

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

Мурашиний алгоритм для розв'язання задач
маршрутизації транспорту

(тема)

Виконав:

студент _____ II курсу, групи _____ СПМ-20-2
Кметь О.І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність _____
123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____
Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: _____ доц. Токарев В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри ЕОМ

_____ Волк М.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Кметю Олександрю Ігоровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Мурашиний алгоритм для розв'язання задач маршрутизації транспорту

затверджена наказом по університету від “ 24 ” березня 2022 р. № 413 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 травня 2022р.

3. Вхідні дані до роботи 1) провести дослідження ефективних методів вирішення

багатокритеріальних завдань Vehicle Routing Problem на основі технології – мурашиного алгоритму; 2) CPU type: Mobile DualCore Intel Core i5-430M, 2533 MHz (19 x 133);

3) операційна система – Windows 10; 4) тип ядра ОС: Multiprocessor Free (64-bit);

5) представлення вихідних даних: згідно нормативних документів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайд-презентація – 20 слайдів _____

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	29.03.22 - 05.04.22	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	06.04.22 - 16.04.22	
3	Вибір інструментальних засобів	17.04.22 - 29.04.22	
4	Проведення експериментів	30.04.22 - 04.05.22	
5	Оформлення матеріалів атестаційної роботи	05.05.22 - 10.05.22	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та попередній захист	11.05.22 - 12.05.22	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	13.05.22 - 17.05.22	

Дата видачі завдання 28 березня 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Токарев В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 62 с., 22 рис., 1 дод., 14 джерел.

ЛОГІСТИКА, МЕТОД, МУРАШИНИЙ АЛГОРИТМ, СИСТЕМА, VRP.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження ефективних методів вирішення багатокритеріальних завдань Vehicle Routing Problem на основі технології – мурашиного алгоритму.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розглядаються інноваційні питання, що полягають у постановці нового узагальненого та багатокритеріального завдання класу VRP та його оригінальному вирішенні на основі мурашиного алгоритму. Досліджений метод мультиколоніальної мурашиної системи дозволив розробити поліноміальний алгоритм вирішення VRP, який не вимагає виконання декомпозиції задачі за рахунок суміщення етапів розбиття вихідного графа та формування маршрутів.

Запропоновані модифікації алгоритму дозволяють враховувати умови багатокритеріальності, асиметричності вхідних даних у поставленій задачі.

ABSTRACT

Master's thesis: 62 pages, 22 figures, 1 appendices, 14 sources.

ANT ALGORITHM, LOGISTICS, METHOD, SYSTEM, VRP

The purpose of the qualification work is to study effective methods for solving multicriteria problems Vehicle Routing Problem based on technology - ant algorithm.

In the course of the qualification work, innovative issues are considered, which consist in the formulation of a new generalized and multicriteria task of the VRP class and its original solution based on the ant algorithm. The researched method of multicolonial ant system allowed to develop a polynomial VRP solution algorithm, which does not require decomposition of the problem by combining the stages of splitting the original graph and forming routes.

The proposed modifications of the algorithm allow to take into account the conditions of multicriteria, asymmetry of input data in the problem.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 ОПИС КЛАСИЧНОГО ЗАВДАННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ .	10
1.1 Огляд та аналіз узагальнень та розширень задачі маршрутизації транспорту.....	12
1.2 Аналіз методів метаевристичної оптимізації	23
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ МУЛЬТИКОЛОНІАЛЬНОЇ МУРАШИНОЇ СИСТЕМИ	29
2.1 Побудова математичної моделі	29
3 АПРОБАЦІЯ МУЛЬТИКОЛОНІАЛЬНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ	37
3.1 Побудова математичної моделі	41
ВИСНОВКИ.....	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	49
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	52

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

МСО – мережа, яка самоорганізується

СМО – система масового обслуговування

ТЗ – транспортний засіб

ІоТ – інтернет речей (англ., Internet of Things)

TSP – задача коммивояжера (англ., Traveling Salesman Problem)

VRP – задача маршрутизації транспорту (англ., Vehicle Routing Problem)

ВСТУП

Транспортування зачіпає багато етапів систем виробництва та розподілу, і є важливим компонентом кінцевої вартості продукту. За оцінками фахівців, транспортні витрати можуть становити до половини всіх витрат на логістику. Зниження частки цих витрат багато в чому досягається за рахунок планування раціональних маршрутів різного призначення на транспортній мережі, що часто зводиться до вирішення певного варіанта задачі маршрутизації транспорту – Vehicle Routing Problem (VRP). VRP є добре відомим напрямком досліджень у галузі комбінаторної оптимізації та одним з найважливіших класів завдань транспортної логістики, знаходячи застосування практично у всіх областях транспортування, від збору пошти до обробки багажу в аеропорту. Метою завдань даного класу зазвичай є мінімізація вартості, відстані або часу, пов'язаних з транспортуванням, за рахунок визначення оптимальної послідовності відвідування клієнтів для парку транспортних засобів (ТЗ), розташованих в умовному депо. Розробка та застосування методів системного аналізу, управління та обробки інформації для автоматизації рішення VRP вважається ефективним способом економії ресурсів підприємств. Високий інтерес до VRP викликаний одночасно практичною значимістю та значною складністю. Історія завдань класу VRP налічує понад півстоліття, і дослідження навколо них ведуться дуже активно.

Класична постановка задачі, її базові моделі, а також найбільш відомі узагальнення та розширення були запропоновані різними зарубіжними авторами, на досвід яких посилаються сучасні дослідники.

На сьогоднішній день існує безліч різновидів VRP і варіантів постановки, що відрізняються, головним чином, різними обмеженнями, що накладаються на отримуване рішення. Проте вони засновані на моделях, як правило, що не дозволяють повною мірою врахувати безліч чинників, які

визначають якість і вартість отримуваних маршрутів. Нова тенденція досліджень у цій галузі в основному зосереджена на багатофакторних реальних життєвих ситуаціях, у зв'язку з чим виникають складніші та узагальнені варіанти VRP. В даний час найбільш цікавими для досліджень вважаються комплексні VRP Rich VRP, що комбінують різні реальні умови та обмеження. Останнім часом, як інструмент оптимізації у різних сферах, таких як наука, комерція та інженерія, активно використовуються метаевристики. Їхньою відмінністю є детальне вивчення простору пошуку, що визначає безліч допустимих рішень – об'єктів комбінаторної оптимізації. Одними з найбільш перспективних вважаються метаевристики розумного інтелекту, інспіровані природними системами та описують колективну поведінку децентралізованих систем, що самоорганізуються. Тому формалізація завдань VRP та розробка перспективних методів для їх вирішення є актуальним напрямом досліджень у галузі комбінаторної оптимізації.

1 ОПИС КЛАСИЧНОГО ЗАВДАННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ

Класична VRP – задача комбінаторної оптимізації, в якій для парку однотипних транспортних засобів (ТЗ) потрібно визначити оптимальний набір замкнутих маршрутів від єдиного депо до безлічі віддалених клієнтів. На практиці критерій оптимальності може виражатись будь-якими витратами на об'їзд клієнтів, але найчастіше відповідає довжині маршрутів. На рисунку 1.1 показаний типовий приклад побудови маршрутів для парку з трьох ТЗ при мінімізації сумарної довжини маршрутів.

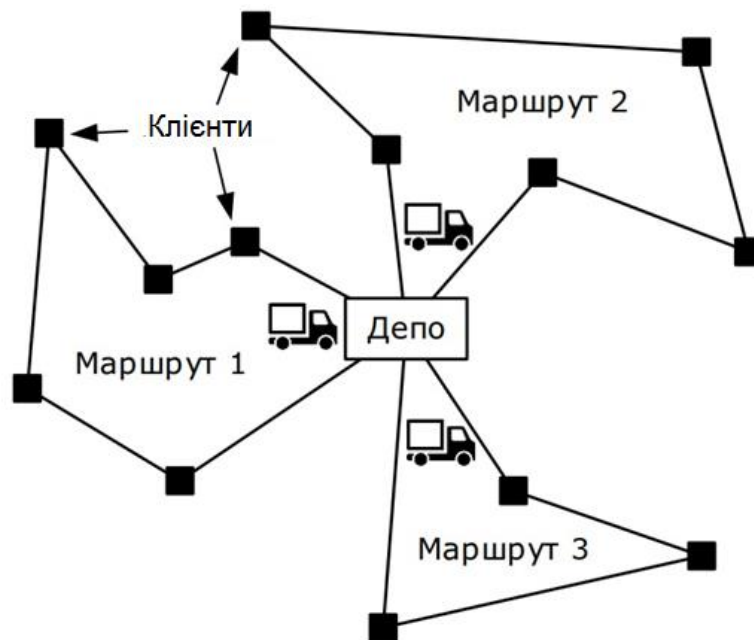


Рисунок 1.1 – Приклад побудови маршрутів для парку із трьох ТЗ

В центрі рисунка розташоване депо, в якому спочатку знаходиться парк з кількох однотипних ТЗ, а на певному віддаленні від нього розташовані клієнти, яких потрібно відвідати. Відстань між усіма пунктами вважається відомою. Оптимальне рішення являє собою набір найкоротших маршрутів для ТЗ через всіх клієнтів з поверненням у депо. Класична VRP може бути представлена на графі:

$$G = (V, E), \quad (1.1)$$

з безліччю вершин:

$$V = \{0, \dots, n\}, \quad (1.2)$$

і безліччю ребер E . Вершини $i = 1, \dots, n$ відповідають клієнтам, тоді як вершина 0 відповідає депо. Також задається матриця $n \times n$ ненегативних вартостей $c_{i,j}$, пов'язаних з кожним ребром:

$$(i, j) \in E, \quad (1.3)$$

та які визначають витрати на пересування між вершинами i та j . Тоді в термінах теорії графів рішення класичної VRP зводиться до побудови кількох гамільтонових циклів мінімальної довжини на підграфах графа G з однією загальною вершиною-депо.

За відсутності обмеження вантажопідйомності та довільної кількості ТЗ k - задача зводиться до побудови k циклів з загальною вершиною 0 , які разом містять всі вершини графа і мінімізують суму вартості об'їзду клієнтів, тобто отримуємо множину завдання комівояжера TSP з k - ізольованими контурами із загальною точкою 0 . Будь-яке завдання класу VRP є узагальненням однієї з найважливіших у галузі комбінаторної оптимізації задачі комівояжера – Traveling Salesman Problem – TSP. Подібне завдання можна перетворити на звичайне TSP додаванням $k - 1$ додаткових копій вершини 0 та суміжних з нею ребер. З огляду на обмеженості класична постановка слабо співвідноситься з практикою.

Сьогодні існує безліч різновидів VRP, більшість яких є комбінаціями декількох основних розширень класичного варіанта. Всі вони відрізняються,

головним чином, різними реальними обмеженнями, що накладаються на рішення, що отримується.

1.1 Огляд та аналіз узагальнень та розширень задачі маршрутизації транспорту

Asymmetric VRP – асиметрична задача маршрутизації транспорту. У загальному випадку, асиметричне завдання відрізняється від симетричного тим, що воно моделюється орієнтованим графом. Відповідно, матриця цін є асиметричною. У більшості наукових праць, присвячених дослідженню VRP, розглядається симетричний варіант завдання, що передбачає симетричність матриці цін. Таке припущення часто співвідноситься з реальними умовами і веде до розриву між теорією і практикою, тобто найкоротший шлях між двома точками дорожньої мережі, як правило, відрізняється залежно від напрямку. Найбільш істотні такі відмінності за малих масштабів, наприклад, у межах міста. З іншого боку, також істотно збільшується простір пошуку, відповідно, ускладнюється знаходження оптимального рішення. Тому, залежно від конкретного прикладного завдання, вартості (ваги дуг) для протилежних напрямків можуть бути зведені до певного усередненого значення.

Capacitated VRP – задача маршрутизації транспорту з обмеженням по вантажопідйомності. Схожа на класичну, з тим лише обмеженням, що обсяг вантажів на кожному маршруті не повинен перевищувати задану величину Q , однакову для всіх ТЗ. Фіксований парк ТЗ однакової місткості із загального депо має з мінімальними витратами задовольнити попит на товар кожного клієнта, і при цьому не перевищити власну вантажопідйомність. Попит і вантажопідйомність задаються цілими чи матеріальними значеннями. Цей найбільш вивчений варіант задачі транспортної маршрутизації був вперше описаний у роботі Данцига та Рамсера, а у 1979 році була дана формалізація у вигляді задачі лінійного програмування.

Distance-Constrained VRP – задача маршрутизації транспорту з обмеженням на відстані. Довжина маршруту не може перевищувати заданого значення. Такий варіант постановки зручно використовувати, коли ТЗ може заправлятися лише в депо і необхідно врахувати обмежений обсяг паливного бака. Обмеження по відстані зазвичай розглядається разом із обмеженням вантажопідйомності.

