

Є.М. Дерев'янка, В.Л. Шевченко

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРУ МЕТОДІВ ІТЕРАЦІЙНОГО ПОКРАЩЕННЯ ОПОРНОГО МАРШРУТУ

В статті розв'язується задача комівояжера для планування польоту безпілотної літальної апарату в умовах усунення наслідків надзвичайної ситуації. Розглянутий підхід використовує комбінацію методу найближчої точки для створення опорного рішення і низки методів локальних варіацій точок маршруту для покращення опорного рішення. В сценарій покращення опорного рішення включені методи: 1. 1PM - переміщення 1 точки, 2. 2PE - обміну місцями 2 точок і 3. DC - усунення перехрещення відрізків маршруту. У разі поліпшення опорного рішення кращий результат дає комбінація декількох методів. Якість покращення маршруту залежить від виду маршруту та від сценарію (набору і послідовності методів, включених у сценарій). Результати аналізу різних сценаріїв використання методів покращення опорного рішення узагальнені у вигляді звичайних графіків і теплових діаграм. Побудовані карти маршрутів для різних сценаріїв покращення опорного рішення. Найбільш результативними комбінаціями методів у складі сценаріїв виявилися 1-3, 3-1, 1-1. Найгірші комбінації: 2-2 та повні повтори інших методів 1-1-1, 2-2-2, 3-3-3. Величина виграшу щодо покращення якості маршруту змінювалась у діапазоні від 1 до 28%, в більшості випадків від 6 до 19%. Це потребувало від 2 до 24 ітерацій, в більшості випадків від 20 до 24 ітерацій. Як вартість маршруту були розглянуті Евклідова відстань, коефіцієнт небезпеки та Евклідова відстань з мультиплікатором у вигляді логістичної функції від коефіцієнту небезпеки. Метод розрахований на обмежені обчислювальні можливості звичайних бізнес-комп'ютерів. За умови ітераційного уточнення рішення методичний підхід дозволяє в реальному масштабі часу контролювати обчислювальну процедуру і завершувати її або по досягненні заданої точності, або у разі вичерпання часу. Модель створена алгоритмічною мовою Матлаб.

Ключові слова: задача комівояжера, маршрут, вартість маршруту, опорне рішення, обчислювальна процедура, модель, оптимізація, ітераційний метод.

Ye. Derevianko, V. Shevchenko

DETERMINATION OF THE OPTIMAL SET OF METHODS FOR ITERATIVE IMPROVEMENT OF THE REFERENCE ROUTE

The article solves the problem of a traveling salesman for planning a flight of an unmanned aerial vehicle in the conditions of eliminating the consequences of an emergency. An approach is considered that uses a combination of the nearest point method to create a reference solution and a number of methods of local variations of route points to improve the reference solution. The following methods are included in the reference solution improvement scenario: 1. 1PM - moving 1 point, 2. 2PE - exchanging places of 2 points and 3. DC - eliminating intersections of route segments. When improving the reference solution, the best result is obtained by combining several methods. The quality of route improvement depends on the type of route and the scenario (the set and sequence of methods included in the scenario). The results of the analysis of different scenarios of using reference solution improvement methods are summarized in the form of ordinary graphs and heat diagrams. Route maps are constructed for different scenarios of improving the reference solution. The most effective combinations of methods in the scenarios were 1-3, 3-1, 1-1. The worst combinations: 2-2 and complete repetitions of other methods 1-1-1, 2-2-2, 3-3-3. The magnitude of the gain in improving the quality of the route varied in the range from 1 to 28%, in most cases from 6 to 19%. This required from 2 to 24 iterations, in most cases from 20 to 24 iterations. The Euclidean distance, the hazard coefficient and the Euclidean distance with a multiplier in the form of a logistic function of the hazard coefficient were considered as the cost of the route. The method is designed for the limited computational capabilities of conventional business computers. When iteratively refining the solution, the methodological approach allows you to control the computational procedure in real time and complete it either upon reaching the specified accuracy or when time runs out. The model is created in the algorithmic language Matlab.

Keywords: traveling salesman problem, route, route cost, reference solution, computational procedure, model, optimization, iterative method.

Вступ

В умовах надзвичайних ситуацій для збереження життя людей широко застосовують безпілотні літальні апарати (БПЛА). БПЛА доставляють у небезпечні зони рятувальні засоби, воду, їжу тощо. БПЛА під час польоту може відвідувати декілька точок маршруту з метою моніторингу та доставки вантажів. Ресурс польотного часу є обмеженим. Виникає задача прокладання найкращого маршруту з урахуванням дальності, перешкод, небезпек та інших факторів. Задача побудови найкращого маршруту з урахуванням характеристик (вартості) окремих ділянок маршруту є загальновідомою задачею комівояжера SMP (Sales Man Problem). В цій задачі комівояжер повинен побувати у всіх заданих точках і повернутися в точку старту. Маршрут має бути прокладений так, щоб його вартість була найменшою. Під час надзвичайних ситуацій умови міняються динамічно. Прорахувати наперед усі маршрути неможливо. Потрібно мати змогу оперативного розрахунку маршрутів на звичайних бізнес-комп'ютерах на місці події. Таким чином, актуальною є задача оперативного розрахунку оптимального маршруту безпілотного літального апарату за допомогою звичайних обчислювальних засобів.

