МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

магістра

на тему ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ЗАДАЧІ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ

Виконала: студентка ІІ курсу, групи 8.0513–ек
спеціальності 051 «Економіка»
освітньої програми «Економічна кібернетика»
Доніна Катерина Олександрівна

Керівник професор кафедри економічної
кібернетики, д.ф.–м.н., професор Козін І.В.
Рецензент д.е.н, професор Максишко Н.К

Запоріжжя

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет економічний
Кафедра економічної кібернетики
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 051 «Економіка»

Освітня програма «Економічна кібернетика»
Спеціалізація

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
(підпис)
«____»_____2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Доніна Катерина Олександрівна

1. Тема роботи Застосування методів штучного інтелекту для вирішення комбінованих задач доставки вантажів
керівник роботи – Козін Ігор Вікторович, д.ф.–м.н., професор
затверджені наказом ЗНУ від «29» грудня 2023 року № 2252–С
2. Строк подання студентом роботи: 02.12.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: постановка завдання, офіційні статистичні дані, наукова література та інші джерела мережі Інтернет на обрану тему
4. Зміст розрахунково–пояснювальної записки: визначення поняття комбінованих задач транспортної логістики; огляд відомих алгоритмів розв'язку складних задач транспортної логістики; побудова фрагментарної моделі для задач CVRP, CVRPTW, OVRP; побудова алгоритмів розв'язку задач CVRP, CVRPTW, OVRP; програмна реалізація алгоритмів пошуку оптимальних розв'язків на базі побудованих моделей для задач CVRP, CVRPTW, OVRP; перевірка ефективності розроблених алгоритмів на базі існуючих тестових бібліотек.
5. Перелік графічного матеріалу: у роботі розміщено 6 табл. та 15 рис. Розроблено в Microsoft Office Power Point презентацію основних результатів кваліфікаційної роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	д.ф.–м.н. проф. Козін І.В.		
Розділ 2	д.ф.–м.н. проф. Козін І.В.		
Розділ 3	д.ф.–м.н. проф. Козін І.В.		

7. Дата видачі завдання 15.01.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Формування мети, об'єкту, предмету та завдань кваліфікаційної роботи	15.01.2024 – 26.01.2024	Виконано
2.	Узгодження плану роботи, підготовка вступу	27.01.2024 – 11.02.2024	Виконано
3.	Формування основних гіпотез та огляд наукових джерел	12.02.2024 – 06.04.2024	Виконано
4.	Підготовка 1–го розділу кваліфікаційної роботи	08.04.2024 – 22.06.2024	Виконано
5.	Підготовка 2–го розділу кваліфікаційної роботи	26.06.2024 – 31.08.2024	Виконано
6.	Підготовка 3–го розділу кваліфікаційної роботи	02.09.2024 – 16.11.2024	Виконано
7.	Аналіз та інтерпретація отриманих результатів, оформлення висновків кваліфікаційної роботи, оформлення вступу та реферату	18.11.2024 – 24.11.2024	Виконано
8.	Нормоконтроль, перевірка на доброчесність, підготовка до захисту	25.11.2024 – 08.12.2024	Виконано

Студент _____ Доніна К.О.
(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ Козін І.В.
(підпис)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Макаренко О.І.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить 3 розділи, 86 с.,15 рис., 6 табл., 51 джерело.

Об’єкт дослідження – комбіновані задачі транспорної логістики;

Предмет дослідження – методи і моделі штучного інтелекту для оптимізації та автоматизації рішень у комбінованих задачах транспортної логістики.

Мета роботи – розробка математичних моделей та методів на базі метаеврістик для розв’язання комбінованої задачі доставки вантажів.

Методи дослідження – методи математичного моделювання, методи оптимізації і системного аналізу, методи штучного інтелекту, стохастична оптимізація, чисельні методи, імітаційне моделювання.