VRP with Time Windows – задача маршрутизації транспорту з часовими вікнами. Використовується при обмеженому часовому діапазоні приймання чи вивезення продукції. Для виконання запиту кожного i -го клієнта існує певний проміжок часу, визначений як інтервал $[a_i, b_i]$. У разі прибуття раніше нижньої межі інтервалу враховується час очікування її наступу. Прибуття пізніше верхньої межі інтервалу неприпустимо, проте в деяких випадках обслуговування клієнта в певному заздалегідь тимчасовому вікні не є критично важливою умовою, але її порушення додає певного штрафного значення до цільової функції – VRP with Soft Time Windows – (VRPTW). Також може бути врахований сервісний час, необхідний для обслуговування клієнта. Крім решти, рішення VRPTW дозволяє підібрати час виїзду автотранспорту з депо і тим самим уникнути марних простоїв у точках доставки. Постановка задачі виявляється більш складною, але у деяких випадках більш повно описують реальний процес, оскільки у багатьох практичних завданнях доставки товарів час прибуття клієнта і час обслуговування клієнта грають істотну роль.

Multi-Depot VRP – задача маршрутизації транспорту з декількома депо. У класичній моделі VRP передбачається наявність єдиного депо, в якому мають починатися та закінчуватися маршрути всіх транспортних засобів. І хоча такий варіант завдання привернув найбільшу увагу, він не підходить для низки випадків, таких як розподіл продукції декількома постачальниками загальній групі споживачів. MDVRP є узагальненням класичної VRP, у якому існує більше одного депо, з яких здійснюється обслуговування клієнтів, при цьому кожне ТЗ починає та закінчує маршрут у власному депо. Рішення

вважається допустимим, якщо виконуються стандартні умови VRP, однак часто використовуються додаткові обмеження (вантажопідйомність, відстань, час і т.п.). Очевидно, що такий варіант завдання є складнішим, оскільки виникає потреба розподілити споживачів за різними депо. Для цього зазвичай особі, яка приймає рішення, доводиться визначати, які клієнти відносяться до кожного депо, або використовуються двофазні алгоритми, в яких спочатку здійснюється розбиття графа на підграфи, а потім окремо будуються маршрути для всіх депо. В ідеальному випадку ефективніше здійснювати обидва кроки одночасно, однак, при вирішенні завдань великих розмірностей це робити важко. У розширенні задачі з проміжними депо MDVRP with Inter-Depot Routes (MDVRPI) може здійснюватися дозавантаження ТЗ у будь-якому депо на шляху прямування. У системі розподілу ці депо є складами, а в системі збору – пунктами розвантаження.

Periodic VRP (PVRP) – періодична задача маршрутизації транспорту. На відміну від класичної VRP у завданнях із періодичною маршрутизацією використовується розширений період планування до кількох днів. Для різних клієнтів потрібна різна кількість відвідувань у вказаний період, причому дні обслуговування заздалегідь не визначені, але задано список можливих дат відвідування для кожного клієнта. Отже, завдання маршрутизації вирішується для кожного дня планування. У ряді випадків ця особливість має важливе значення, зокрема при вирішенні проблеми збирання відходів. Існує також розширення задачі з вибіркоvim обслуговуванням – PVRP with Service Choice (PVRP-SC), де частота відвідування клієнтів встановлюється в процесі вирішення завдання. Це дозволяє отримати більш оптимальні маршрути та дає переваги при обслуговуванні клієнтів.

VRP with Pickup and Delivery (VRPPD) – завдання маршрутизації транспорту з вивезенням та доставкою. Узагальнення завдання з обмеженням вантажопідйомності, в якому клієнти можуть як отримувати, так і надсилати товари. При цьому, як правило, мається на увазі, що товари не перевозяться від одного клієнта до іншого, а спочатку відправляються з депо, або зрештою

надходять у депо. VRPPD підрозділяється залежно від порядку доставки та вивезення, які можуть здійснюватися послідовно, змішано або одночасно:

- delivery-first, pickup-second VRP всі товари повинні бути доставлені клієнтам-споживачам, перш ніж відбудеться будь-яке вивезення від клієнтів-постачальників (рисунок 1.2).

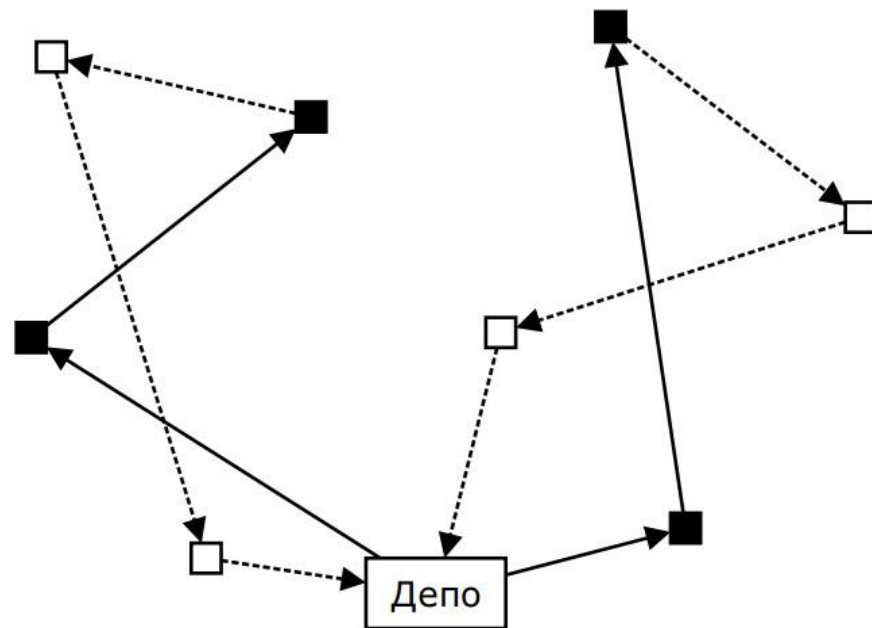


Рисунок 1.2 – Всі товари мають бути доставлені клієнтам-споживачам

Прийняті позначення:

- чорний квадрат – позначає пункт доставки;
- білий квадрат – позначає пункт вивезення;
- чорна суцільна стрілка – шлях доставки;
- штрихпунктирна стрілка – шлях вивезення.

Таким чином, розв'язання задачі поділяється на дві фази. З практичної точки зору ця вимога пояснюється тим фактом, що всі навантаження зазвичай здійснюються ззаду транспорту і перестановка вантажів є неприйнятною або витратною за часом. У той самий час зростає ризик перевищення вантажопідйомності ТЗ, незалежно від співвідношення рівнів

попиту вивезення і доставки. Інша відома назва – VRP with Backhauls (VRPB) – задача маршрутизації транспорту зі зворотним транзитом (із поверненням товарів);

- mixed pickup and delivery VRP вивіз та доставка можуть проводитися в будь-якій послідовності за маршрутом ТЗ (рисунок 1.3), проте клієнти також як і в попередньому випадку поділені на постачальників та споживачів.

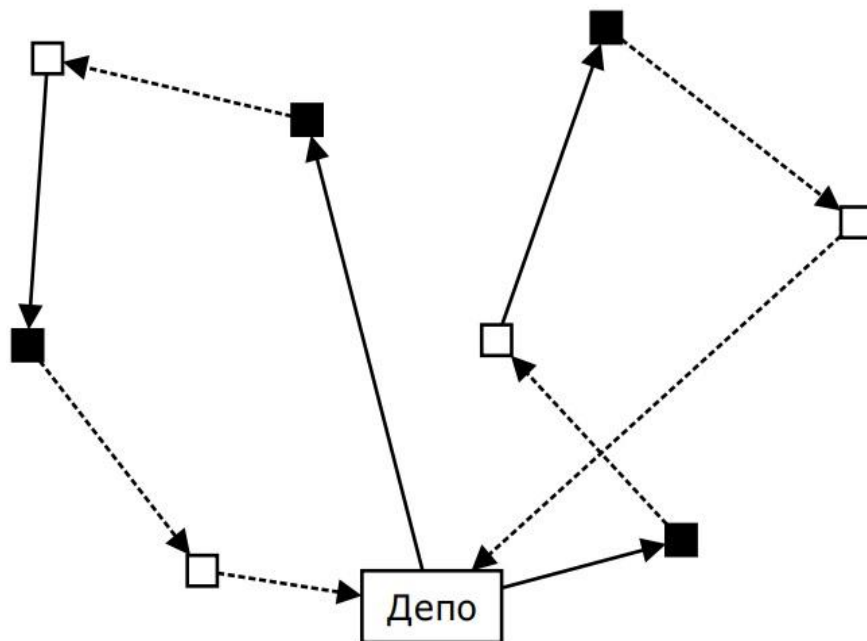


Рисунок 1.3 – Вивезення та доставка можуть проводитись у будь-якій послідовності за маршрутом ТЗ

Такий варіант дозволяє отримати більш оптимальні маршрути, проте ускладнює навантаження та вивантаження товарів. Іноді також використовується позначення Mixed VRP with Backhauls (VRPMB) – змішана задача маршрутизації транспорту із зворотним транзитом;

- VRP with Simultaneous Pick-up and Delivery одні й ті самі клієнти одночасно виступають у якості споживачів і постачальників (рисунок 1.4), повертаючи певний товар в депо.

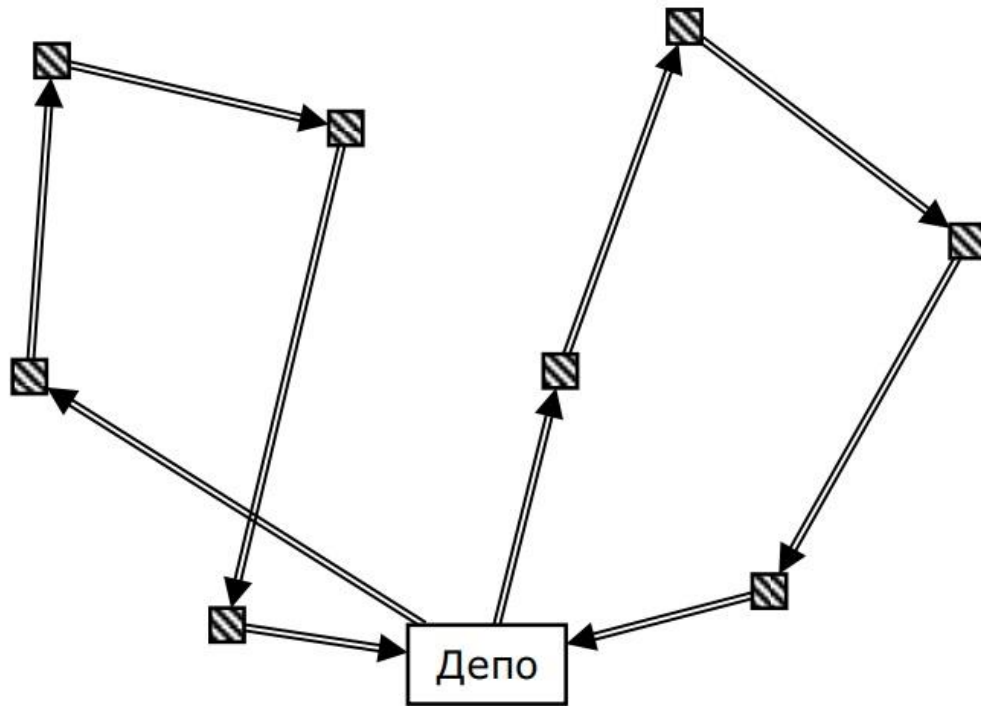


Рисунок 1.4 – Одні й ті ж самі клієнти одночасно виступають як споживачі і постачальники

Прийняті позначення:

- заштрихований квадрат позначає пункт доставки та вивезення;
- подвійна стрілка – шлях доставки та вивезення.

На практиці це потрібно, наприклад, при доставці до продуктових магазинів, коли багаторазові піддони або контейнери використовуються для транспортування товарів. Обидва останні варіанти можуть бути описані за допомогою загальної моделі VRPMPD як VRPSPD, в якій попит на доставку або вивіз дорівнює нулю, а VRPMPD як VRPSPD, якщо кожного клієнта розбити на одержуваючого та відправляючого товар (рисунок 1.5).

У розглянутих вище варіантах VRPPD передбачалося, що запити на вивезення та доставку відносяться як один-до-багатьох-до-одного (one-to-many-to-one problem), коли товари транспортуються від депо до клієнтів та у зворотному напрямку. Однак, іноді також відносять до VRPPD різновиди зі зв'язками багато-до-багатьох (many-to-many problem), в яких будь-який

клієнт може відправляти і отримувати будь-який товар, і зі зв'язками один-до-одного (one-to-one problem) у яких встановлюється попарна відповідність між пунктами навантаження та пунктами доставки у вигляді запитів.

