Delivery VRP, SDVRP) [27, 28]. Принципова відмінність таких завдань полягає в тому, що пункт доставки може обслуговуватися декількома ТЗ, якщо це зменшить загальну вартість транспортування. Типовим прикладом проблеми цього типу є великий обсяг замовлення при малій вантажопідйомності автомобіля. Метою цієї місії є мінімізація транспортних витрат і розміру автопарку.

VRP з альтернативним динамічним складом (VRPADD) [29, 30]. Сферою застосування для таких завдань є ЗМТЗ, де в якості ТЗ виступає дрон або інша мобільна роботизована система. Особливість цього виду місії полягає в тому, що транспортний засіб може почати і завершити свій маршрут в мобільному гаражі. Такі завдання пов'язані з військовою і морською діяльністю. Вантажопідйомність не відіграє ключової ролі при оптимізації маршрутів (наприклад, при аерофотозйомці). Важливі обмеження на системні ресурси: кількість палива або ємність акумулятора;

ЗМТЗ використовує електротранспорт і має обмежену вантажопідйомність (Capacitated Electric VRP, CEVRP). З розвитком електромобілів кількість зарядних станцій і запас ходу електромобілів обмежені, а потім виникають проблеми з дорогою. У такому завданні необхідно враховувати не лише послідовність обслуговування клієнтів, але й графік зарядки електромобіля. Вирішити обидві проблеми одночасно досить складно. Тому її розглядають як задачу дворівневої оптимізації. На першому рівні розглядається задача ємнісної маршрутизації (CVRP), а на другому – задача зарядки транспортного засобу за відомим маршрутом. Для підзавдань першого рівня обмеження енергоспоживання ігноруються, а на другому рівні розробляються нові евристичні методи для задоволення обмежень енергоспоживання згенерованих маршрутів.

На рисунку 1.2 показано розташування досліджуваної задачі маршрутизації в межах множини класів ЗМТЗ.

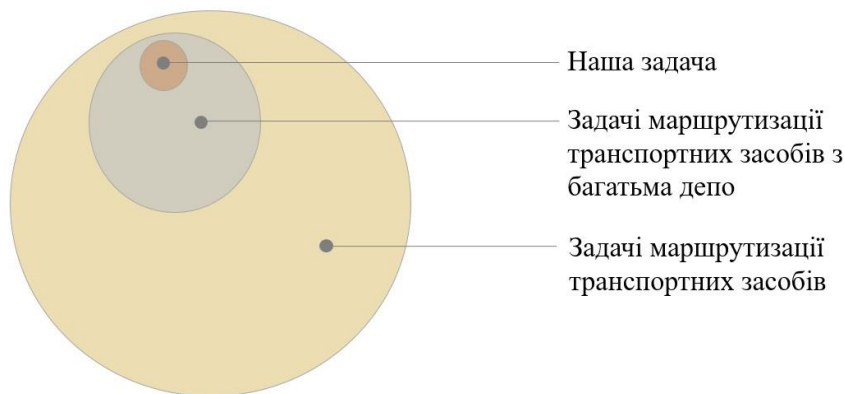


Рисунок 1.2 – Місце досліджуваної проблеми серед множини класів ЗМТЗ

Проаналізувавши подібні твердження, можна зробити висновок, що досліджувана проблема є проблемою MDVRP, яка характеризується наявністю кількох бібліотек із розподіленими між ними ТЗ.

1.2 Класифікація задач маршрутизації транспортних засобів для безпілотних літальних апаратів

Проблема маршрутизації ЛА перетворюється з нової теми на область досліджень, що розвивається. Розвиток сучасних технологій поступово призвів до того, що місцева логістика відіграє ключову роль у міській логістиці. Зараз проблема маршрутизації ЛА стала зрілою технологією і застосовується в провідних галузях промисловості. ЛА можуть значно скоротити фінансові витрати та час, необхід-

ний для транспортування матеріалів, оскільки вони дешевші в обслуговуванні, ніж традиційні транспортні засоби, а ЛА можуть, наприклад, зменшити витрати на робочу силу, виконуючи завдання автономно. На рисунку 1.3 наведено класифікацію областей застосування маршрутних завдань ПС. Загалом їх можна розділити на дві категорії: цивільні та військові.