У роботі досліджено теоретичні основи та етапи розвитку логістики, проаналізовано основні аспекти транспортної логістики. За допомогою порівняльного аналізу розглянуто ефективність використання різних видів транспорту для доставки вантажів. Визначено поняття «Комбінована задача транспортної логістики», проведена класифікація цих задач. Досліджено методи штучного інтелекту, які вже використовуються у логістиці. Проаналізовано існуючі методи розв’язання комбінованих задач транспортної логістики. Розроблено та протестовано математичну модель для оптимізації логістичних процесів у контексті комбінованих задач доставки вантажів. На базі фрагментарної моделі для задач CVRP, CVRPTW, OVRP та використання методів штучного інтелекту, розроблені методи пошуку наближених розв’язків цих задач. Встановлено, що використання ШІ дозволяє знизити витрати на транспорт, підвищити точність планування маршрутів, а також адаптувати систему до змін попиту та умов.

Побудовані програмні реалізації розроблених методів, проведена перевірка ефективності методів з використанням тестових баз даних, та генераторів тестових прикладів.

ФРАГМЕНТАРНА СТРУКТУРА, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, КОМБІНОВАНІ ЗАДАЧІ ТРАНСПОРНОЇ ЛОГІСТИКИ, МЕТАЕВРИСТИКИ, CVRP, CVRPTW, OVRP.

SUMMERY

The master's thesis consists of 3 chapters, 86 pages, 15 figures, 6 tables, and 51 references.

Object of research – combined transportation logistics problems.

Subject of research – artificial intelligence methods and models for optimizing and automating decisions in combined transportation logistics problems.

Purpose of the thesis – to develop mathematical models and methods based on metaheuristics for solving combined cargo delivery problems. Research methods: mathematical modeling methods, optimization and systems analysis methods, artificial intelligence methods, stochastic optimization, numerical methods, and simulation modeling.

The thesis explores the theoretical foundations and stages of logistics development, analyzing key aspects of transportation logistics. Through comparative analysis, the efficiency of using different types of transport for cargo delivery is examined. The concept of "combined transportation logistics problems" is defined, and a classification of such problems is provided. Artificial intelligence methods already applied in logistics are investigated. Existing methods for solving combined transportation logistics problems are analyzed. A mathematical model for optimizing logistics processes in the context of combined cargo delivery problems is developed and tested. Based on a fragmentary model for CVRP, CVRPTW, OVRP tasks and artificial intelligence methods, approaches for finding approximate solutions to these problems are developed. It is established that the use of AI reduces transportation costs, enhances route planning accuracy, and adapts systems to changes in demand and conditions.

Software implementations of the developed methods were created, and their efficiency was verified using test databases and test case generators.

FRAGMENTARY STRUCTURE, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, COMBINED TRANSPORTATION LOGISTICS PROBLEMS, METAHEURISTICS, CVRP, CVRPTW, OVRP.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
РЕФЕРАТ
SUMMARY
ВСТУП ……..…..... 7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛОГІСТИКИ ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА МЕТОДИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНИХ ЗАДАЧ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ……. 10
1.1 Логістика вантажоперевезень: етапи розвитку, основні поняття теорії 10
1.2 Поняття комбінованої задачі доставки …… 23
1.3 Методи штучного інтелекту в логістиці ……..... 28
РОЗДІЛ 2 ЗАДАЧІ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗВ’ЯЗАННЯ ……... 33
2.1 Постановка задач маршрутизації транспорту……..... 33
2.2 Відомі алгоритми розв’язання транспортних задач …….. 39
2.3 Фрагментарні підходи до моделювання задач доставки вантажів 45
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗАДАЧ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ…… 49
3.1 Метаевристики на множині перестановок..... 49
3.2 Побудова фрагментарних моделей для комбінованих задач CVRP, CVRPTW та їх програмна реалізація……..…….. 54
ВИСНОВКИ……..... 78
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ...…… 80

ВСТУП

У сучасному глобалізованому світі, де економіка країн залежить від ефективності міжнародної торгівлі та логістичних ланцюгів, задача оптимізації вантажоперевезень стає все більш актуальною. За даними Державної служби статистики, існує пряма залежність між обсягами вантажоперевезень і валовим внутрішнім продуктом (ВВП) країни, що підкреслює важливість оптимізації цього процесу для економічного зростання.

Дослідження задач оптимізації вантажоперевезень розпочалося в 1980–х роках із робіт Маріуса М. Соломона, який у 1987 році запропонував алгоритми для задач маршрутизації транспортних засобів із часовими вікнами (VRPTW). Ці алгоритми стали основою для подальших розробок у логістиці [1].