1. Аналіз існуючих досліджень

Загальна проблематика використання БПЛА розглянута в [1]. Але ця робота присвячена загальному аналізу стану та перспектив розвитку БПЛА. Питання побудови моделей оптимальних маршрутів розглянуті не були. Вперше задача комівояжера була розв'язана досить давно. Для невеликих розмірностей задачі популярним є метод повного прямого перебору або, як його ще називають, метод грубої сили (Brute Force) [2, 3]. На жаль, метод споживає багато обчислювальних ресурсів, має обчислювальну складність $(n-1)!$ і ефективно працює лише у випадку, якщо кількості точок маршруту не більше 10. Розвитком методів повного прямого пере-

бору є методи впорядкованого перебору, наприклад, метод дискретного динамічного програмування (алгоритм Хелд-Карпа) [4, 5], з обчислювальною складністю $n^2 * 2^n$. Недолік – високе споживання пам'яті і обмеження кількості точок у маршруті – до 25. Методи цілочисельного лінійного програмування мають гарну математичну формалізацію. Але вимагають стільки ж або ще більше обчислювальних ресурсів. Ефективність методів зростає за обмежень, які ведуть до зниження порядку моделі (branch-and-bound метод) [6].

Як вже було сказано вище, рішення має бути отримане оперативно. В такій ситуації компромісною поступкою може бути точність рішення. Дуже добре для практичної справи, якщо максимально швидко отримати якийсь опорне (наближене) рішення, яке потім можна покращувати в рамках доступних обчислювальних та часових ресурсів. Швидкими є жадібні алгоритми [6-8]. Недолік – низька точність. Похибка може сягати до 25-45%. Подальше покращення опорного рішення можна виконувати за допомогою генетичних, мурашиних алгоритмів, алгоритмів відпалу [7, 8]. Недолік – складність отримання готових рішень на кожній ітерації. Потрібний час на налаштування процесу еволюції. Найбільш сучасним вважається використання нейронних мереж [8-10]. Недолік – ненаочність процесу оптимізації.

В [11] маршрут будували за допомогою жадібного алгоритму (Nearest Point Method – Метод найближчої точки). Низька якість результату стала розплатою за оперативність. В [12, 13] так само знаходиться спочатку опорне рішення. Але потім це рішення уточняється за допомогою локальних варіацій маршруту різними методами (1PM – переміщення 1 точки, 2PE – обмін місцями 1 точок, DC – усунення перехрещень відрізків). Із цих методів локальних варіацій формувався стек послідовних методів (сценарій), який повторювався декілька разів доти, поки покращення рішень припинялося. Недолік – евристичність сценарію без обґрунтування.

Недоліки розглянутих методів:

1. Висока обчислювальна складність обмежує кількість точок маршруту.

2. Складність використання в польових умовах надзвичайної ситуації на звичайних комп'ютерах.

3. Ненаочність проміжних результатів пошуку рішення і неможливість штатного припинення ітераційної процедури покращення рішення за умови вичерпання часу.

4. Евристичність сценаріїв покращення опорних рішень.

Рациональним шляхом подолання даних недоліків є створення опорного рішення (перевага - швидкість) та подальше його уточнення за допомогою набору методів локальних варіацій (перевага - наочність та можливість зупинки ітерації без втрати проміжного рішення).

Метою статті є покращення якості маршрутів БПЛА за допомогою ітераційного покращення опорного рішення набором методів локальних варіацій, зміст якого буде обґрунтовуватися на основі статистики успішності рішень.

2. Побудова опорного маршруту

Опорний маршрут створюємо за допомогою жадібного алгоритму методу найближчої точки. Далі опорний маршрут уточнюється за допомогою методів локальних варіацій. За критерій якості рішення використовується вартість маршруту, яка дорівнює сумі вартостей всіх ділянок маршруту

$$CostRoute = \sum_{\substack{RouteSet, \\ i=2,N}} Cost(i, i-1),$$

де *RouteSet* – множина номерів точок маршруту, які упорядковані за послідовністю проходження маршруту, *N* – загальна кількість точок маршруту, *i* – номер точки маршруту.

Найчастіше як вартість проходження ділянки маршруту використовують Евклідову відстань

$$Cost(i, j) = D_e(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2},$$

де *i, j* – номери точок, *x, y* – координати точок.