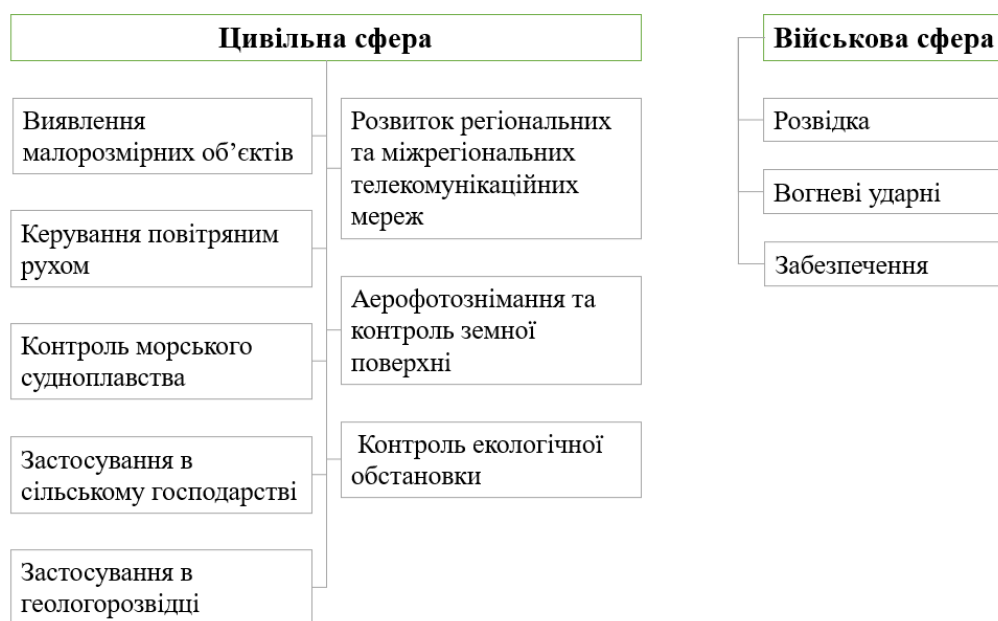


Рисунок 1.3 – Сфери застосування ЛА

Розглянемо сфери застосування ЛА більш детально, як показано на рисунку 1.3. Цивільна сфера включає наступні завдання:

- Виявлення малих об'єктів (повітря, вода, земля, пошук і порятунок, допомога в надзвичайних ситуаціях);
- управління повітряним рухом (тимчасові маршрути у важкодоступних районах, під час стихійних лих і аварій, при авіабудівництві);
- контроль морського судноплавства (пошук і виявлення суден, запобігання надзвичайним ситуаціям у портах, контроль морських кордонів, контроль правил рибальства);
- Застосування в сільському господарстві (властивості в аерокосмічній та хімічній інженерії);
- Застосування в геологорозвідці (визначення властивостей ґрунтів, розвідка корисних копалин, виявлення надр);
- Розвиток регіональних і міжрегіональних телекомунікаційних мереж (системи зв'язку, телебачення і радіомовлення, ретрансляції, системи навігації, реклами, телебачення, кіно);
- Аерофотозйомка та контроль земної поверхні (картографування, контроль водних та погодних умов, правоохоронна діяльність, виявлення лісових пожеж, спостереження за периметрами об'єктів, контроль залізничних колій);
- Контроль стану навколишнього середовища (радіаційний контроль, газохімічний контроль, контроль стану газонафтопроводів, контроль лавинного стану) [31].

Військова сфера включає наступні завдання:

- Розвідка (повітряна розвідка з малих і середніх висот в умовах сильного протистояння з природними умовами і складною радіоелектронною обстановкою, а також можливість передачі розвідувальної інформації, що надходить із захищених радіоканалів у режимі реального часу; виявлення та ідентифікація наземних, наземних і повітряних об'єктів). цілей, угруповань військ і техніки, вогневих точок і укріплень, виявлення активно запускаючих об'єктів);
- вогневе ураження (ураження техніки і живої сили противника шляхом ураження наземних і морських цілей; ураження повітряних цілей і знищення боеголовок балістичних ракет; дистанційна постановка мінних полів і розмінування);

- Постачання (перевезення вантажів у будь-яких бойових умовах, у тому числі під час бойових дій і на території, забруднені радіоактивними, хімічними та біологічними речовинами; боротьба з наземними, повітряними та морськими пожежами; оцінка результатів ударів по противнику; ретрансляція інформації та даних, пошук та евакуація втрат з поля бою) [31].

Ієрархію основних класів ZMTZ можна розширити шляхом додавання завдань маршрутизації за допомогою LA.