У 1990–2000–х роках дослідники, такі як Мішель Жандро, Жан–Ів Потвен, Паоло Тот і Даніель Віго, вдосконалювали метаевристичні методи, включаючи генетичні алгоритми та табу–пошук, що дозволило вирішувати задачі з численними обмеженнями [2–3]. Їхні роботи забезпечили фундамент для інтеграції нових підходів до оптимізації маршрутів.

У 2010–х роках акцент змістився на динамічне планування маршрутів, яке враховує зміни в реальному часі. Зокрема, Марко Балдаччі у 2011 році вдосконалив методи для CVRPTW, зробивши їх ефективнішими для використання в складних логістичних системах [4].

У 2020–х роках дослідження зосереджені на інтеграції штучного інтелекту. Дмитро Іванов та Александер Долгій досліджують стійкість логістичних ланцюгів [5], а Крістіана Архетті та Марія Дж. Сперанца аналізують моделі доставки з використанням екологічного транспорту [6].

Таким чином, задачі оптимізації вантажоперевезень еволюціонували від простих алгоритмів до інтелектуальних систем, що враховують численні реальні обмеження.

Останні дослідження, такі як роботи M. J. Fischer і S. A. P. Mohr в статті "Artificial Intelligence in Logistics and Supply Chain Management: A Review and Future Directions", присвячені впливу штучного інтелекту на логістичні процеси. Вчені розглядають, зокрема, впровадження алгоритмів машинного навчання для підвищення ефективності управління логістичними потоками. Ці дослідження показують, що традиційні методи оптимізації часто не відповідають вимогам сучасності. Причинами цього є:

– недостатня адаптивність: Традиційні методи не можуть швидко реагувати на зміни в умовах ринку, такі як коливання попиту або зміни в законодавстві. Це може призводити до затримок у доставці та збільшення витрат.

– обмежена обробка даних: Сучасні логістичні системи складають великі обсяги даних, які традиційні алгоритми не здатні ефективно обробляти. Наприклад, методи оптимізації, що базуються на фіксованих параметрах, не можуть враховувати динамічні зміни, такі як коливання цін на паливо чи зміни в трафіку.

– недостатня точність: Традиційні моделі часто не враховують багатофакторність, що призводить до неточних прогнозів і рішень. Вони можуть не враховувати такі аспекти, як часові вікна доставки, вартість, викиди CO2 та варіативність попиту.

Метою цього дослідження є заповнення цієї прогалини через вивчення того, як алгоритми штучного інтелекту можуть покращити процеси прийняття рішень, знизити операційні витрати та підвищити якість обслуговування в системах доставки вантажів. Збільшення обсягів даних, доступних для аналізу, та прогрес у розробці алгоритмів машинного навчання відкривають нові шляхи для вирішення комплексних комбінованих задач доставки.

Для досягнення поставленої мети було поставлено та виконано наступні завдання:

– зробити огляд на основні логістичні поняття;

– визначити поняття комбінованої задачі транспортної логістики;

– зробити огляд відомих алгоритмів розв’язку складних задач транспортної логістики;

– побудувати фрагментарні моделі задач CVRP, CVRPTW, OVRP;

– побудувати алгоритми розв’язку задач CVRP, CVRPTW, OVRP;

– програмно реалізувати алгоритми пошуку оптимальних розв’язків на базі побудованих моделей для задач CVRP, CVRPTW, OVRP;

– перевірити ефективність розроблених алгоритмів на базі існуючих текстових бібліотек.

Наукова та практична новизна роботи полягає у побудові фрагментарної моделі складних комбінованих задач транспортної логістики.

Актуальність дослідження також полягає в необхідності інтеграції нових розробок у існуючі логістичні системи, забезпечення їх масштабованості та адаптивності до змінних умов ринку. Останні дослідження, такі як стаття A. Gunasekaran і E. W. T. Ngai "The Role of Artificial Intelligence in the Supply Chain: A Review", підтверджують важливість впровадження інновацій у логістику, підкреслюючи, що підприємства, які активно використовують новітні технології, здатні отримувати конкурентні переваги на ринку.