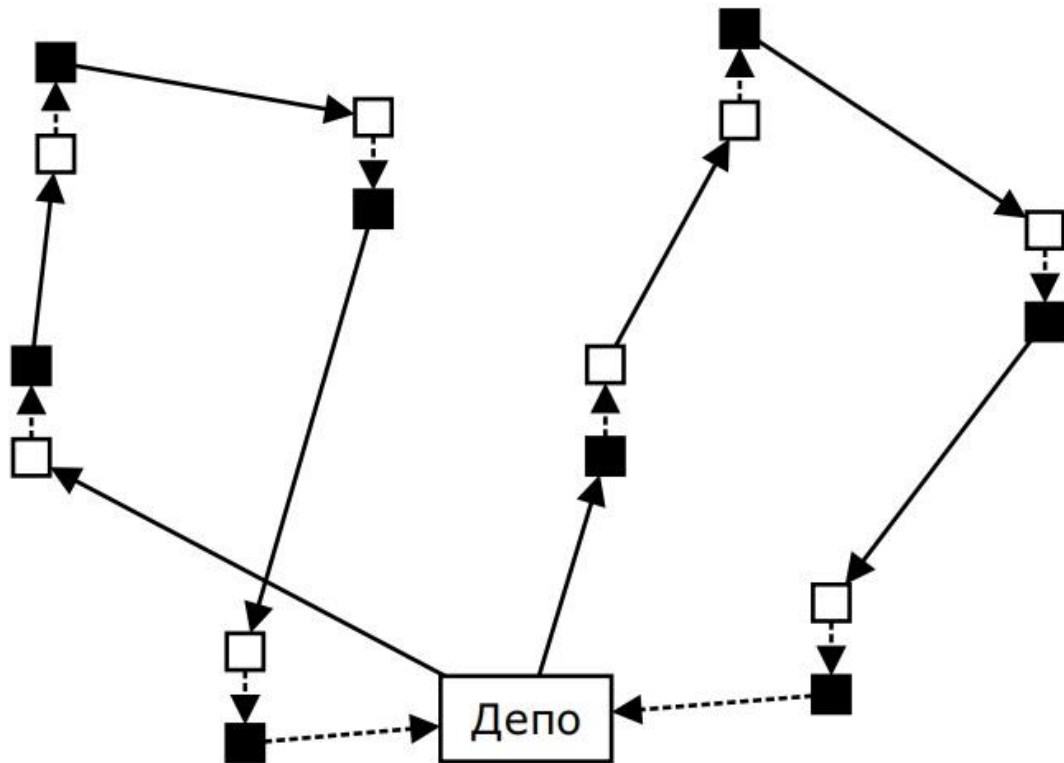


Рисунок 1.5 – Кожен клієнт отримує та відправляє товар

У першому випадку товар вивозиться від одного з багатьох постачальників та доставлятиметься одному з багатьох споживачів (рисунок 1.3) за умови вивезення та доставки товару від одних клієнтів до інших. У другому випадку, кожен запит визначається пунктом навантаження, відповідним йому пунктом доставки і заданою кількістю вантажу, яку потрібно транспортувати між зазначеними пунктами (рисунок 1.6). Добре відомими прикладами завдань з парними зв'язками є Pickup and Delivery Problem (PDP), що застосовується при перевезенні товарів, і Dial-A-Ride Problem (DARP), що застосовується при перевезенні людей, що виражається в різних додаткових обмеженнях та цілях.

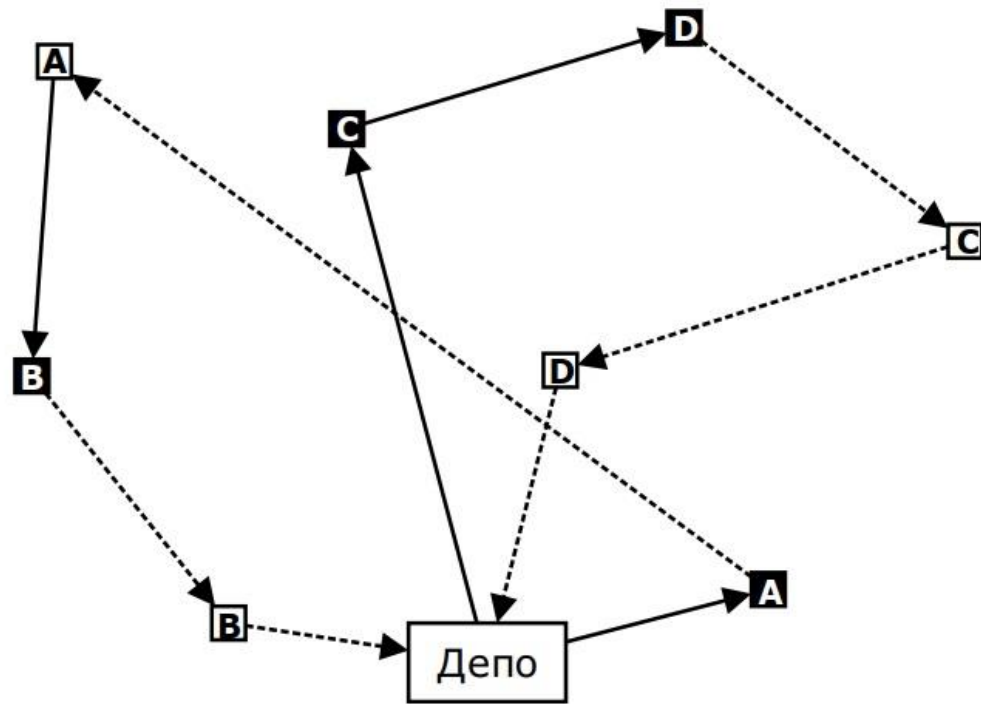


Рисунок 1.6 – Приклад задачі з парними зв'язками

Загальне завдання вивезення та доставки General Pick-up and Delivery Problem (GPDP) дозволяє визначити багато завдань з вивезенням та доставкою як окремі випадки її формулювання. Варто окремо відзначити варіант VRP зі стіковим принципом «останнім прийшов – першим вийшов» – VRP with LIFO. Аналогічна VRPPD за винятком додаткового обмеження: розвантаження ТЗ може здійснюватись лише у зворотному порядку завантаження, тобто першим завжди вивантажується останній завантажений товар (рисунок 1.7). Зазвичай використовується при мультиноменклатурному вантажі для скорочення часу завантаження та розвантаження ТЗ, тому що відпадає необхідність переставляти товар. Однак у літературі добре вивчений лише випадок з одним ТЗ – TSP with Pickup and Delivery and LIFO (TSPPDL) – завдання комівояжера з вивезенням та доставками за принципом LIFO.

Split Delivery VRP (SDVRP) – задача маршрутизації транспорту з роздільною доставкою. У задачі знімається загальна для всіх VRP заборона на багаторазове відвідування клієнта. Тобто той самий клієнт може бути

обслужений безліч разів декількома ТЗ, якщо це дозволяє зменшити загальні витрати. Така постановка є особливо виправданою, якщо запити клієнтів перевищують вантажопідйомність ТЗ. Експериментально показано, що залежно від характеристик задачі може бути отриманий різний вигравш у довжині маршрутів під час використання роздільної доставки.

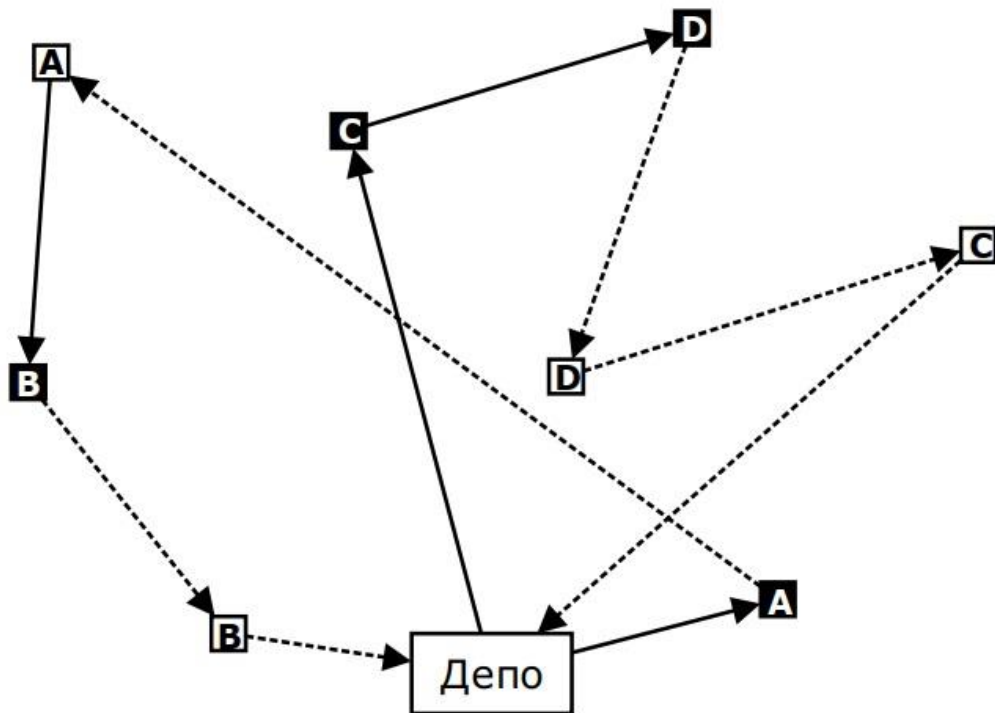


Рисунок 1.7 – Першим завжди вивантажується останній завантажений товар

При розгляді задачі простим підходом є розбиття кожного клієнта на безліч близько розташованих з меншими запитами, тим самим завдання зводиться до звичайної VRP. Однак, як правило, для задачі маршрутизації з різними видами транспорту отримати оптимальне рішення складніше, ніж для класичної VRP.

Stochastic VRP (SVRP) – задача маршрутизації транспорту з довільними даними. Один або кілька компонентів завдання можуть мати випадкову поведінку:

- vrp with Stochastic Demands (VRPSD) попит кожного клієнта

пов'язаний із заданим імовірнісним розподілом, замість конкретного значення, а дійсне значення визначається лише після прибуття ТЗ;

- vrp with Stochastic Clients (VRPSC) безліч клієнтів точно не відоме, кожен клієнт існує з деякою ймовірністю;
- vrp with Stochastic Travel Time (VRPST) часи поїздок (відстані) між пунктами не детерміновані;
- vrp with Stochastic Service Time (VRPSST) час обслуговування кожного клієнта не детермінований.

Svrp відрізняється від класичної VRP у ряді аспектів. Методологія рішення є складнішою і поєднує у собі особливості стохастичного і цілісного програмування. Більш того, часто завдання даного типу виявляються нерозв'язними. Лише в окремих випадках вдається отримати оптимальне значення, тому розробка та застосування хороших евристик скрутні. Рішення SVRP зазвичай відбувається у два підходи. Перший етап дає рішення без урахування випадкових змінних. На другому етапі, коли стають відомими випадкові значення, відбувається корекція раніше отриманого рішення.

Fuzzy VRP (FVRP) – нечітка задача маршрутизації транспорту. На практиці буває важко отримати точні значення запитів, часу шляху, кількості та місця розташування клієнтів, меж тимчасових вікон та інших величин, якщо вони підкоряються ймовірним законам. У деяких нових системах також складно описати параметри завдання як випадкові величини через недостатність даних для аналізу розподілу. Використання методів теорії нечітких множин дозволяє успішно моделювати завдання, що містять елементи невизначеності та суб'єктивності. Основними різновидами FVRP є:

- vrp with Fuzzy Demands (VRPFD) нечіткий попит клієнтів на товар;
- vrp with Fuzzy Travel Time (VRPFT) нечіткі часи поїздок (відстань) між пунктами;
- vrp with Fuzzy Service Time (VRPSST) нечіткий час обслуговування кожного клієнта;
- vrp with Fuzzy Time Windows (VRPFTW) нечіткі межі тимчасових

вікон, у яких можуть обслуговуватися клієнти.

Dynamic VRP (DVRP) – динамічна задача маршрутизації транспорту. Передбачається, що можуть відбуватися деякі зміни параметрів завдання у процесі її вирішення. До таких зазвичай відносяться поломки ТЗ, дорожні затори, нові замовлення, раптові виклики тощо. Найчастіше розглядається випадок, коли нові клієнти можуть з'являтися протягом дня, тобто після того, як ТЗ залишить депо. Таким чином, в міру обслуговування клієнтів умови задачі змінюються і необхідно динамічно перераховувати маршрути з урахуванням нової інформації, що надходить. Як правило, наперед відома статистика появи нових замовлень, на основі якої створюються імітаційні моделі для розробки та випробування алгоритмів.