Завдання комівояжерів з використанням безпілотних літальних апаратів (TSP with Unmanned Aerial Vehicles, TSP-UAV) [32, 33]. Такі завдання характеризуються наявністю складу, LA та вартісними показниками. LA повинен відвідати кожну ціль лише один раз і повернутися на склад. Мета задачі – мінімізація загальної вартості маршруту. Наприклад, критерієм виконання може бути пройдена відстань або час для виконання завдання.

Місія комівояжера з використанням кількох літальних апаратів (TSP with Multi Unmanned Aerial Vehicles, TSP-MUAV) [34, 35]. Ця проблема є узагальненням проблеми TSP-UAV. Принципова відмінність полягає в тому, що ціль доступна не одному LA, а кільком LA. Крім того, кожну ціль може відвідати лише один LA. Метою цієї задачі є визначення набору маршрутів, які мінімізують їх вартість.

TSP з безпілотними літальними апаратами та вартість маршруту (TSP-UAVKP). Ця проблема також є узагальненням проблеми TSP-UAV. Основна його відмінність полягає в тому, що для кожного маршруту в залежності від напрямку можуть бути встановлені різні ціни. Метою цієї проблеми також є мінімізація загальної вартості маршруту.

Класичний ЗМТЗ з використанням БПЛА (ВРП-БПЛА) [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]. Необхідно визначити набір маршрутів для флоту безпілотників, які будуть відвідувати ціль. Для класичного ЗМТЗ метою завдання є мінімізація загальної вартості маршрутизації.

VRP з безпілотниками та вікнами часу (VRPTW-UAV) [43, 44, 45, 46]. Ця проблема є узагальненням проблеми VRP-UAV. Фундаментальна відмінність цього завдання полягає в тому, що досягнення мети відбувається протягом заданого періоду часу, який називається «часовим вікном». Такі «часові вікна» встановлюються індивідуально для кожного об'єкта. Якщо LA досягає мети раніше, він повинен почекати, якщо пізніше, він повинен заплатити штраф. Метою цієї проблеми також є мінімізація загальної вартості маршруту.

ЗМТЗ має можливість використання авіації та перезавантаження (ВРП з БПЛА та супутниковими засобами, ВРПСФ-БПЛА) [47]. Ця місія характеризується можливістю скоротити використання літака за рахунок перезавантаження. Метою також є мінімізація маршрутних витрат.

VRP з можливістю БПЛА, CVRP-UAV [48]. Однією з особливостей цієї місії є обмежена вантажопідйомність літака. При цьому кожен безпілотник може літати лише на стільки, скільки має достатньо потужності, і не підлягає дозаправці. Метою цієї проблеми також є мінімізація вартості маршруту.

ВРП з безпілотником і можливістю дозаправки, KBVPP-БПЛА. Ця місія є продовженням місії CVRP-UAV, але з можливістю повернення на базу для дозаправки. Таким чином, у Лос-Анджелесі можливі кілька рейсів.

ВРП з БПЛА та мультискладом, MDVPP-БПЛА. Ця проблема дуже схожа на звичайну MDVRP, за винятком того, що тут LA використовується як ТК. У цій місії є кілька складів, кілька цілей і кілька літаків. Кожен LA може відвідати лише один пункт призначення, а потім повинен повернутися до того самого місця, з якого він почав. Мета цієї задачі - знайти шлях з найменшими витратами для досягнення мети.

Як видно з наведеної вище класифікації, клас ZMTZ з використанням LA подібний до класу ZMTZ без використання LA, але все ж є певні відмінності.

1.3 Класифікація методів розв'язування задач комбінаторної оптимізації

Для простоти ми вважаємо, що задача комбінаторної оптимізації (COM) не має додаткових обмежень, тобто $D \neq X$. Потрібно знайти $x^* = X$ таке, що

$$x_* = \arg \operatorname{ext}_{x \in X} f(x). \quad (1.2)$$

Ми розглядаємо комбінаторний алгоритм оптимізації (COM) як специфічний процес для перетворення заданої підмножини $X \subset X$ (початкового наближення) у множину $X^* \subset X$:

$$AZ = X_*, \quad (1.3)$$

де X^* – множина знайдених розв’язків задачі (1.2).

Існує багато методів розв’язування ЗМТЗ, які класифікуються за різними ознаками: за точністю, типом використання простору, структурою розрахункової схеми, отриманим рішенням тощо. Розглянемо дві можливі класифікації основних методів: за точністю та за типом розрахункової схеми.

1.3.1 Обчислювальна складність задач комбінаторної оптимізації

Проблеми поділяються на дві категорії: проблеми P і проблеми NP.