Основні результати дослідження були представлені:

– у Збірнику наукових праць «ФІНАНСОВІ СТРАТЕГІЇ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ» Випуск 3 (63), 2024

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛОГІСТИКИ ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ

1.1 Основи теорії логістики вантажоперевезень.

Логістика вантажоперевезень є однією з ключових складових логістичного менеджменту, що охоплює процес планування, організації, контролю та управління перевезенням вантажів з метою забезпечення ефективного функціонування ланцюгів постачання. Вона включає в себе не лише фізичне переміщення товарів, але й управління запасами, складуванням, транспортними засобами, інформаційними потоками та інфраструктурою [7]. Таким чином, логістика є не лише засобом доставки, але й комплексним механізмом, що забезпечує безперебійну роботу всієї економіки, підтримуючи тісний зв'язок між різними складовими ланцюга поставок.

Термін "логістика" походить від грецького слова "logistike", що означає мистецтво обчислень та здатність розмірковувати. З іншої точки зору, "логістика" може походити від французького слова "loger", що означає "постачати", а також існує версія, що цей термін бере свій початок зі старонімецького слова "laudja", яке означає "склад" або "зберігання" [8]. Ці різні етимологічні корені вказують на широкий спектр значень логістики, яка включає як інтелектуальну діяльність планування, так і практичне управління процесами постачання та зберігання.

Згідно з визначенням Європейської логістичної асоціації, логістика вантажоперевезень — це "координація та інтеграція транспортних потоків, забезпечення їх оптимізації з точки зору витрат і часу, а також управління ресурсами, необхідними для виконання цих функцій" [9]. Таке визначення підкреслює важливість інтеграції всіх складових процесу для досягнення максимального ефекту. Наприклад, оптимізація витрат на транспортування може бути досягнута завдяки використанню комплексних маршрутів, що мінімізують час у дорозі, а також ефективному управлінню запасами.

Історія розвитку логістики тісно пов'язана з військовими операціями, оскільки її корені лежать у військовому постачанні. Фундатором перших наукових досліджень з логістики вважають Антуана Анрі Жоміні (1779– 1869) — французького і швейцарського барона, генерала Франції, військового теоретика початку XIX століття. У своїй праці "Трактат про мистецтво війни" (1837) він трактував логістику як практичне мистецтво управління, транспортування, планування, організації постачання військових підрозділів і тилового забезпечення фронту, успіх якого залежить від рівня координації між різними елементами, задіяними в логістичних процесах [8].

У цивільній сфері логістика почала активно розвиватися після Другої світової війни, коли з'явилася потреба в ефективному управлінні постачанням для відновлення зруйнованих економік. У 1950–х і 1960–х роках концепції логістики почали активно впроваджуватися у виробничих процесах і торгівлі, що призвело до створення ефективних логістичних систем на підприємствах [10]. Наприклад, японська концепція "Just–in–time" (точно в строк), стала ключовим елементом сучасної логістики, спрямованої на мінімізацію запасів і зменшення витрат.

На початку 80–х років минулого століття розвиток логістики призвів до появи "неологістики" або логістики другого покоління, яка відзначалася розширенням сфери діяльності та виходом за межі традиційних логістичних функцій. Це було зумовлено тим, що жоден із структурних підрозділів компанії не мав достатніх ресурсів та можливостей для самостійного реагування на зміни зовнішнього середовища і забезпечення ефективної роботи. Виникла потреба у спільній, скоординованій діяльності всіх підрозділів підприємства. Наприклад, інтеграція логістичних операцій з виробничими, маркетинговими та фінансовими, дозволяє забезпечити швидке реагування на ринкові зміни та підвищити конкурентоспроможність підприємства.

У середині 80–х років минулого століття у розвитих країнах з'явився новий підхід до розвитку логістики, відомий як "концепція загальної

відповідальності". Цей підхід можна розглядати як логічне і природне продовження комплексного підходу, описаного раніше. Його характерною рисою є розширення логістичної системи за межі економічної сфери з урахуванням соціальних, екологічних і політичних факторів. Основним критерієм є досягнення максимально вигідного співвідношення між вигодами і витратами [11]. Такий підхід, наприклад, включає зменшення негативного впливу на довкілля через оптимізацію маршрутів та використання екологічно чистого транспорту.