Open VRP (OVRP) – відкрита задача маршрутизації транспорту. Незамкнутий варіант задачі, в якому не потрібно повертатися в депо наприкінці маршруту. Таким чином, віддаленість останнього відвіданого клієнта від депо не впливає на загальну вартість рішення. Найчастіше OVRP використовується у тому випадку, коли підприємство не володіє парком ТЗ, а укладає контракт із зовнішніми кур'єрами. Відповідно, наймані ТЗ не повинні повертатися до розподільчого центру підприємства (депо) і можуть закінчити маршрут у будь-якому місці. Рішення має забезпечити мінімальний набір ТЗ, які мають бути найняті для обслуговування всіх клієнтів із мінімальними витратами на дорогу. Крім того, за наявності власного парку ТЗ та значних коливаннях споживчого попиту з плином часу, рішення дозволяє визначити відповідне поєднання власних та найнятих ТЗ. Варто також відзначити, що зняття типового для всіх VRP вимог повернення в депо не робить завдання простішим, OVRP також залишається NP важким. У той же час є принципова відмінність: в OVRP будуються гамільтонові шляхи, що починаються в депо, а в звичайній VRP – гамільтонові цикли. У зв'язку з цим алгоритми розв'язання замкнутих завдань часто виявляються неефективними при вирішенні незамкнених. Проте незамкнутий варіант задачі зводиться до замкнутого шляхом заміни ваг дуг, що входять у депо, на число 0.

Оптимальний замкнутий маршрут у такому графі відповідає оптимальному незамкнутому маршруту у вихідному графі.

Heterogeneous VRP (HVRP) – задача маршрутизації транспорту із різнорідним парком. Узагальнення класичної VRP, в якому клієнти обслуговуються декількома типами ТЗ з різними характеристиками, такими як вантажопідйомність, швидкість, вартість використання тощо. Як правило, парк ТЗ у моделях VRP є однорідним, що рідко відповідає реальній практиці. Таке припущення дозволяє спростити пошук рішення, але в логістичних операціях часто потрібно брати до уваги характеристики кожного конкретного ТЗ.

VRP with Satellite Facilities (VRPSF) – задача маршрутизації транспорту з супутніми складами. Класичне завдання VRP припускає, що кожен маршрут починається і закінчується депо. Однією з причин повернення в депо є обмежена вантажопідйомність – коли машина розвозить усі товари, вона має повернутися до депо за новою порцією товарів. Однак, у деяких випадках вигідніше зробити дозавантаження на маршруті у додаткових проміжних пунктах поповнення (супутніх складах), без повернення до депо. Цей варіант застосовується у ситуаціях, коли центральний постачальник повинен забезпечувати товаром велику кількість споживачів на регулярній основі. VRPSF є складовою задачі розподілу товару - Inventory Routing Problem (IRP). В основі більшості різновидів VRP мається на увазі базове обмеження вантажопідйомності (CVRP), яке явно при описі може не вказуватися. Очевидно, за рахунок поєднань розглянутих вище різновидів VRP можна отримати безліч варіантів її постановок.

1.2 Аналіз методів метаевристичної оптимізації

Термін "метаевристика", що походить від грецького прийменника "meta" (у значенні "вищий рівень") і "heuristic" (від грец. εὐρισκείν, "шукати"), був вперше введений Фредом Гловером в 1986 р. для позначення

алгоритмічних схем більш високого рівня, спрямованих на ефективне вивчення простору для пошуку складних оптимізаційних завдань. Перші метаевристичні методи стали з'являтися ще до введення даного терміна, і для їх позначення використовувалися ширші терміни – «оптимізація чорної скриньки» (Black-Box Optimization) або «слабка оптимізація» (англ. Weak Methods). Насправді метаевристики описують великий (а також основний) підрозділ у стохастичній оптимізації – великому класі алгоритмів та методів, які тією чи іншою мірою використовуються випадково для пошуку оптимального (близького до оптимального чи субоптимального) вирішення складних завдань. Метаевристики є сучасним потужним та надзвичайно популярним класом оптимізаційних методів, що дозволяють знаходити рішення для широкого кола завдань із різних додатків. Сила метаевристичних методів полягає в їх здатності вирішувати складні задачі без знання простору пошуку, саме тому ці методи дають можливість вирішувати задачі оптимізації, що важко розв'язати. У метаевристичних методах акцент робиться на ретельному вивченні найперспективніших елементів простору рішень. Якість одержуваних рішень виходить вищою, ніж у отриманих класичними евристичними методами. Особливість метаевристичних алгоритмів у тому, що вони не дають точного опису порядку дій для вирішення задачі, і кожен з них повинен бути додатково конкретизований шляхом підбору значень параметрів, що управляють.

Метаевристика – це такий метод вирішення обчислювальних завдань шляхом комбінування існуючих процедур із відкритим інтерфейсом та закритою реалізацією, що призводить до максимально ефективного вирішення. Метаевристичний підхід зазвичай застосовується для вирішення задач, що не мають задовільного специфічного для завдання алгоритму, або в тому випадку, коли немає практичної необхідності реалізовувати такий алгоритм. Найчастіше метаевристики використовуються у вирішенні задач комбінаторної оптимізації, але також вони можуть застосовуватися до будь-яких інших, які можна звести до розв'язання логічних рівнянь. На відміну від

традиційних алгоритмів оптимізації та ітераційних методів, метаевристики не гарантують, що у глобальному масштабі оптимальне рішення може бути знайдено для деякого класу завдань через стохастичність. Однак при пошуку за великими наборами допустимих рішень метаевристики часто дозволяють знайти хороше рішення з меншими обчислювальними та тимчасовими витратами. Virізняють такі властивості метаевристик:

- метаевристика є стратегією, яка керує процесом пошуку;
- метою метаевристики є ефективне дослідження простору пошуку знаходження (суб) оптимального рішення;
- методи, що реалізуються метаевристичним алгоритмом, варіюються від простого локального пошуку до складного процесу навчання;
- метаевристичний алгоритм є наближеним і зазвичай недетермінованим;
- до метаевристики закладається механізм, що запобігає застряганню в локальному оптимумі.;
- основні положення метаевристик припускають абстрактний опис;
- метаевристика може використовувати проблемно-орієнтоване знання у формі евристик, керованих високорівневою стратегією;
- передові метаевристики використовують досвід, накопичений у процесі пошуку та представлений у вигляді пам'яті, для управління пошуком.

Основна частина літератури на тему метаевристик має експериментальний характер, описуючи емпіричні результати, засновані на імітаційному моделюванні та програмному експерименті з алгоритмами. Однак існують також деякі формальні теоретичні результати, що обґрунтовують можливість знаходження глобального оптимуму. На рис.1.8 представлена класифікація відомих метаевристик з конкретними прикладами алгоритмів з кожної групи як діаграми Ейлера. Практично всі метаевристики запропоновані на основі ідей, що з'явилися під час спостереження процесів живої та неживої природи. Вивчення процесів при відпалі металів, спостереження за розмноженням особин у деякій популяції та організація

мурашиних колоній послужили основою цілої серії ідей таких метаевристик, як алгоритм імітації відпалу, генетичний алгоритм та мурашиний алгоритм, що застосовуються у тому числі для вирішення VRP.

Наведемо приклади метаевристичних алгоритмів, які вже успішно застосовувалися для вирішення VRP:

- пошук із винятками;
- модельований відпал;
- генетичний алгоритм;
- мурашиний алгоритм;
- нейронні мережі.

Сильною стороною аналізованих алгоритмів є швидкість роботи навіть при великій розмірності задачі та можливість подолання локального мінімуму у процесі пошуку. На думку дослідників такі алгоритми, як генетичні та мурашині, зараз ще відносно слабо вивчені, хоча містять великий простір для подальшого пошуку покращень, потенційно здатних привести до помітного зростання якості.

Перешкодою до практичної реалізації більшості метаевристик є або їх абстрактний опис (просто перерахування найменування етапів алгоритму), або опис, орієнтований на вирішення лише однієї певної проблеми (наприклад, оптимізації чи числових функцій, або комбінаторної оптимізації), тому для вирішення різних завдань VRP потрібна модифікація існуючих метаевристик або розробки принципово нових. В останні роки виник підвищений інтерес дослідників до метаевристик роєвого інтелекту, що описують колективну поведінку децентралізованих самоорганізованих систем. У різних спеціальних областях знаходять застосування такі сучасні біоінспіровані алгоритми, як бактеріальні, світлячкові, бур'янні, зозуляні, мавпячі та ряд інших. Мурашині алгоритми вважаються одними з найперспективніших у галузі транспортної логістики. Багаторазово підтверджувалася ефективність мурашиного алгоритму при вирішенні NP-

важких завдань, зокрема, TSP, для якої близьке до оптимального рішення може бути знайдено за поліноміальний час.

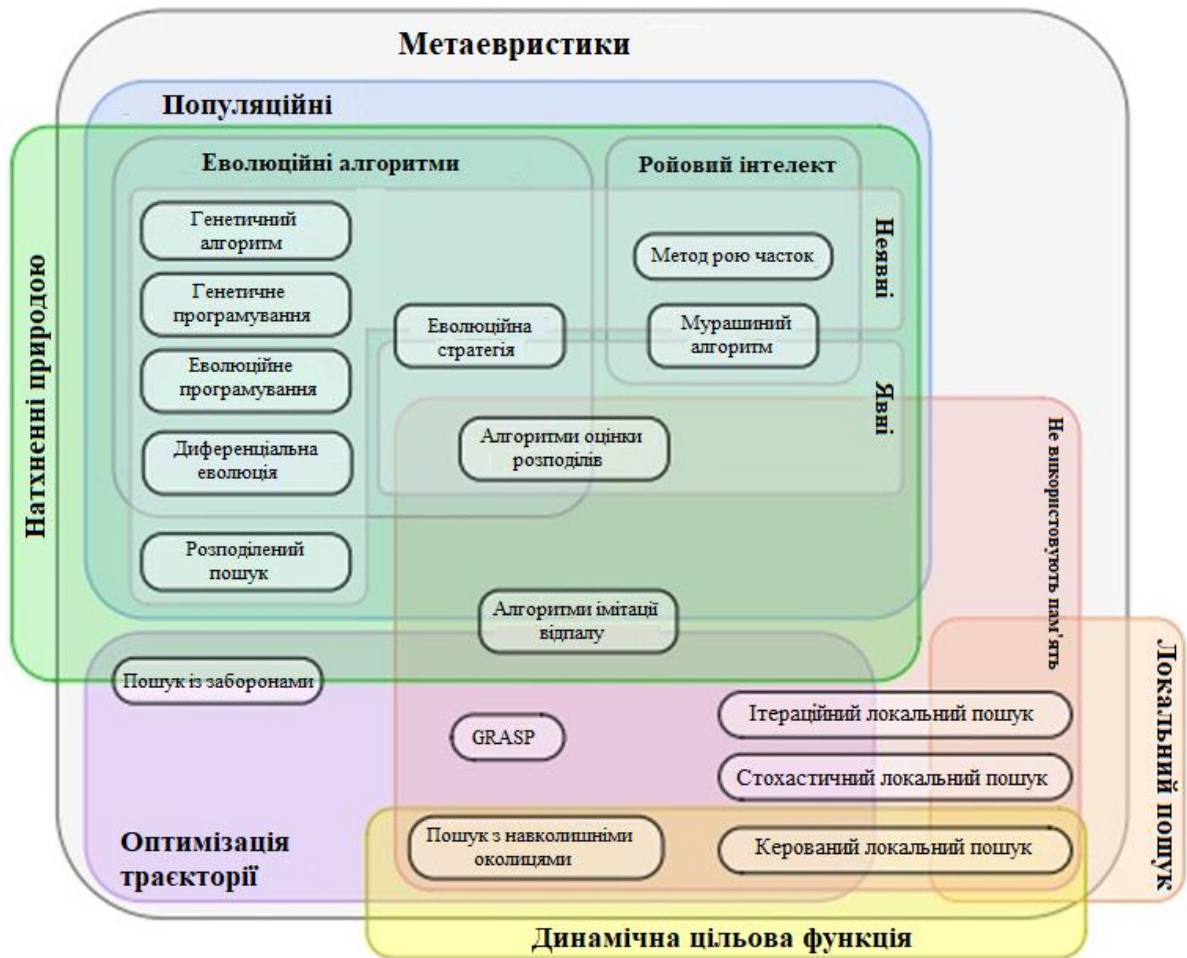


Рисунок 1.8 – Класифікація метаевристич на діаграмі Ейлера

На тестових завданнях мурашиний алгоритм, поєднаний із локальним пошуком, показав кращі результати, ніж імітаційний відпал, генетичний алгоритм та еволюційне програмування. Однак TSP є лише окремим випадком VRP. Більш того, багато практичних завдань насправді складніші за існуючі математичні моделі, а облік їх особливостей часто не передбачений відомими мурашиними алгоритмами. У зв'язку з цим виникає необхідність адаптувати мурашиний алгоритм під особливості VRP, що вирішується так, щоб враховувалися всі умови і при цьому зберігалися його

переваги.