У загальному випадку крім відстані для обрахунку вартості ділянки маршруту можна використати показники у вигляді втрат або витрат певних ресурсів: заряд батареї, паливо, амортизація БПЛА. Також не включається ймовірність певних подій: пошкодження або втрати БПЛА, невиконання завдання, втрати вантажу, інцидентів льотного та іншого характеру. Більшу кількість факторів, що були перелічені, можна узагальнити під єдиним показником – коефіцієнт небезпеки k_{Hazard} . Для ділянки маршруту між кожною парою точок $k_{Hazard}(i, j)$ має своє значення, яке для зручності оцінюємо числами в діапазоні від 0 до 100. На основі величини рівня небезпеки формується множник відстані, який знаходимо за допомогою логістичної функції [14] (рис.1)

$$SL(k_{Hazard}(i, j)) = d + \frac{a - d}{1 + e^{-\frac{2}{T}(k_{Hazard}(i, j) - s)}},$$

де *a, d* – асимптоти, *T* – постійна аргументу логістичної залежності, *s* – точка симетрії,

$$[d \ a \ T \ s] = [1 \ 5 \ 12 \ 70].$$

Залежність вартості ділянки маршруту з урахуванням небезпеки має вигляд

$$Cost_H(i, j) = SL(k_{Hazard}(i, j)) D_e(i, j).$$

Для пришвидшення моделювання матриці *Cost*, k_{Hazard} , *Cost_H* для всіх можливих пар точок маршруту (рис.2, 3) були розраховані до початку моделювання.

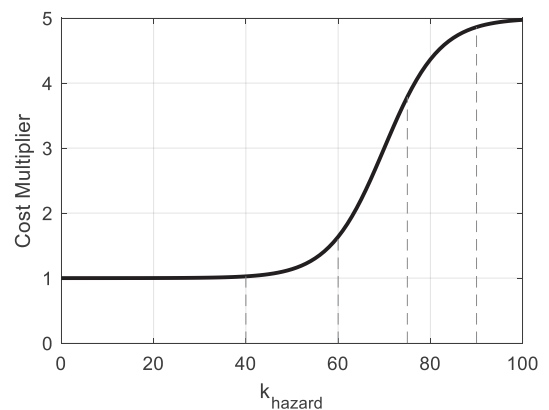


Рис. 1. Логістична залежність множника вартості залежно від коефіцієнта небезпеки k_{Hazard}

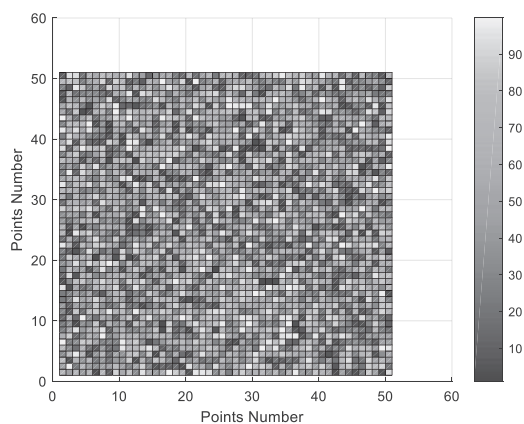


Рис. 2. Теплова карта масиву відстаней Cost

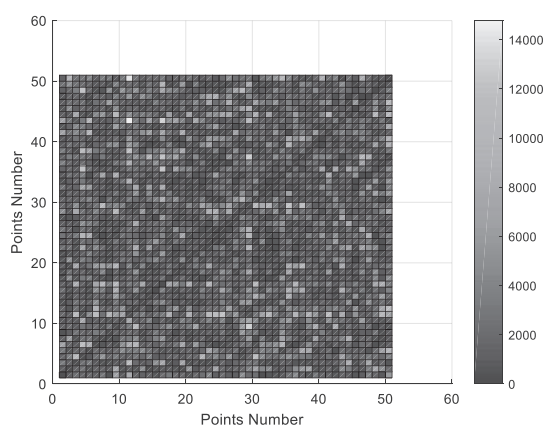


Рис. 3. Теплова карта масиву відстаней $Cost_H$ з урахуванням коефіцієнту небезпеки k_{Hazard}

3. Локальні варіації маршруту

1PM (1 Point Moving) метод переміщення 1 точки полягає в тому, що кожну точку по черзі пробуємо перемістити на всі можливі нові позиції. Якщо вартість нового маршруту менша, то таке переміщення закріплюється. Якщо ні, то відкидається. Деякі покращення маршруту вимагають переміщення декількох точок або переміщення однієї точки декілька разів у комбінації з іншими точками. Тому процедура 1PM повторюється декілька разів. Але і в цьому випадку можуть бути такі розташування точок, що із них немає переходу до оптимального рішення лише за допомогою методу 1PM. Для виходу із такого тупика потрібно додатково використати якийсь інший метод. Комбінація методів мінімізує тупикові ситуації і підвищує якість рішень.

2PE (2 Point Exchange Method) метод обміну місцями двох точок маршруту. Аналогічно до попереднього методу аналізуються всі можливі варіанти пар обмінів. Недоліком є те, що оптимальність рішення залежить від порядку розгляду пар обмінів. Тому цей метод також повторюється декілька разів у циклі і комбінується з іншими методами. Метод 2PE, як і 1PM, поряд з покращеннями може утворювати перехрещення ділянок маршрутів, що є ознакою недостатньої якості маршруту. Для усунення перехрещень використовується окремий метод.