Розвиток інформаційних технологій у 1980–1990–х роках став поворотним моментом у логістиці, що дозволило автоматизувати процеси управління вантажоперевезеннями. Такі модулі системи SAP, як Enterprise Resource Planning (ERP) та Transportation Management Systems (TMS), забезпечили підприємствам можливість інтегрувати логістичні операції у загальну систему управління бізнесом [12]. Використання системи SAP дозволяє інтегрувати всі логістичні операції в одну платформу, що знижує витрати та мінімізує ризики. Це стало основою для створення складних ланцюгів постачання, що дозволяють швидко реагувати на зміни попиту та мінімізувати витрати.

Сучасна концепція логістики грунтується на глобалізації світової економіки і глобальній науково–технічній революції, які викликають нові потреби клієнтів в послугах логістики та задоволення від управління всім процесом доставки від виробничих підприємств до кінцевих споживачів. Вона інтегрує різні аспекти діяльності, включаючи транспортування, складування, управління інформацією та обслуговування клієнтів. Наприклад, логістичні компанії, такі як DHL або FedEx, використовують передові технології для забезпечення максимальної ефективності своїх операцій, що включає як оптимізацію маршрутів, так і швидке обслуговування клієнтів.

У контексті сучасної України, особливо в умовах війни, логістика набуває стратегічного значення. Військові дії вимагають швидкого та надійного транспортування критичних ресурсів, таких як медикаменти, зброя

та гуманітарна допомога. Водночас, зруйнована інфраструктура, блокади транспортних шляхів і небезпека для транспорту створюють суттєві виклики для логістичних операцій. У таких умовах логістика стає основою виживання не лише для військових, але й для цивільного населення. Наприклад, розвиток альтернативних маршрутів та адаптація до змін в умовах конфлікту є ключовими аспектами, що забезпечують стійкість логістичних процесів [10].

Логістика також відіграє критичну роль у стабілізації економіки країни в умовах війни. Здатність забезпечити безперебійне постачання товарів і послуг впливає на функціонування виробничих підприємств та бізнесу загалом. Важливим аспектом є інтеграція логістичних операцій з державними і міжнародними структурами, що дозволяє забезпечити стратегічну підтримку та координацію. Наприклад, у період війни в Україні логістичні операції включають не лише управління внутрішніми потоками, але й координацію з міжнародними партнерами для отримання гуманітарної допомоги та постачання необхідних товарів [13].

Особливої уваги потребують економічні аспекти логістики вантажоперевезень, які відіграють ключову роль в ефективності ланцюгів постачання. Економічні цілі у логістиці включають зниження витрат на транспортування, оптимізацію управління запасами, вибір ефективних маршрутів і раціональне використання транспортних засобів. Оптимізація маршрутів є важливою частиною економічного аналізу, оскільки правильне планування шляхів дозволяє мінімізувати час у дорозі та витрати на паливо, що безпосередньо впливає на собівартість вантажоперевезень. Наприклад, використання GPS–технологій дозволяє будувати найкоротші та найефективніші маршрути, що знижує витрати на транспортування. Крім того, управління запасами та ресурсами відіграє важливу роль у забезпеченні безперервності постачань і зниженні витрат, пов'язаних із надмірними запасами або дефіцитом товарів. Інтеграція систем управління ланцюгами постачань також допомагає зменшити фінансові втрати за рахунок покращення координації між учасниками процесу та раціонального

використання ресурсів. Важливим аспектом є мінімізація транспортних витрат, що досягається шляхом аналізу й вибору оптимальних видів транспорту, формування комплексних маршрутів і зменшення часу простою. Усе це спрямоване на підвищення загальної ефективності логістичних операцій, забезпечення їхньої прибутковості та конкурентоспроможності на ринку.

Логістика як наука, що направлена на управління матеріальними, інформаційними та іншими потоками, охоплює значну частину економічного життя суспільства. У зв’язку з цим, для систематизації наукових досліджень і практичних розробок, її поділяють на кілька видів. Візуалізація видів логістики представлена на рис.1.1.