Зазначимо, що алгоритми, ефективні під час вирішення одних різновидів VRP, часто виявляються малоефективними і навіть непридатними під час вирішення інших. При цьому, як було показано, на практиці зустрічаються різні умови, коли багато розширень і узагальнення VRP доводиться комбінувати. У зв'язку з цим є сенс поєднати безліч поширених варіантів VRP в одній узагальненій постановці, яка дозволить розробляти методи рішення на основі єдиної моделі. З урахуванням того, що кожне узагальнення дозволяє описати класичний варіант задачі як окремий випадок, об'єднання різних варіантів VRP в рамках однієї моделі є можливим. Таким чином можуть бути поєднані відразу кілька узагальнень та розширень VRP, що мають місце у певних сферах застосування. Проведений аналіз дозволяє сформулювати мету досліджень, які необхідно провести у магістерській кваліфікаційній роботі – це розробка ефективних методів вирішення багатокритеріальних завдань VRP на основі технології – мурашиного алгоритму.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ МУЛЬТИКОЛОНІАЛЬНОЇ МУРАШИНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Побудова математичної моделі

Нехай надано кілька джерел продукції або транспортних підприємств (депо) із закріпленими за ними автомобілями (ТЗ) з різними характеристиками (рисунок 2.1).

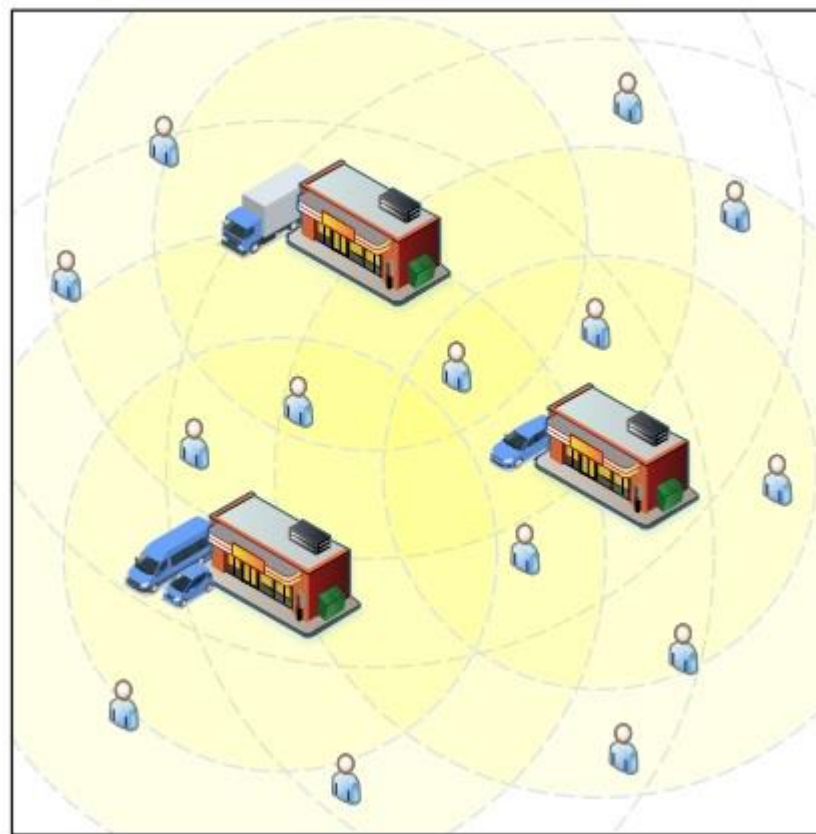


Рисунок 2.1 – Асиметрична задача маршрутизації транспорту з множинним депо та різнорідним парком

Є список замовлень на доставку чи обслуговування з адресами замовників (клієнти), як показано на рисунку 2.1. Потрібно розбити адресатів між усіма автомобілями та сформувані найбільш вигідні спрямовані

маршрути. Відвідування кожного клієнта може здійснюватися лише одноразово, у будь-якому порядку та будь-якими ТЗ із поверненням у депо після закінчення маршруту. Всі депо є вершинами орієнтованого графа, дуги різного типу якого відповідають найкоротшим шляхам між ними. Існують різномірні ТЗ та їх закріпленість за конкретними депо. Завдання передбачає облік безлічі реальних критеріїв оцінки якості рішення та об'єднує відразу кілька узагальнень та розширень VRP, дозволяючи поєднувати поширені на практиці умови:

- асиметричність матриць вхідних даних. Допущення про ідентичність шляху між двома пунктами незалежно від напрямку руху (симетричність) не співвідноситься з реальними умовами і може призводити до розриву між теорією та практикою, особливо у світлі тенденції розвантаження доріг за допомогою установок одностороннього руху та заборон лівих поворотів. Крім того, більшість відомих програмних інструментів для автоматичного прокладання маршрутів між точками надають дані з урахуванням обраного напрямку. У зв'язку з цим доцільно розглядати складніший асиметричний варіант задачі (AVRP), що моделюється орієнтованим графом. При цьому симетричний випадок не виключається з розгляду, оскільки є лише окремим випадком;

- множинність депо. У моделях VRP поширеним є припущення про єдиність централізованого депо, але у запропонованому варіанті парк розподілено: різні ТЗ закріплені за різними пунктами виробництва або складами, що позначаються як депо. Відповідно, розглядається постановка з множинним депо (MDVRP), яка забезпечує масштабованість, наприклад, у разі мережі підприємств. Зауважимо, що такий варіант є узагальненням класичної VRP і не відкидає випадок з єдиним депо;

- обмеження вантажопідйомності. Зазвичай, якщо прикладне завдання пов'язане з перевезенням людей або товарів, а не виконанням сервісних робіт, обсяг вантажів на кожному маршруті не повинен перевищувати певну задану величину через обмеження, що накладаються параметрами самого

транспортного засобу. Тому обмеження вантажопідйомності є базовим для більшості варіантів задачі маршрутизації транспорту та враховується у запропонованій постановці;

- різномірність парку транспорту. Нехтування відмінностями у характеристиках транспортних засобів дозволяє спростити пошук рішень для існуючих методів, але в логістичних операціях часто потрібно брати до уваги характеристики кожного конкретного транспортного засобу, особливо за наявності кількох класів транспорту та великих розмірів парку. У запропонованій постановці передбачається, що кількість доступних ТЗ кожного типу є фіксованою (HFFVRP), тобто обмежено деяким максимальним значенням.

Аналітично це завдання можна записати наступним чином.

Надано повний орієнтований граф:

$$G = (V, A), \quad (2.1)$$

Параметр V визначається за формулою:

$$V = V_C \cup V_D, \quad (2.2)$$

i являє собою безліч усіх вершин $\{1, \dots, n\}$, причому вершини V_C представляють клієнтів, а V_D представляють депо.

Параметр A визначається за формулою:

$$A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}, \quad (2.3)$$

i являє собою безліч дуг між вершинами.

Початкове розташування парку транспорту визначено сюр'єктивним відображенням:

$$\varphi: K \rightarrow V_D, \quad (2.4)$$

Безліч транспортних засобів K на підмножину вершин V_D . Значення попиту q_j задано для кожного клієнта $j \in V_c$, а вантажопідйомність Q_k задана для кожного транспортного засоба $k \in K$. З кожною дугою пов'язані значення вхідних параметрів, що характеризують шляхи руху транспортних засобів.

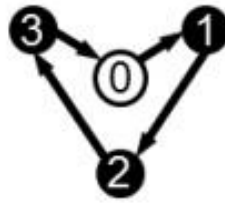
Таким чином отримуємо багатокритеріальну асиметричну задачу маршрутизації транспорту з множинним депо та різномірним парком. Описане завдання має широке застосування у тих прикладних сферах, де виникає необхідність децентралізованої транспортної доставки, обслуговування, візництва та організації транспортно-складських процесів, постачання з розподілених пунктів виробництва до безлічі віддалених пунктів споживання тощо. Характерними прикладами областей, на які орієнтована описана задача, є:

- товарна дистрибуція;
- розвезення своєї продукції;
- кур'єри та поштові служби;
- доставка швидкого харчування;
- сервісні інженери.

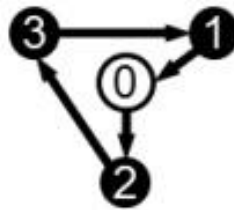
Як приклад на рисунку 2.2 показані можливі варіанти маршрутів на чотирьох вершинах для парку з 3-х транспортних засобів, розташованих у загальному депо:

- кружечками з номерами відзначені транспортні засоби – це вершини;
- центральна вершина $\{0\}$ – депо;
- стрілками вказано напрямки слідування ТЗ.
- З рисунку 2.2 видно, що навіть за малих значеннях $(n - n_0)$ існує

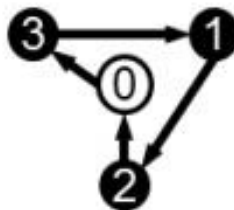
велика кількість рішень. У конкретному прикладі при $(n - n_0) = 3$.



а)



б)



в)

Рисунок 2.2 – Приклад рішення поставленої VRP при $(n - n_0) = 3$: а) приклад №1 рішення поставленої VRP; б) приклад №2 рішення поставленої VRP; в) приклад №3 рішення поставленої VRP

Новий метод мультиколоніальної мурашиної системи (Ant Multi-Colony Optimization, AMCO) пропонується для вирішення узагальнених варіантів задач комбінаторної оптимізації, в яких подібно до поставленої VRP масштабовано число рішень деякого відомого окремого випадку, для якого відоме застосування традиційного мурашиного алгоритму. Такі узагальнені

завдання мають безліч подібних підзавдань і передбачають пошук складового рішення. У зарубіжній літературі зустрічаються ідеї мурашиного алгоритму з безліччю колоній для застосування у розв'язанні задач інших областей, проте підходи принципово відрізняються від описаної в даній магістерській кваліфікаційній роботі. Наприклад, ієрархічні нечіткі багатоколоніальні мурашині алгоритми пропонувалися на вибір оптимальної структури телекомунікаційної мережі нафтотранспортних підприємств. Різні мурашині колонії використовувалися на різних етапах пошуку рішення:

- визначення ступеня однорідності трас, що прокладаються, першою колонією;
- визначення вартості трас, що прокладаються, другою колонією;
- пошук локального рішення третьою колонією.