Задачі P-типу — це задачі, які можна розв’язати за поліноміальний час, а задачі типу No — це задачі, час розв’язання яких не обмежений поліномами, і точне розв’язання можна знайти лише шляхом обходу всіх варіантів.

Для задач типу NP точні алгоритми не рекомендуються, оскільки їх обчислювальна складність значно висока. Для них використовуються наближені методи, такі як: евристики, метаевристики та ін.

3.2 Класи алгоритмів комбінаторної оптимізації за точністю

На рис. 1.4 наведено основні методи розв’язування ЗМТЗ, класифіковані за точністю.



Рисунок 1.4 – Класифікація АКО за точністю

Ехакт ІF знаходить глобальні рішення, для яких $X^* \subset \text{Arg ext}$. Наближений АКО поділяється на алгоритми з апіорними оцінками точності та апостеріорними оцінками точності [4]. Для пошуку розв’язків проблеми комівояжера використовуються евристичні методи, засновані на розумних міркуваннях (наприклад, методи, які включають найближчі міста). Однак такі методи не забезпечують необхідної точності отриманих результатів.

На практиці дослідники часто об’єднують алгоритми оцінки наближеної точності та евристичні алгоритми в один клас, який просто називають «алгоритмами наближеного визначення». Тоді ІF можна розділити на дві великі категорії: точні алгоритми та наближені алгоритми.

Точні алгоритми можна розділити на загальні методи та спеціальні алгоритми. Загальні методи включають метод повного перерахування, метод розгалуження та зв’язування, метод розгалуження та зв’язку, метод аналізу послідовності варіантів, метод динамічного програмування тощо. До спеціальних належать алгоритми, розроблені для конкретної задачі і тому мають більш вузьку сферу застосування.

Алгоритми апроксимації можна розділити на сім категорій (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Класифікація основних наближених АКО

Важливо відзначити, що в рамках даної класифікації точні алгоритми (такі як розгалуження та межі) використовуються для створення наближених розрахункових рішень. Звичайно, сьогодні АКО набагато більше, ніж показано на рисунку 1.5, але, як показує аналіз наукових публікацій у цьому напрямку, саме ці алгоритми використовуються найбільше при розв’язанні ЗКО.

Переважно лише наближені алгоритми використовуються для розв’язання складних задач, і це пов’язано з кількома причинами: Майже всі складні задачі є ІЧ-складними задачами, тому їх точні розв’язки є проблематичними, навіть якщо використовуються наближені алгоритми. Сучасні комп’ютери; зазвичай CF ЗКО є багатоекстремальним, тобто існує кілька локальних мінімумів або максимумів; у багатьох прикладних задачах є певна помилка в наданих даних; ідеї, які є основою для розробки наближених АКО, дозволяють створення не тільки Алгоритмів, які можуть розв’язати задачу, а й розв’язати цілий клас наближень на основі формули ЗКО.

1.3.3 Класи алгоритмів комбінаторної оптимізації за типом обчислювальної схеми

Залежно від типу розрахункової схеми АКО поділяють на конструктивні (прямі, послідовні) та ітераційні. Нехай у нас є певний набір осі $Y \subset X$.

Конструктивні алгоритми — це алгоритми, де $Y \supset X$ ($Y \neq X$), тобто вони працюють у розширенні простору рішень X . Починаючи «з нуля» або інших фрагментів рішення, які поступово утворюють повне рішення. Розглянемо приклади таких алгоритмів для різних ЗКО.

Задача комівояжера розв’язується алгоритмом із залученням найближчого міста, у якому на кожному наступному кроці до маршруту додається вершина, відстань до якої серед усіх можливих відстаней є найменшою. Це називається «перейти до найближчого», посилаючись на жадібний алгоритм.

Для квадратичної задачі призначення характерно розміщення об’єктів (елементів) із сильнішим потоком першими.

Пошук мінімального остовного дерева здійснюється за допомогою евристики, згідно з якою на кожному наступному кроці побудований сегмент остовного дерева включає вершини, загальна довжина яких мінімально збільшується і не утворюють підкілля.

Ітераційні алгоритми — це алгоритми, які обчислюють «повне» рішення на кожному кроці, тобто простір пошуку $Y \neq X$. Починаючи з деякого $x_0 \in X$, ітераційний алгоритм намагається покращити його крок за кроком:

$$x^{(h+1)} = A^{(h)}x^{(h)}, h = 0, 1, \dots,$$

де $A(h)$ — ітераційний процес, який у більшості випадків не залежить від кроку h , тобто $A(h) = A$.