DC (Delete Crossing) метод усуває перехрещення ділянок маршруту від первинного стану (рис.4) до нового стану (рис.5). І перевага, і недолік методу в тому, що він шукає виключно перехрещення. Перевага в тому, що він це робить ефективно. Недолік в тому, що усунення одного перехрещення може утворювати інше. Крім того, метод не контролює інші негаразди маршруту. Тому цей метод повторюється у власному циклі, а також комбінується з іншими методами. Аналітичні викладки щодо виявлення та усунення перехрещень детально розглянуті в [12, 13].

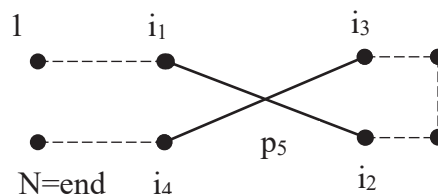


Рис. 4. Ділянки маршруту $i1-i2$ та $i3-i4$ до усунення перехрещення

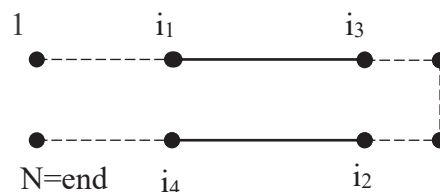


Рис. 5. Ділянки маршруту $i1-i3$ та $i2-i4$ після усунення перехрещення

Доведемо, що таке перетворення веде до зменшення довжини маршруту.

Довжини катетів менше довжини гіпотенузи (рис.6)

$$AD < AC, \quad DB < CB.$$

Додаємо праві і ліві частини нерівностей

$$AD + DB < AC + CB, \\ AB < AC + CB.$$

Це підтверджує, що довжина сторони трикутника менша за суму інших сторін.

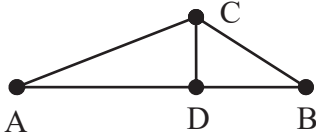


Рис. 6. Співвідношення сторін трикутника

Із цього випливає (рис.7), що

$$i_1 i_3 < i_1 p_5 + p_5 i_3, \\ i_4 i_2 < i_4 p_5 + p_5 i_2.$$

Додаємо праві та ліві частини нерівностей

$$i_1 i_3 + i_4 i_2 < (i_1 p_5 + p_5 i_3) + (i_4 p_5 + p_5 i_2), \\ i_1 i_3 + i_4 i_2 < i_1 i_2 + i_4 i_3.$$

Сума неперехрещених ділянок $i_1 i_3 + i_4 i_2$ менша за суму перехрещених ділянок $i_1 i_2 + i_4 i_3$.

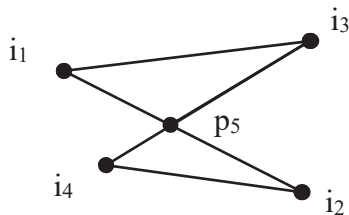


Рис. 7. Доведення виграшу від усунення перехрещення ділянок маршруту

Як і в попередніх методах, метод DC треба повторювати декілька разів і використовувати сумісно з іншими методами.

Загальний алгоритм ітераційного уточнення опорного маршруту.

1. Побудова опорного маршруту методом найближчого сусіда (NPM, Nearest Point Method).

2. Уточнення опорного маршруту.

2.1. Завантаження сценарію – комбінації методів локальних варіацій точок маршруту.

2.2. Цикл сценарію: повтор сценарію локальних варіацій у циклі.

2.2.1. Вибір наступного методу зі сценарію.

2.2.2. Цикл методу: повтор застосування поточного методу із сценарію.

2.2.3. Перевірка умови зупинки ітераційної процедури застосування методу (відсутність змін на 2 останніх ітераціях). Якщо умова виконана, то перехід на п.2.2.1.

2.2.4. Перевірка виконання заданої кількості ітерацій методу. Якщо умова не виконана, то повернення на етап 2.2.2.

2.2.5. Вихід із циклу методів.

2.3. Перевірка умови зупинки ітераційної процедури застосування сценарію (відсутність змін на 6 останніх ітераціях). Якщо умова не виконана, то повернення на етап 2.2.

2.4. Перевірка виконання заданої кількості ітерацій сценарію. Якщо умова не виконана, то повернення на етап 2.2.

2.5. Вихід із циклу сценарію.

3. Уточнення опорного маршруту завершено.

4. Пошук найкращої комбінації методів локальних варіацій у складі сценарію

Закодуємо методи локальних варіацій числами 1. 1PM, 2. 2PE, 3. DC. Сформуємо сценарії довжиною 3 методи із всіх можливих комбінацій трьох методів, розглянутих вище. Всього буде $3 \times 3 \times 3 = 27$ варіанти. Сценарії були апробовані на вибірці на 30 різних наборах із 50 точок маршрутів, сформованих випадковим чином. Максимальне число повторів сценаріїв дорівнювало 4, максимальне число повторів методів у межах сценаріїв – 7. Окремі приклади результатів удосконалення опорних рішень представлені на рис. 8-10.