Інша відома концепція полягає у використанні декількох колоній на різних процесорах з метою прискорення обчислень. Основна ж ідея нового варіанта оптимізації за принципом мурашиної колонії полягає в тому, що замість звичної для традиційного мурашиного алгоритму однієї колонії тепер використовується кілька, що діють спільно у загальному просторі пошуку. При цьому кожна колонія на основі механізму стигмергії вирішує своє завдання, формуючи свою частину в загальному рішенні. Для обліку особливих умов кожної підзадачі колонії можуть по-різному інтерпретувати вхідні дані і мати параметри, що впливають на прийняття рішень. Щоб уникнути плутанини при зверненні до попереднього досвіду, використовуються різні феромони, які сприймаються лише тими колоніями, які їх залишили. Більше того, у певних випадках доцільний відштовхуючий ефект чужорідного феромону. Таким чином, феромон направляє колонію на пошук вирішення власної підзадачі. При цьому відкладаються феромони всіма колоніями для відповідних частин розв'язання з однаковою концентрацією, пропорційної вартості розв'язання задачі в цілому. Випаровування також відбувається одночасно і з рівною швидкістю. З усього цього можна зробити висновок, що обов'язково загальними, поділюваними

усіма колоніями, залишаються лише елементи рішення у просторі пошуку, тобто частина рішення однієї колонії неспроможна у той самий час бути частиною рішення іншої колонії. Тепер розберемо процес побудови рішення у пропонованій мультиколоніальній мурашиній системі у термінах теорії графів. Як відомо, в залежності від типу задачі на кожній ітерації мурашиного алгоритму відбувається формування рішення мурахою у вигляді послідовності виборів станів, дій, пунктів призначень тощо, що позначаються далі вершинами графа для загального виду. У мультиколоніальній мурашиній системі частини рішення будуються одночасно декількома мурахами. Насамперед формуються групи мурах, які включають по одному представнику від кожної колонії. По суті, кожна така міжколоніальна група є заміною окремої мурахи традиційного варіанту алгоритму. Мурахи групи в результаті «жеребкування» крок за кроком формують рішення, включаючи вершини на кожному кроці в порядку, що визначається ймовірно на основі об'єднаної множини альтернатив. Мураха в групі k , яка належить колонії x , включить у свою частину рішення вершину i на ітерації t з нормалізованою ймовірністю:

$$p_{x,j}^k(t) = \frac{[\tau_{x,j}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,j}^k]^\beta}{\sum_{y \in Y} \sum_{j \in J^k} [\tau_{x,j}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,j}^k]^\beta}, \quad (2.5)$$

Щоб унеможливити багаторазове повторення розрахунку суми добутоків у знаменнику формули, при програмній реалізації доцільно здійснювати нормалізацію в останню чергу. Для цього пропонується використати спочатку формулу розрахунку ненормалізованих ймовірностей:

$$p_{x,j}^k(t) = [\tau_{x,j}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,j}^k]^\beta, \quad (2.6)$$

потім одноразово обчислити суму отриманих значень

ненормалізованих ймовірностей усієї групи k :

$$P^k(t) = \frac{p_{x,j}^k(t)}{\sum_{y \in Y} \sum_{j \in J^k} p_{x,j}^k(t)}, \quad (2.7)$$

після чого виконати нормалізацію для кожного значення за формулою:

$$p_{x,j}^k(t) = \frac{p_{x,j}^k(t)}{P^k(t)}, \quad (2.8)$$

Як тільки безліч альтернатив виявиться порожнім, тобто всі вершини будуть відвідані, здійснюється повернення всіх мурах у стартову вершину (якщо потрібно) і рішення вважається сформованим.

Так само будують свої рішення всі міжколоніальні групи мурах. Для кожного рішення збільшується кількість феромону на дугах, використаних відповідними колоніями, обернено пропорційно до сумарної ваги всіх дуг рішення, а потім традиційним чином відбувається часткове повсюдне випаровування феромону.

3 АПРОБАЦІЯ МУЛЬТИКОЛОНІАЛЬНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ

Нині, у межах щодо нового напрямку (природних обчислень - natural computing) активно створюються та вдосконалюються методи глобальної оптимізації, інспіровані природними системами. У цих методах штучного інтелекту відображені механізми прийняття рішень та адаптації, сформовані природним шляхом унаслідок мільйонів років еволюції.

Подібним чином мурахи за більш ніж 100 мільйонів років існування пристосувалися до виживання в різних умовах практично у всьому світі, утворюючи популяцію 10^{16} особин, загальна вага яких становить від 10 до 25% земної біомаси наземних тварин.

Мурашині колонії при відносно простій поведінці кожної окремої особи представляють складну соціальну структуру і здатні вирішувати складні завдання, наприклад, знаходити найкоротший шлях за допомогою хімічного регулювання (рисунок 3.1). Це привернуло увагу багатьох дослідників, які вивчали механізми взаємодії особин колонії.

Ставлячи експерименти на вибір між двома шляхами нерівної довжини, що ведуть від гнізда до джерела живлення, біологи помітили, що, як правило, мурахи зрештою використовують короткий маршрут. Модель такої поведінки полягає в наступному:

- спочатку мурашки рухаються випадковим чином від гнізда;
- коли одна із мурах знаходить їжу, вона повертається назад у гніздо, залишаючи за собою слід особливого ферменту – феромону;
- інші мурахи сприймають «запах» відкладеного феромону і намагаються слідувати по зазначеному шляху;
- феромонні стежки породжують асинхронну і непрямую схему комунікації, завдяки якій мурахи побічно обмінюються одна з одною

інформацією з виявлення альтернативних шляхів до їжі;

- чим вище концентрація феромону на шляху, тим більш ймовірно, що інші мурахи підуть по ньому;

- більш короткі шляхи вимагають менше часу і тому найчастіше позначаються феромоном, а висока концентрація феромону, своєю чергою, робить короткий шлях кращим, залучаючи дедалі більше мурах;

- довгі шляхи, що рідко використовуються, в кінцевому підсумку, зникають через зниження кількості феромону в процесі випаровування.

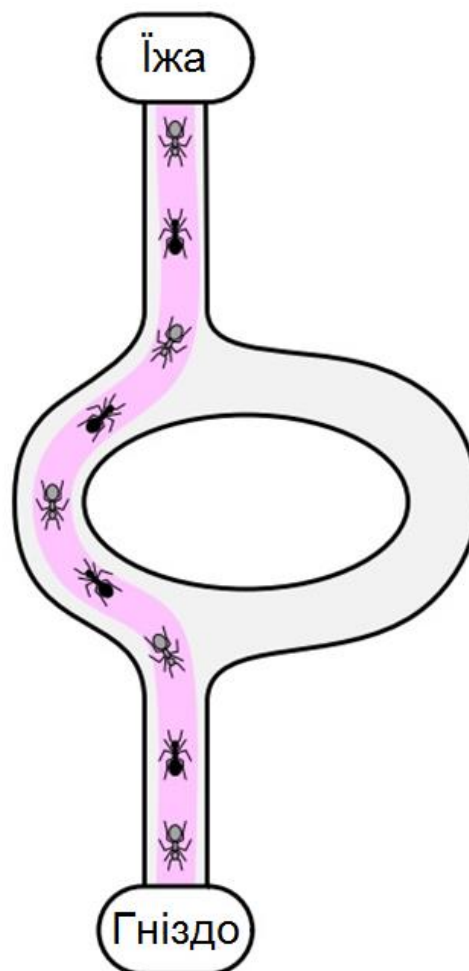


Рисунок 3.1 – Поведінка мурашиної колонії при пошуку найкоротшого шляху

Така непряма комунікація у мурашиній колонії, звана стигмергією, за

рахунок описаних механізмів позитивного та негативного зворотного зв'язку забезпечує можливість виявлення та закріплення найкоротшого шляху. При цьому можна виділити такі основні принципи поведінки мурашиної колонії:

- простота дій кожної мурахи;
- відсутність централізованого контролю;
- непрямий обмін інформацією за допомогою феромону, що відкладається;
- випаровування феромону з часом, що забезпечує адаптивність поведінки.

Мурашиний алгоритм, також відомий як алгоритм оптимізації наслідуванням мурашиної колонії (Ant Colony Optimization Algorithm), є відомою метаевристикою, що відноситься до методів розумного інтелекту, суть якої полягає в аналізі та використанні описаної моделі поведінки колонії мурах щодо рішень різних задач пошуку маршрутів на графах. Перший мурашиний алгоритм, названий мурашиною системою, запропонував у своїй докторській дисертації Марко Доріго у 1992 р. для завдання пошуку оптимального шляху на графі.

Основні етапи роботи мурашиного алгоритму в загальному вигляді представлені на структурній схемі на рисунку 3.2. Віртуальні мурахи послідовно будують розв'язання задачі, пересуваючись ребрами графа. При цьому з найбільшою ймовірністю для руху вибираються ребра з малою довжиною та великою кількістю феромону, заданого деяким умовним значенням для кожного ребра..

Феромон оновлюється кожної ітерації: збільшується на побудованих маршрутах пропорційно їх довжині і зменшується усім графі з урахуванням коефіцієнта випаровування. Мурашиний алгоритм не є найточнішим, по відношенню до методу гілок та меж до методу повного перебору, але має поліноміальну складність (рисунок 3.3), що дозволяє в короткий термін отримувати наближене вирішення важких завдань, таких як (завдання комівояжера).

Точні методи мають факторіальну складність, тому за кількості пунктів понад 10 зазвичай не ефективні. Експериментально отримані результати узгоджуються з очікуваними.

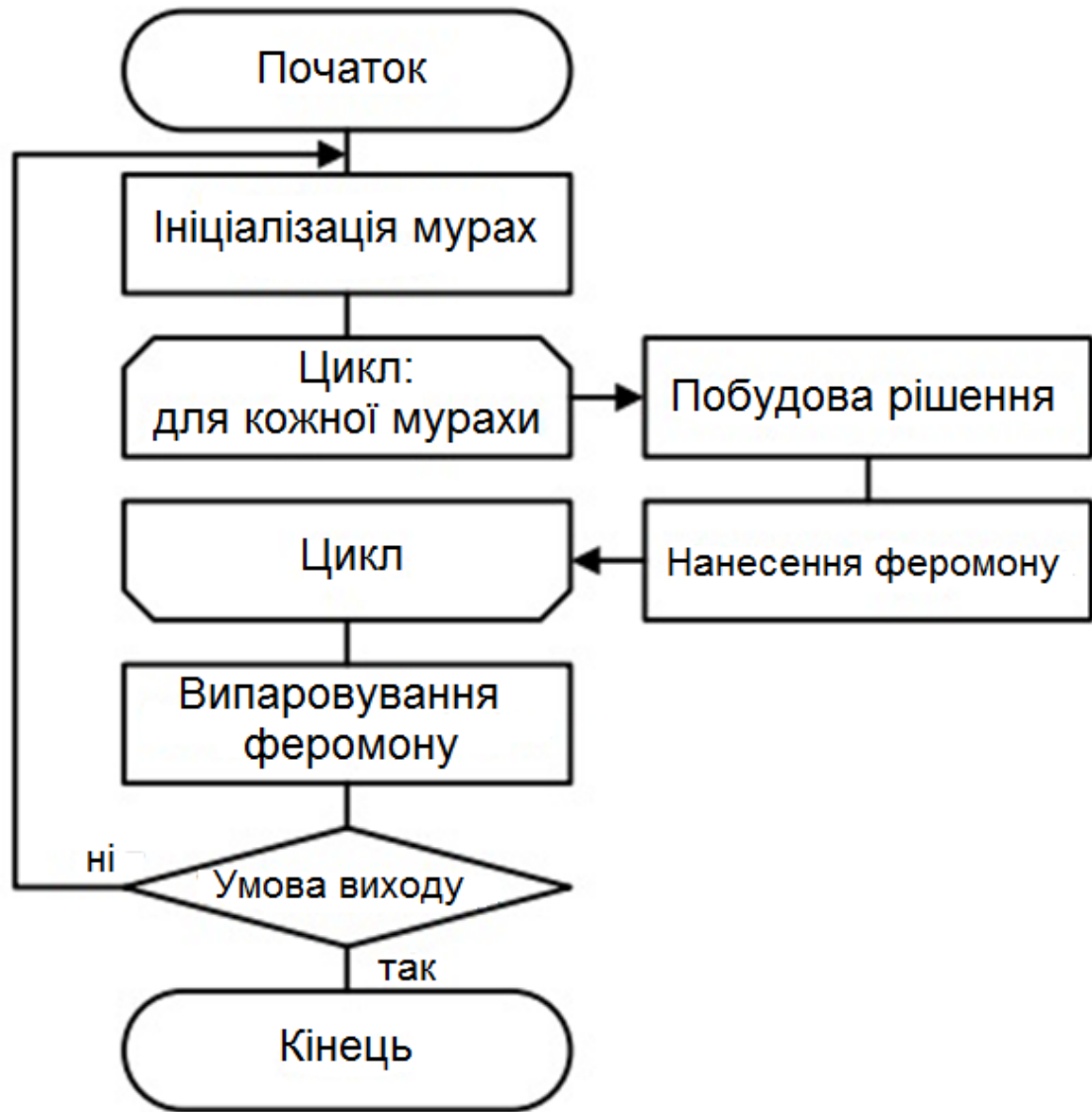


Рисунок 3.2 – Структурна схема мурашиного алгоритму

Питання про збіжність мурашиних алгоритмів є теоретичним інтересом для наукових досліджень. На даний момент існують деякі докази гарантованої збіжності мурашиного алгоритму, проте через його стохастичність є невизначеним час збіжності..