Існує два типи ітераційних алгоритмів: траєкторні алгоритми та загальні алгоритми. Ітеративний підхід, який оперує одним (поточним) рішенням на кожному кроці, називається траєкторією. Ітераційні методи на основі популяції — це методи, у яких на кожній ітерації одночасно обчислюється декілька рішень замість одного. Отже, для алгоритму траєкторії $\|Z\| = \|X^*\| = 1$, для загального $\|Z\| > 1$, $\|X^*\| > 1$.

Тому в першому розділі розглянуто ЗМТЗ і встановлено, що вони бувають різних типів: з обмеженнями вантажопідйомності, «часовими вікнами», альтернативними динамічними складами, поверненням і доставкою товару, різними видами транспорту, періодичної маршрутизації, з повторним перевезенням. Можливість завантаження тощо. Це дає класифікацію найбільш поширених ЗМТЗ.

Після аналізу подібних пропозицій визначається приналежність досліджуваної задачі до класу ЗМТЗ з декількома складами та показано положення досліджуваної задачі в множині класу ЗМТЗ. Під час аналізу поточного стану ЗМТЗ було виявлено, що в багатьох випадках рекомендується використовувати ЛА замість штатних транспортних засобів. Розвиток сучасних технологій поступово призвів до того, що ЛА відіграє ключову роль у різноманітних логістичних рішеннях. Зараз проблема маршрутизації ЛА стала зрілою технологією і застосовується в провідних галузях промисловості. Аналіз сфер застосування ЛА показує, що в цілому її можна розділити на дві категорії: цивільну та військову. ЛА можуть значно скоротити фінансові витрати та час, необхідний для доставки матеріалів, оскільки вони дешевші в обслуговуванні, ніж традиційні ТК.

Як і звичайні ЗМТЗ, зараз існує багато типів ЗМТЗ з використанням ЛА: завдання продавця з використанням кількох ЛА, завдання продавця з використанням ЛА та вартості маршруту тощо. При цьому також розглядається метод розв'язання CSI, аналізується обчислювальна складність CSI та виділяються основні категорії CSI за точністю та типом схеми розрахунку. Тому за точністю АКО поділяють на точні, наближені (з оцінкою точності) і евристичні, а за типом розрахункової схеми — на конструктивні та ітераційні. В ітераційних алгоритмах також виділяють дві категорії: траєкторії та популяції.

Висновки

Проведено огляд ЗМТЗ, здійснено їх класифікацію. Розглянуто найбільш поширені класи задач маршрутизації БПЛА та проведено їх класифікацію. Запропоновано математичну постановку задачі маршрутизації БПЛА за наявності декількох депо. Визначено два класи задач та два критерії для їх розв'язування, у результаті чого сформульовано дві ЦФ.

Обґрунтовано методи розв'язування та розроблено нові алгоритми розв'язування задачі маршрутизації БПЛА за наявності декількох депо, а саме:

- для формування початкового наближення: метод найдешевшого включення та гібридний алгоритм найдешевшого включення з проміжними покращеннями;
- для покращення початкового наближення: ДЛП, ТП, АІВ та G-алгоритм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуляницький Л. Ф., Коткова А. А. До класифікації задач маршрутизації транспортних засобів. Науковий вісник Ужгородського університету. 2020. № 1 (36). С. 73–84.
2. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem. Management Science. 1959. Vol. 6, No 1. P. 80–91.
3. Radzki G., Thibbotuwawa, A., Vocewicz, G. UAVs flight routes optimization in changing weather conditions – Constraint programming approach. Applied Computer Science. 2019. Vol. 15, No 3. P. 5–17.
4. Гуляницький Л. Ф., Мулеса О. Ю. Прикладні методи комбінаторної оптимізації: навч. посіб. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. 146 с.
5. Uchoa E., Pecin D., Pessoa A. New benchmark instances for the Capacitated Vehicle Routing Problem. European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 257, No 3. P. 845–858.

Савченко Юрій Олександрович – студент групи 2АКІТ-22м, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: savchenko.yuriy13@gmail.com

Никитенко Олена Дмитрівна — К. т. н., доцент, Вінницький національний технічний університет, Вінниця,

Savchenko Yuriy Oleksandrovych - student of group 2AKIT-22m, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: savchenko.yuriy13@gmail.com

Olena Dmytrivna Nikitenko — Ph.D., Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.