Рис. 8. Результати покращення маршруту для сценарію 14 (найгірша якість)

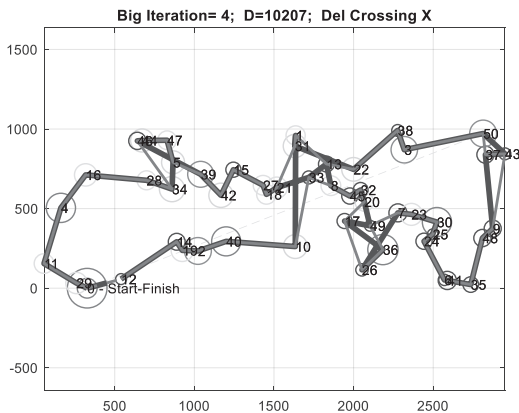


Рис. 9. Результати покращення маршруту для сценарію 6 (середня якість)

Тут подвійне червоне коло позначає точку старту (вона ж точка фінішу) маршруту. Опорний маршрут, створений за допомогою методу найближчого сусіда показаний синьою лінією. Покращений маршрут – червоною лінією. Сценарій 14 (методи [2 2 2]) надав одне із найгірших рішень (рис.8). Сценарій 6 (методи [1 2 3]) забезпечив середню якість (рис. 9). Сценарій 19 (методи [3 1 1]) надав найкращий результат (рис. 10).

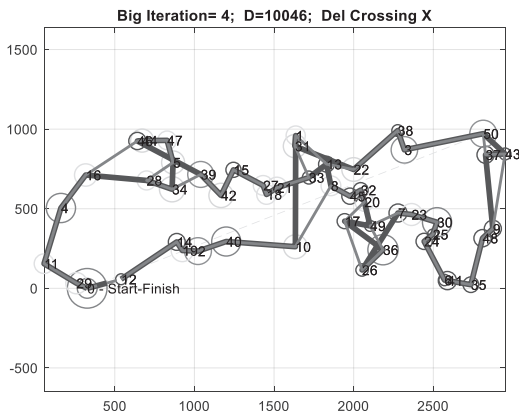


Рис. 10. Результати покращення маршруту для сценарію 19 (найкращий результат)

Величина виграшу оцінювалась у відсотках відносно опорного рішення

$$CostMinimizationWin = \left(\frac{Cost_{NPM} - Cost_{Scenario}}{Cost_{NPM}} \right) 100\%,$$

де $Cost_{NPM}$ вартість опорного маршруту, $Cost_{Scenario}$ вартість маршруту, що був покращений за допомогою поточного сценарію. На рис.11 по вертикалі наведені номери (ліворуч) та зміст методів сценаріїв (праворуч). По горизонталі – виграш кожного сценарію. Одна лінія відповідає одному варіанту набору точок маршруту. Рис.11 показує, що сценарії мають свої особливості щодо спроможності покращувати опорне рішення незалежно від варіанту маршруту. Різні маршрути мають різний потенціал удосконалення. Рис.12 доповнений даними щодо кількості потрібних ітерацій.

Найбільша кількість пар сценарій-маршрут потребувала від 20 до 24 ітерацій. Усі пари - від 2 до 24. Величина виграшу в більшості випадків змінюється від 6 до 19%. Повний діапазон зміни величини виграшу від 1 до 28%. Лінійна регресія показує залежність виграшу від кількості ітерацій. Більш детально розподіл величини виграшу за конкретними номерами сценарію (ScenarioNumber) та номерами маршруту (TestNumber) показує теплова карта на рис.13.

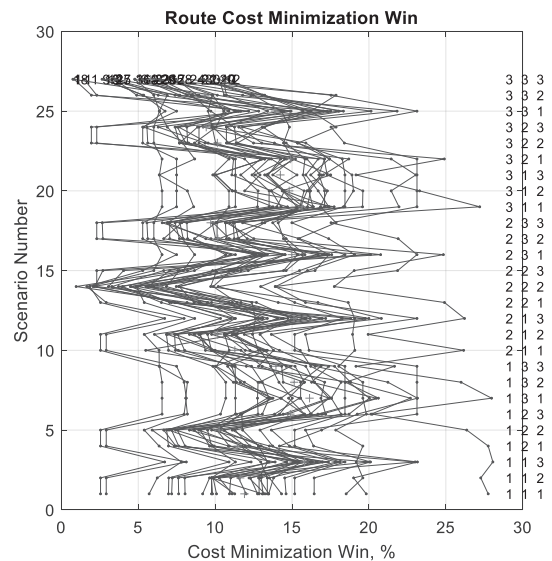


Рис. 11. Результативність покращення рішень для сценаріїв та маршрутів

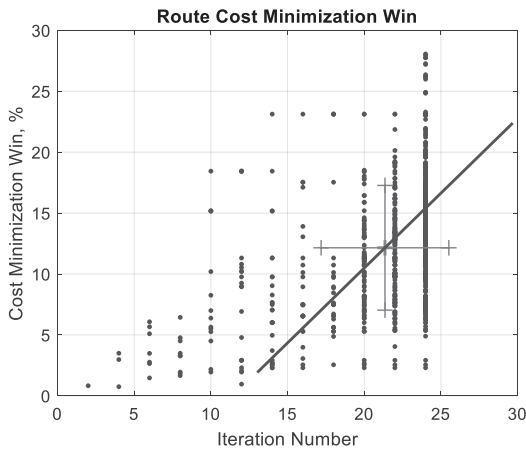


Рис. 12. Результативність покращення опорних рішень залежно від кількості ітерацій