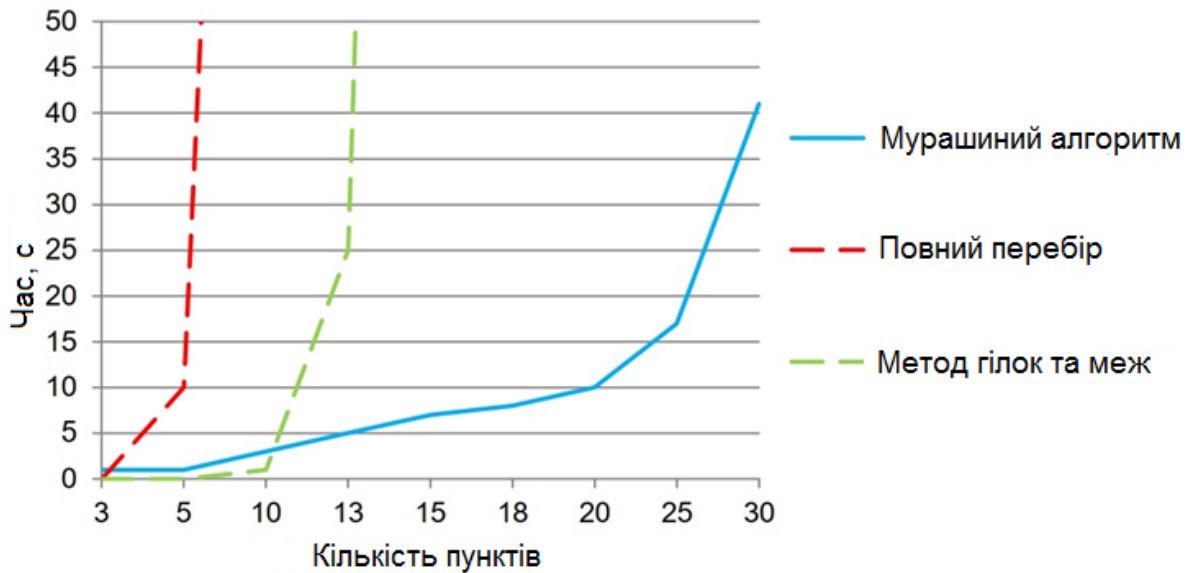


Рисунок 3.3 – Графік зміни часу розрахунків зі збільшенням кількості вершин

3.1 Імітація мурашиної колонії за допомогою симулятора AntCells

Як наочний інструмент демонстрації роботи мурашиного алгоритму та дослідження його можливостей розроблена система імітації мурашиної колонії на графі трикутної решітки – симулятор AntCells. Інтерфейс симулятора представлений на рисунку 3.4. У центральній області головного вікна інтерактивно задаються умови експерименту та демонструється перебіг симуляції. Тут відображається «карта», що є шестикутним паркетажем, де кожен шестикутник є вершиною графа трикутної решітки.

Фрагменти «карти» та відповідного графа трикутної решітки представлені на рисунку 3.5 та рисунку 3.6. Таким чином, віртуальні мурахи можуть крок за кроком переміщатися по графу в будь-якому з шести напрямків і, на відміну від реальних мурах, відкладати на дугах такий феромон, який вказує напрямок руху. З цією метою при моделюванні використовується орієнтований граф.

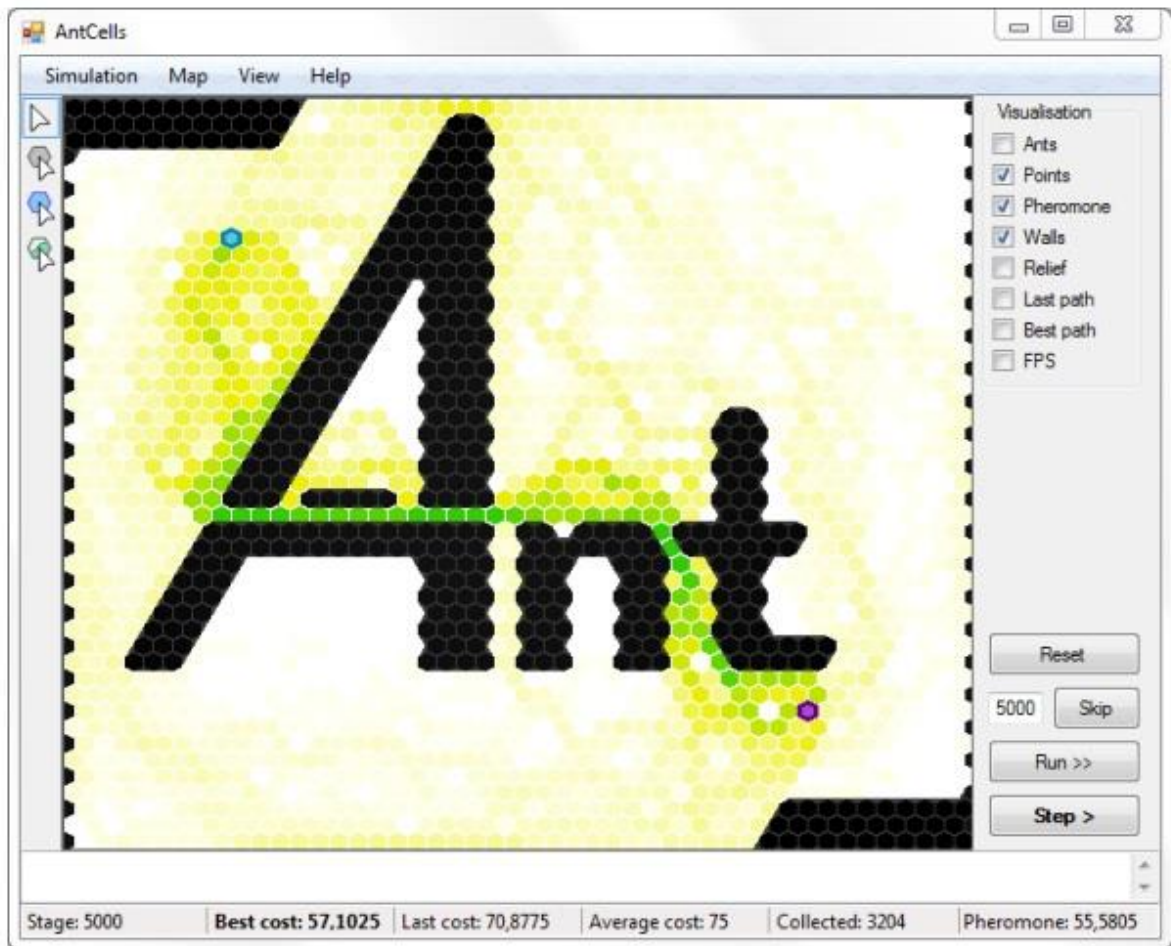


Рисунок 3.4 – Інтерфейс симулятора AntCells

У програмі реалізовано три основні режими роботи:

- покроковий (Step) – дозволяє поетапно простежити поведінку мурашиної колонії та реєструвати всі необхідні зміни;
- динамічний (Run) – дозволяє найбільш наочно спостерігати за зміною розподілу феромону, формування траєкторії оптимального маршруту в реальному часі;
- фоновий (Skip) – дозволяє максимально швидко отримати результат для заданої кількості кроків без візуалізації на проміжних кроках.

Крім того, у симуляторі AntCells передбачені такі можливості:

- інтерактивне редагування карти за допомогою пензлів на лівій панелі інструментів, у тому числі в процесі симуляції для спостереження

динамічного перестроювання маршрутів;

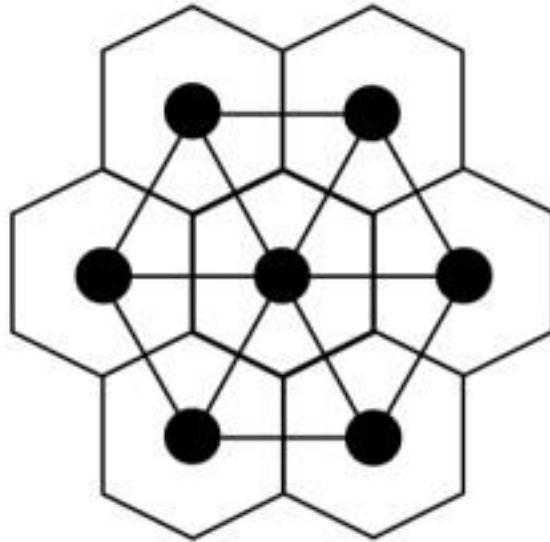


Рисунок 3.5 – Трикутна решітка

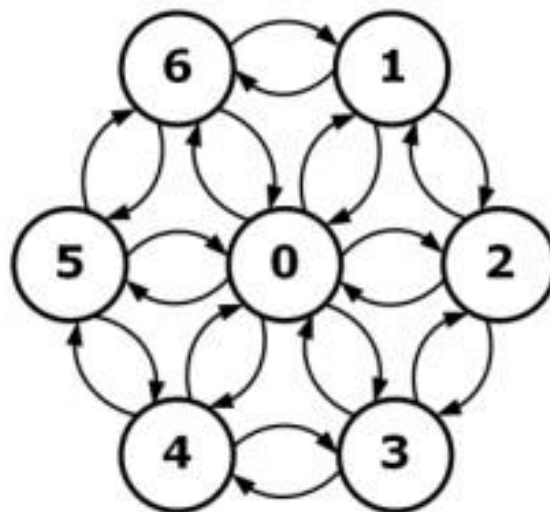


Рисунок 3.6 – Граф трикутної решітки

- переміщення вершини-гнізда та вершини-їжі;
- нанесение и удаление препятствий;
- зміна рівня феромону;
- зміна кривизни поверхні ("рельєфу");

- різні автоматичні генератори перешкод та рельєфу;
- надання ключових даних про результати симуляції;
- відкриття та збереження карти у файл;
- ручне керування параметрами алгоритму;
- вибіркова шарова візуалізація всіх елементів;
- масштабування;
- занесення до журналу всіх дій для подальшого аналізу.

На рисунках 3.7 – 3.10 представлені ключові етапи пошуку короткого шляху під час симуляції.

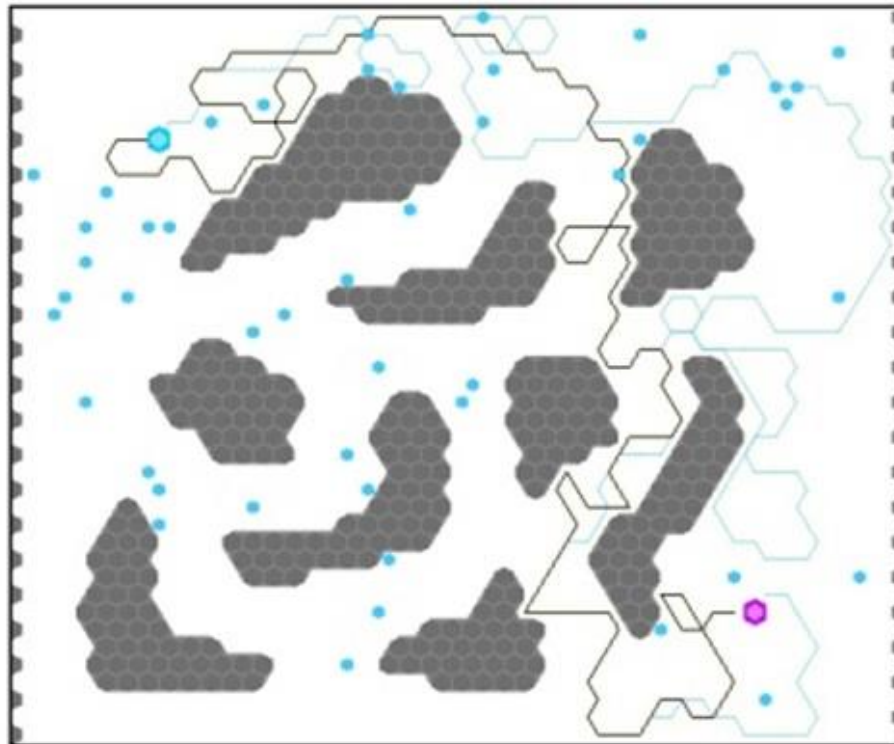


Рисунок 3.7 – Хаотичний рух мурах та перші знайдені шляхи

Темно-сірі шестикутники позначають перешкоди, а відповідні вершини вважаються ізольованими. Відтінками показано концентрацію феромону на найближчих дугах. Два окремо виділені шестикутники на карті відповідають вершинам гнізда та їжі.