Рисунок 1.1 – Види логістики [14]

Логістика поділяється на кілька основних напрямів. Кожен з них охоплює різні аспекти управління потоками в економіці та на підприємствах. Основні напрями логістики представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні напрями логістики [8]

Напрям	Характеристика
Транспортна логістика	організація перевезень і управління транспортними потоками з метою забезпечення ефективної та своєчасної доставки товарів від місця виробництва до кінцевого споживача або між різними підприємствами
Складська логістика	управління складськими процесами, такими як зберігання товарів, організація складських приміщень, обробка та переміщення вантажів усередині складів, а також оптимізація складування для зменшення витрат
Закупівельна логістика	управління процесами постачання сировини, матеріалів та комплектуючих, необхідних для виробництва. Цей напрям включає пошук постачальників, укладання договорів, координацію постачань і контроль якості.
Виробнича логістика	управління матеріальними потоками всередині виробничого процесу, забезпечення своєчасного постачання компонентів на виробничі лінії, планування та організацію процесу виробництва для мінімізації витрат і підвищення ефективності

Продовження таблиці 1.1

Розподільна логістика	управління потоками готової продукції, її транспортуванням до роздрібних точок або кінцевих споживачів, організацію процесів дистрибуції та підтримку оптимального рівня запасів у торгових точках
Зворотна логістика	організація повернення товарів, переробкою, утилізація відходів і вторинної сировини, а також обслуговування після продажу (ремонт, обмін тощо)
Інформаційна логістика	управління інформаційними потоками, які супроводжують матеріальні процеси, забезпечення їхньої прозорості, інтеграцію інформаційних систем для оптимізації ланцюга постачань і підвищення ефективності логістичних процесів
Військова логістика	постачання і транспортування матеріальних ресурсів у військовій сфері, підтримка армії та організація постачання в умовах бойових дій
Міжнародна логістика	управління потоками товарів, інформації та послуг у міжнародному середовищі, враховуючи митне регулювання, особливості міжнародних перевезень та комунікації з закордонними партнерами

Одним із ключових напрямів логістики є транспортна логістика, яка включає управління всіма аспектами транспортних операцій. Вона охоплює вибір транспортного засобу, планування маршрутів, управління вантажними перевезеннями, облік витрат та забезпечення безпеки.

Транспортна логістика забезпечує оптимізацію руху вантажів між виробниками, складами та кінцевими споживачами, включаючи як внутрішні, так і міжнародні перевезення [13].

Транспортна логістика є системою, утворюючою складову логістичної системи. Напрями транспортної логістики представлено на рис. 1.2.