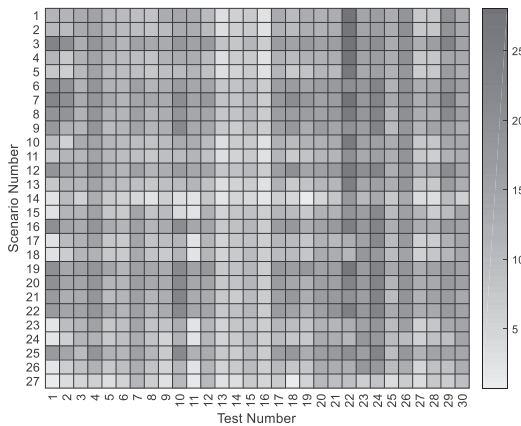


Рис. 13. Теплова карта виграшу залежно від номера сценарію (ScenarioNumber) та варіанта маршруту (TestNumber)

Аналіз отриманих даних виявив, що найкращі результати показували сценарії, в яких 1 (метод 1) перебуває на першій позиції. Трохи гірші, але теж непогані результати давали сценарії, в яких 1 перебуває на останній позиції. У будь-яких позиціях сценарію метод 1 працює найкраще, а метод 2 – найгірше. Водночас треба враховувати і зв'язки методів. Наприклад, метод 3 суттєво покращує свою ефективність у зв'язці з методом 1. Рейтинг пар методів на першій-другій позиції або на другій-третьій позиції: найкращі в порядку рейтингу 1-3, 3-1, 1-1, найгірша пара 2-2. Повтор будь-яких методів 1-1-1, 2-2-2, 3-3-3 зменшує різноманіття, що суттєво погіршує результат.

В цілому метод 1 є домінуючим – підвищує ефективність сценарію. Дуже сильними є зв'язки 1-3, 3-1. Метод 2 майже завжди послаблює сценарій. Але він потрібний для швидкого усунення конкретної про-

блеми – перехрещення ділянок. І він може бути покращений через розташування поряд методу 1 або 3.

Висновки

В роботі розглядається розв'язання задачі комівояжера для планування польоту безпілотного літального апарату в умовах усунення наслідків надзвичайної ситуації.

Розглянутий підхід, що використовує комбінацію методу найближчої точки для створення опорного рішення і низки методів локальних варіацій точок маршруту для покращення опорного рішення. В сценарій покращення опорного рішення включені такі методи: 1. 1PM - переміщення 1 точки, 2. 2PE - обміну місцями 2 точок і 3. DC - усунення перехрещення відрізків маршруту.

Для поліпшення опорного рішення кращий результат дає комбінація декількох методів. Покращення якості маршруту залежить від виду маршруту та від сценарію, тобто від набору і послідовності методів, включених до сценарію.

Результати аналізу різних сценаріїв використання методів покращення опорного рішення були узагальнені у вигляді звичайних графіків і теплових діаграм. Були побудовані карти маршрутів для різних сценаріїв покращення опорного рішення.

Найбільш результативними комбінаціями методів у складі сценаріїв виявилися 1-3, 3-1, 1-1. Найгірші комбінації: 2-2 та повні повтори інших методів 1-1-1, 2-2-2, 3-3-3.

Величина виграшу щодо покращення якості маршруту змінювалась у діапазоні від 1 до 28%, в більшості випадків від 6 до 19%. Це потребувало від 2 до 24 ітерацій, в більшості випадків від 20 до 24 ітерацій.

Як вартість маршруту були розглянуті Евклідова відстань, коефіцієнт небезпеки та Евклідова відстань з мультиплікатором у вигляді логістичної функції від коефіцієнту небезпеки.

Метод розрахований на обмежені обчислювальні можливості звичайних біз-

нес-комп'ютерів. За умови ітераційного уточнення рішення методичний підхід дозволяє в реальному масштабі часу контролювати обчислювальну процедуру і завершувати її або після досягнення заданої точності, або у разі вичерпання часу.

Напрямами подальших досліджень є розширення методів уточнення і їх спрямування на конкретні вади маршрутів, які можуть бути діагностовані перед запуском методів.