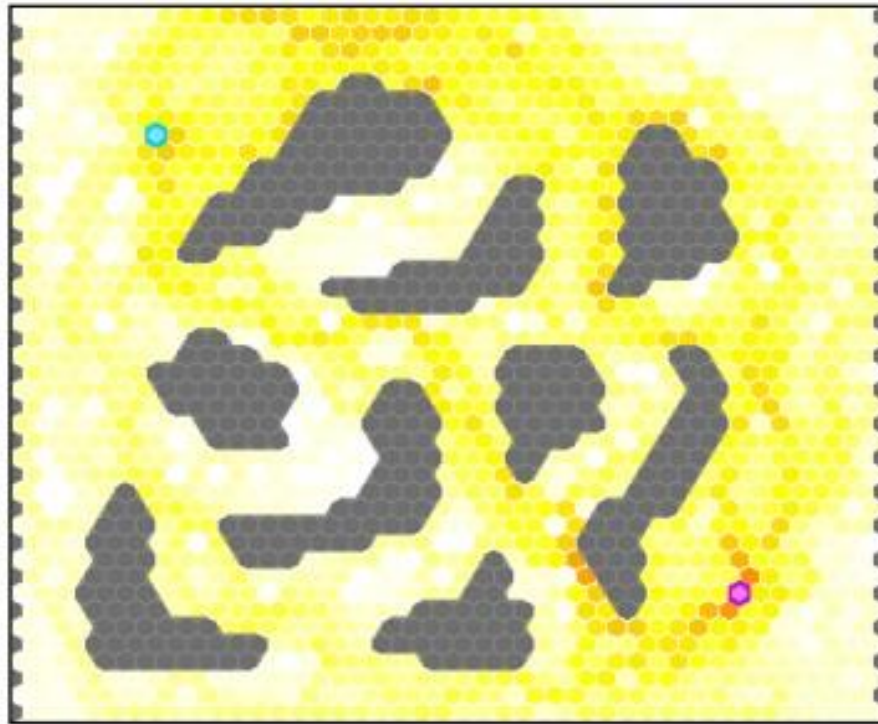


Рисунок 3.8 – Розподіл феромону на початку процесу симуляції

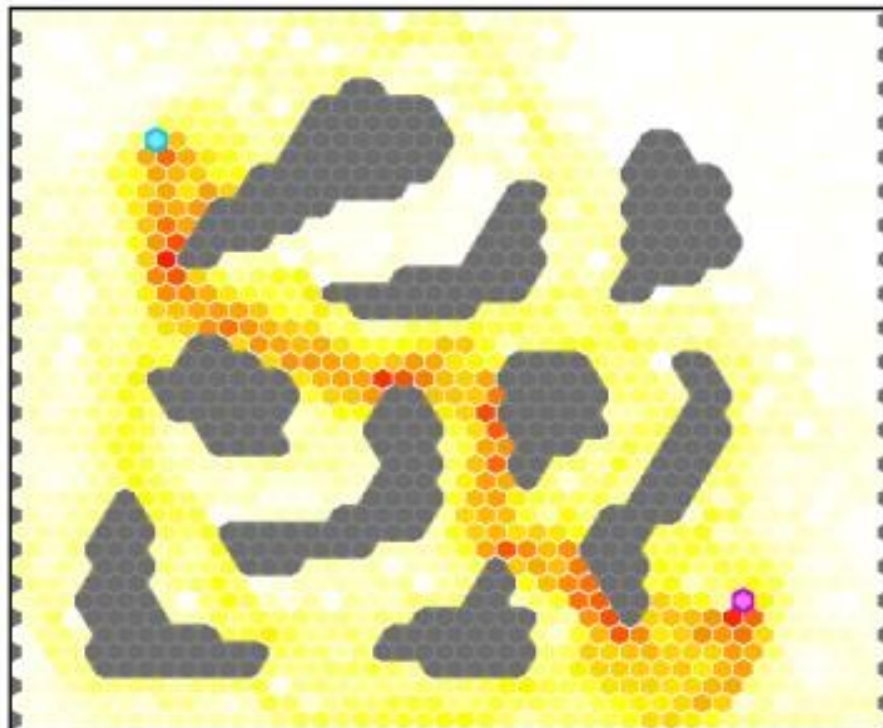


Рисунок 3.9 – Розподіл феромону наприкінці процесу симуляції

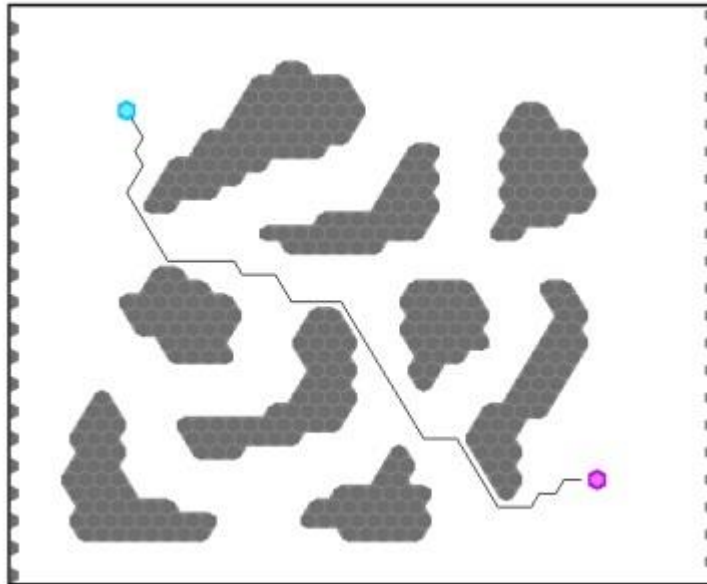


Рисунок 3.10 – Знайдений найкоротший шлях

На рисунку 3.11 наведено результат пошуку шляху кривої поверхні. Відтінками синього показано «рельєф», що вказує на ваги інцидентних дуг.

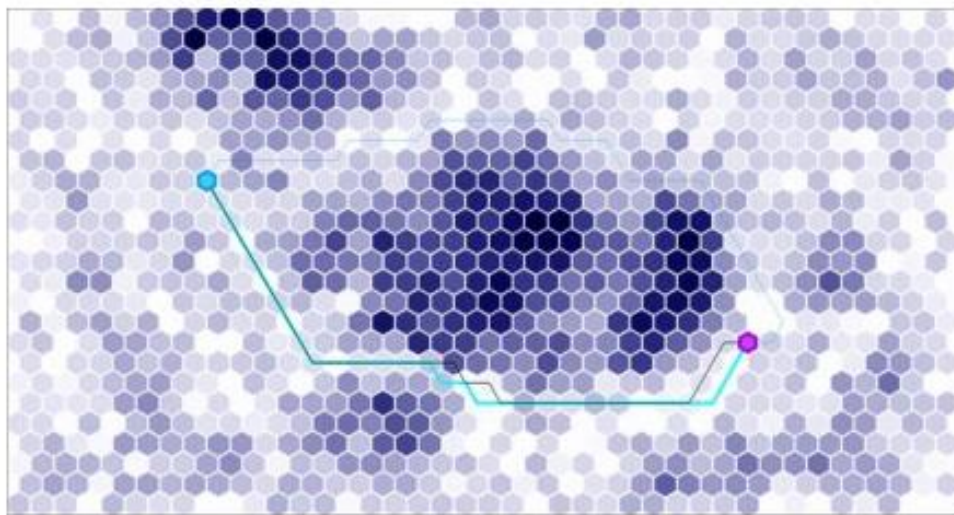


Рисунок 3.11 – Результат пошуку шляху на поверхні

Завдяки розробленим інструментаріям вдалося поетапно простежити хід роботи мурашиного алгоритму та формування рішення. Також було досліджено взаємозв'язок деяких параметрів алгоритму та точності

розв'язання. Зокрема, на рис.3.12 представлений графік зміни довжини знайденого шляху з плином часу при різних значеннях параметра мурашиного алгоритму α , що визначає ступінь впливу концентрації феромону на поведінку мурахи. З графіка слідує висновок, що при короткочасній симуляції значення параметра слід збільшувати, а при тривалій – зменшувати.

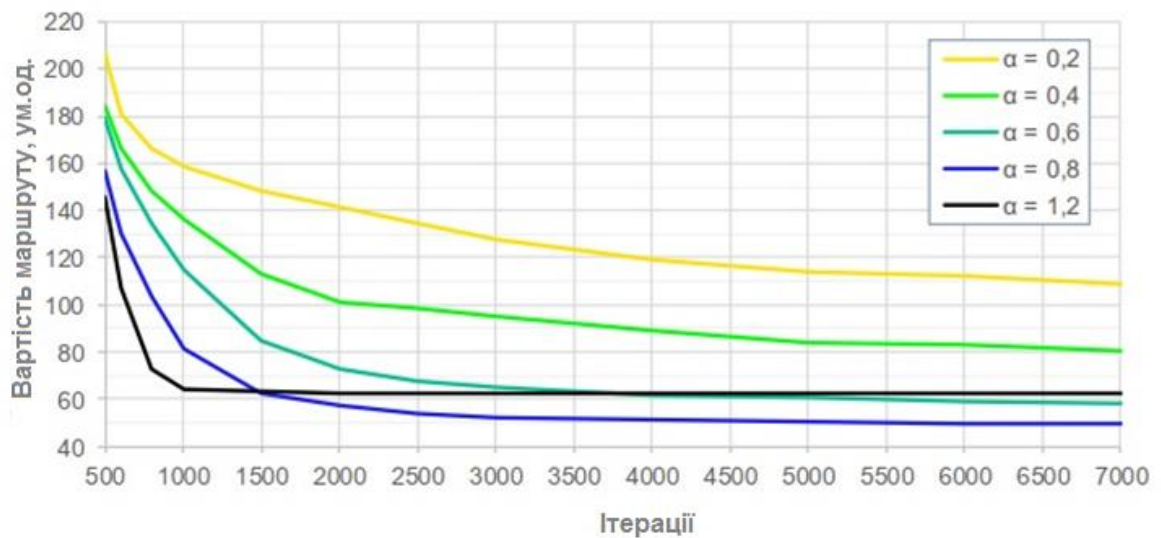


Рисунок 3.12 – Графіки зміни довжини колії при різних значеннях параметру

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи були дослідженні базові ідеї оптимізації наслідуванням мурашиної колонії. Виділено основні етапи роботи мурашиного алгоритму. Аналіз літературних джерел показав ефективність мурашиного алгоритму при вирішенні відомих задач пошуку маршрутів на графах, головним чином важкої задачі комівояжера.

З метою дослідження моделі поведінки мурашиної колонії під час пошуку найкоротшого шляху розроблено систему імітації мурашиної колонії на графі трикутної решітки – симулятор AntCells. На його прикладі поетапно показаний хід роботи мурашиного алгоритму та процес формування рішення. Досліджено проблему декомпозиції багатокритеріальної VRP з множинним депо та різнорідним парком, що полягає в тому, що двофазний метод з розбиттям графа та подальшою побудовою маршрутів на підграфах не виправданий через складність здійснення ефективного розбиття в умовах, що розглядаються. У зв'язку з цим було вирішено застосувати базові принципи оптимізації наслідуванням мурашиної колонії в рамках самостійного методу. Досліджено метод штучного інтелекту, названий мультиколоніальною мурашиною системою, який може бути застосований для вирішення задач комбінаторної оптимізації подібних тем, при вирішенні яких застосовується традиційний мурашиний алгоритм, але, як і поставлена VRP, що відрізняються «горизонтальним масштабуванням» простору пошуку, тобто таких завдань, які передбачають пошук складового рішення у вигляді множини однотипних компонент.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер-сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. Радченко В.О., Руденко Д.А., Ткачов В.Н., Токарев В.В. Мобильная подсистема «Мультикоптер-сенсорная сеть» в компьютерной системе хранения BIG DATA / В.О. Радченко, Д.А. Руденко, В.Н. Ткачов, В.В. Токарев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №4(44). - С.102-105.
3. Пат. 118921 Україна, МПК H04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
4. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Мобильная система передачи данных на базе динамически реконфигурируемых мультикоптерных устройств / В.А. Радченко, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
5. Рубан И.В., Чурюмов Г.И., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Функциональная стойкость универсальной мобильной реконфигурируемой системы при воздействии электромагнитного излучения высокой мощности / И.В. Рубан, Г.И. Чурюмов, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Информационные технологии и безопасность: (ИТБ-2017), материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции, 30 нояб. 2017г. - Киев, 2017. - С.205 - 210.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу

потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації 0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. І. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.

7. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - P. 105-111.

8. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, W. Nannan // The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.

9. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

10. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.

11. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Щербак В.К. Моделирование компьютеризированных систем управления с использованием интеллектуальных средств / Г.Ф. Кривуля, В.В. Токарев, В.К. Щербак //

Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 32-ї міжн. наук.-практ. конф., 24-25 жовт. 2019р. - Харків, 2019. - С. 90 - 91.

12. Krivoulya G., Tokariiev V., Iilina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Iilina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.197 - 201.

13. Лебедев О.Г., Ткачев В.Н., Токарев В.В., Чурюмов Г.И. Темпоральная модель адаптации интегрированной информационной системы путем реконфигурации логической структуры / О.Г. Лебедев, В.Н. Ткачев, В.В. Токарев, Г.И. Чурюмов // Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей другої міжн. наук. - техн. конф., 18 - 19 квітн. 2018 р. - Харків, 2018. - С.6-7.

14. Кметь О.І. Мурашиний алгоритм для розв'язання задач маршрутизації транспорту / О.І Кметь // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 12 жовтн. 2021р. - Тернопіль: 2021. - випуск 62. - С.29 - 30.