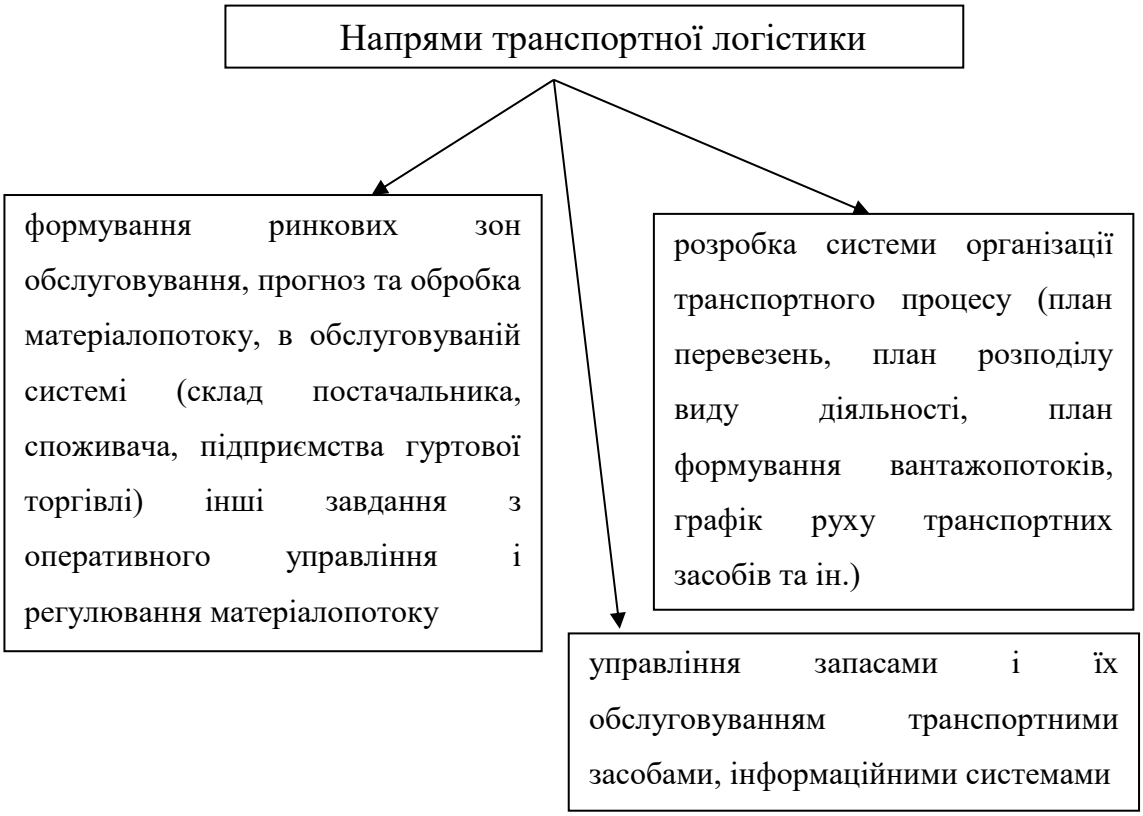


Рисунок 1.2 – Напрями транспортної логістики [15]

Основне завдання транспортної логістики полягає в забезпеченні своєчасної та безпечної доставки продукції, враховуючи особливості вантажу, транспортних засобів і вимоги замовника.

Транспортна логістика передбачає вибір відповідного виду транспорту залежно від характеристик вантажу, відстані та необхідної швидкості доставки [16].

Одним із ключових економічних аспектів є оптимізація витрат на транспортування.

Вартість перевезення товарів залежить від кількох факторів таких як відстань, тип вантажу, вид транспорту та інші змінні, наприклад, витрати на паливо, митні платежі та страхування [17]. Ефективне управління цими елементами дозволяє підприємствам знизити витрати і підвищити рентабельність логістичних операцій. Для цього використовуються різні методи, зокрема, оптимізація маршрутів і вибір найбільш економічних видів транспорту [10].

Існує кілька видів транспорту, що використовуються в логістиці:

– автомобільний – забезпечує високу мобільність та доступність, що дозволяє доставляти товари безпосередньо «від дверей до дверей»;

– залізничний – є ефективним для перевезення великих обсягів вантажів на середні та великі відстані, забезпечуючи при цьому відносно низькі витрати;

– морський – використовується для міжнародних перевезень та транспортування великих партій товарів на великі відстані, хоча він поступається іншим видам транспорту в швидкості;

– повітряний – забезпечує найшвидшу доставку, проте є найбільш витратним;

– трубопровідний – застосовується для переміщення рідких або газоподібних вантажів, таких як нафта, природний газ тощо [15].

Транспортна логістика також включає концепції мульти– та інтермодальних перевезень.

Мультимодальні перевезення передбачають використання двох або більше видів транспорту, інтермодальні перевезення, у свою чергу, інтегрують різні види транспорту в єдину логістичну систему, що дозволяє скоротити час транспортування і зменшити витрати [10].

Ці концепції є особливо актуальними в умовах глобалізації, коли збільшується потреба у швидкому та надійному перевезенні товарів на великі відстані.

Транспортна логістика діє, враховуючи принцип «шість правил

логістики» [18], який висуває «вимоги необхідності» (рис. 1.3).