Література

1. Мосов С.П. (2024) Роїння дронів військового призначення: реалії та перспективи. Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України, 2024, №1 (80), с.77-86. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-1-80/77-86>.
2. Dika Setyo Nugroho, Ahmad Ilham. Brute force algorithm application for solving traveling salesman problem (tsp) in semarang city tourist destinations. Jurnal Komputer dan Teknologi Informasi. Vol. 1, No. 2, Bulan 2023, pp. 79-86x. E-ISSN: 2986-7592, DOI: 10.26714/jkti.v3i1.13957. <https://jurnal.unimus.ac.id/index.php/JKTI/article/view/16196/pdf>
3. Gohil, A., Tayal, M., Sahu, T., and Sawalpurkar, V., "Travelling Salesman Problem: Parallel Implementations & Analysis", arXiv e-prints, Art. no. arXiv:2205.14352, 2022. doi:10.48550/arXiv.2205.14352. <https://arxiv.org/abs/2205.14352>
4. Parjadis, A., Bessiere, C., & Hebrard, E. (2024). Learning Lagrangian multipliers for the Travelling Salesman Problem. *Proceedings of the 30th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2024)*, 22. https://drops.dagstuhl.de/storage/00lipics/lipics-vol307-cp2024/LIPIcs.CP.2024.22/LIPIcs.CP.2024.22.pdf?utm_source=chatgpt.com
5. Alanzi, E., Borchate, A., & co-authors. (2025). Solving the traveling salesman problem with machine learning: A review of recent advances and challenges. *Artificial Intelligence Review*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11267-x> [https://www.researchgate.net/publication/392404863_Solving_the_traveling_salesman_problem_with_machine_learning_a_re-](https://www.researchgate.net/publication/392404863_Solving_the_traveling_salesman_problem_with_machine_learning_a_review_of_recent_advances_and_challenges?utm_source=chatgpt.com)
6. Nataliya Boyko. An Overview of Existing Methods for Solving the Travelling Salesman Problem in Order to Find the Optimal Solution for Economic Problems. *European scientific journal of Economic and Financial innovation*. №1(7) (2021). DOI: <http://doi.org/10.32750/2021-0108>. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://journal.eae.com.ua/index.php/journal/article/download/129/115/&ved=2ahUKEwjMnq-k0ZuNAXWyExAIHZqeG8QQFnoECB8QAQ&usq=AOvVaw0OzPk2F2kE3LoWIAP23rNG>
7. Skakalina, O., & Kapiton, A. (2024). Comparative Analysis of Heuristic Algorithms for Solving the TSP. Системи управління, навігації та зв'язку. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.144. https://www.researchgate.net/publication/380870329_COMPARATIVE_ANALYSIS_OF_THE_APPLICATION_OF_HEURISTIC_ALGORITHMS_FOR_SOLVING_THE_TSP_PROBLEM
8. Ivashchenko, H., Onyshchenko, O., Bondarenko, M., & Zdoryk, N. (2024). Methods for Solving the Traveling Salesman Problem Based on Computational Intelligence. *Systems of Control and Navigation*. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.099
9. Yimeng Min, Yiwei Bai, Carla P Gomes. Unsupervised Learning for Solving the Travelling Salesman Problem. 37th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2023). 21 Sept 2023. <https://openreview.net/forum?id=IAEc7aIW20¬eId=nfxOn45gNM>
10. Шевченко В.Л. Імітаційне моделювання. Математичне моделювання процесів: Навч. посібник. / [В.І. Мірненко, В.Л. Шевченко, Д.С. Берестов, Р.М. Федоренко, А.В. Шевченко]; за ред. В.Л. Шевченка. – К.: КНУ ім. Т. Шевченка, 2020. – 164 с.
11. Igor Sinitsyn, Yevhen Derevianko, Stanislav Denysyuk, Volodymyr Shevchenko, Optimizing Reference Routes through Waypoint Sequence Variation in Emergency Events of Natural and Technological Origin, in: *Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2024)*, Kyiv, Ukraine, October 26, 2024 (online), CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613-0073, 2024, Vol-

- 3826, pp. 505-512, <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short20.pdf>
12. Yevhen Derevianko, Nikita Krupa, Volodymyr Shevchenko, Viktor Shevchenko. Statistical Characteristics of the Reference Route Improvement Procedure Using a Stack of Iterative Methods // Proceedings of the Workshop on Intelligent Information Technologies (UkrPROG-IIT 2025), 15-th International Scientific and Practical Programming Conference, Kyiv, Ukraine, May 13-14, 2025, ISSN 1613-0073, 2025, Vol-4049, pp. 68-78, <https://ceur-ws.org/Vol-4049/paper6.pdf>
 13. Volodymyr Shevchenko, Yevhen Derevianko, Oleksii Korniienko, Viktor Shevchenko. Improving the Reference Route Using a Stack of Iterative Local Optimization Methods // Proceedings of the 1st Workshop Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025), Kyiv, Ukraine, May 13-14, 2025, ISSN 1613-0073, 2025, Vol-4053, pp. 218-226, <https://ceur-ws.org/Vol-4053/paper13.pdf>
 14. Шевченко В.Л. Оптимізаційне моделювання в стратегічному плануванні.— К.: ЦБСД НУОУ, 2011. -283с.
- ### References
1. Mosov S.P. (2024) Swarming of military drones: realities and prospects. Collection of scientific papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defense University of Ukraine, 2024, №1 (80), с.77-86. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-1-80/77-86>.
 2. Dika Setyo Nugroho, Ahmad Ilham. Brute force algorithm application for solving traveling salesman problem (tsp) in semarang city tourist destinations. Jurnal Komputer dan Teknologi Informasi. Vol. 1, No. 2, Bulan 2023, pp. 79-86x. E-ISSN: 2986-7592, DOI: 10.26714/jkti.v3i1.13957. <https://jurnal.unimus.ac.id/index.php/JKTI/article/view/16196/pdf>
 3. Gohil, A., Tayal, M., Sahu, T., and Sawalpurkar, V., "Travelling Salesman Problem: Parallel Implementations & Analysis", arXiv e-prints, Art. no. arXiv:2205.14352, 2022. doi:10.48550/arXiv.2205.14352. <https://arxiv.org/abs/2205.14352>
 4. Parjadis, A., Bessiere, C., & Hebrard, E. (2024). Learning Lagrangian multipliers for the Travelling Salesman Problem. Proceedings of the 30th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2024), 22. https://drops.dagstuhl.de/storage/00lipics/lipics-vol307-cp2024/LIPIcs.CP.2024.22/LIPIcs.CP.2024.22.pdf?utm_source=chatgpt.com
 5. Alanzi, E., Borchate, A., & co-authors. (2025). Solving the traveling salesman problem with machine learning: A review of recent advances and challenges. Artificial Intelligence Review. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11267-x> https://www.researchgate.net/publication/392404863_Solving_the_traveling_salesman_problem_with_machine_learning_a_review_of_recent_advances_and_challenges?utm_source=chatgpt.com
 6. Nataliya Boyko. An Overview of Existing Methods for Solving the Travelling Salesman Problem in Order to Find the Optimal Solution for Economic Problems. European scientific journal of Economic and Financial innovation. №1(7) (2021). DOI: <http://doi.org/10.32750/2021-0108>. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://journal.eae.com.ua/index.php/journal/article/download/129/115/&ved=2ahUKEwjMnq-k0ZuNAxWyEx-AIHZqeG8QQFnoECB8QAQ&usg=AOv-Vaw0OzPk2F2kE3LoWIAP23rNG>
 7. Skakalina, O., & Kapiton, A. (2024). Comparative Analysis of Heuristic Algorithms for Solving the TSP. Системи управління, навігації та зв'язку. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.144. https://www.researchgate.net/publication/380870329_COMPARATIVE_ANALYSIS_OF_THE_APPLICATION_OF_HEURISTIC_ALGORITHMS_FOR_SOLVING_THE_TSP_PROBLEM
 8. Ivashchenko, H., Onyshchenko, O., Bondarenko, M., & Zdoryk, N. (2024). Methods for Solving the Traveling Salesman Problem Based on Computational Intelligence. Systems of Control and Navigation. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.099
 9. Yimeng Min, Yiwei Bai, Carla P Gomes. Unsupervised Learning for Solving the Travelling Salesman Problem. 37th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2023). 21 Sept 2023. <https://openreview.net/forum?id=IAEc7aIW20¬eId=nfxOn45gNM>
 10. Shevchenko V.L. Imitation modeling. Mathematical modeling of processes: Study guide. / [V.I. Mirnenko, V.L. Shevchenko, D.S.

- Berestov, R.M. Fedorenko, A.V. Shevchenko]; under the editorship V.L. Shevchenko. – K.: KNU named after T. Shevchenko, 2020. – 164 p.
11. Igor Sinitsyn, Yevhen Derevianko, Stanislav Denysyuk, Volodymyr Shevchenko, Optimizing Reference Routes through Waypoint Sequence Variation in Emergency Events of Natural and Technological Origin, in: Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2024), Kyiv, Ukraine, October 26, 2024 (online), CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613-0073, 2024, Vol-3826, pp. 505-512, <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short20.pdf>
 12. Yevhen Derevianko, Nikita Krupa, Volodymyr Shevchenko, Viktor Shevchenko. Statistical Characteristics of the Reference Route Improvement Procedure Using a Stack of Iterative Methods // Proceedings of the Workshop on Intelligent Information Technologies (UkrPROG-IIT 2025), 15-th International Scientific and Practical Programming Conference, Kyiv, Ukraine, May 13-14, 2025, ISSN 1613-0073, 2025, Vol-4049, pp. 68-78, <https://ceur-ws.org/Vol-4049/paper6.pdf>
 13. Volodymyr Shevchenko, Yevhen Derevianko, Oleksii Korniienko, Viktor Shevchenko. Improving the Reference Route Using a Stack of Iterative Local Optimization Methods // Proceedings of the 1st Workshop Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025), Kyiv, Ukraine, May 13-14, 2025, ISSN 1613-0073, 2025, Vol-4053, pp. 218-226, <https://ceur-ws.org/Vol-4053/paper13.pdf>
 14. Shevchenko V.L. Optimization modeling in strategic planning.– K.: TsVSD NUOU, 2011. –283p.
- Одержано: 03.10.2025
Внутрішня рецензія отримана: 07.10.2025
Зовнішня рецензія отримана: 07.10.2025
- Про авторів:**
- ¹*Дерев'янка Євген Миколайович*,
аспірант.
<http://orcid.org/0000-0003-2949-8896>
- ¹*Шевченко Віктор Леонідович*,
д.т.н., професор.
<http://orcid.org/0000-0002-9457-7454>.
- Місце роботи авторів:**
- ¹Інститут програмних систем
НАН України,
тел. +38-044-522-62-42
Е-mail: gii2014@ukr.net
Сайт: www.iss.nas.gov.ua