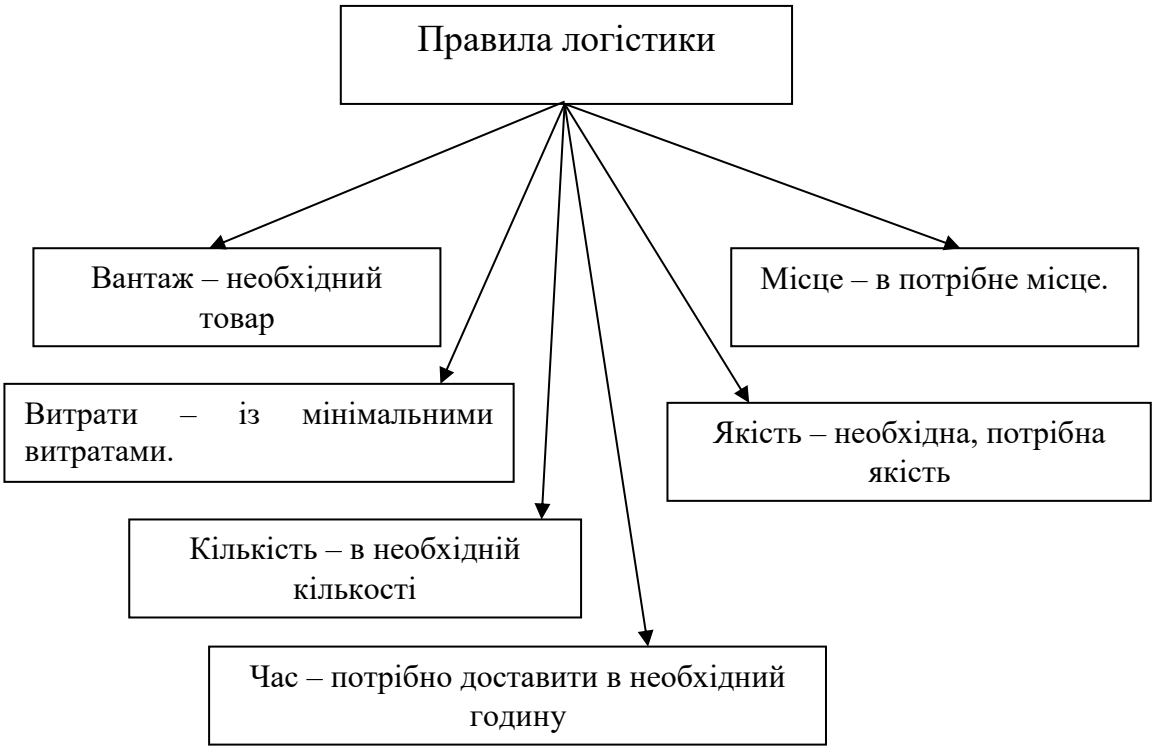


Рисунок 1.3 – Правила логістики [18]

Відповідно «вимогам необхідності» здійснюється вибір оптимального виду транспорту при організації процесу перевезення товарів, продукції, вантажів з урахуванням таких характеристик: швидкість, доступність, надійність, вантажопідйомність, частота, дешевизна. Аналіз видів транспорту загального користування за означеними характеристиками наведено у таблиці 1.2.

Швидкість визначається часом руху на певну відстань, тому найшвидший з усіх є повітряний транспорт. Доступність характеризується здатністю транспорту забезпечити зв'язок між будь–якими двома географічними пунктами. Найбільшою доступністю відрізняється автотранспорт, тому що вантажівки можуть взяти вантаж безпосередньо в місці відправлення й доставити його безпосередньо в місце призначення.

Показник надійності відбиває потенційні відхилення від очікуваного або встановленого графіка доставки. Оскільки трубопроводи працюють

цілодобово й не залежать від погоди, перевантаження, вони є найбільш надійним видом транспорту.

Таблиця 1.2 – Аналіз видів транспорту за ключовими характеристиками

Характеристика/вид транспорту	**Автомобільний**	**Залізничний**	**Морський**	**Повітряний**	**Річковий**	**Трубопровідний**
Швидкість	Висока для коротких/середніх відстаней	Середня для далеких маршрутів	Низька для міжконтинен–тальних перевезень	Найвища швидкість, обмеження через погоду	Середня, залежить від сезону	Низька, залежить від типу перекачуваного ресурсу
Доступність	Найбільша завдяки розгалуженій мережі доріг	Обмежена залізничними маршрутами	Обмежена портами і прибережною інфраструктурою	Обмежена аеропортами	Обмежена водними шляхами	Обмежена лише побудованою мережею трубопроводів
Надійність	Висока, але залежить від дорожніх умов	Висока, незалежність від погодних умов	Середня, залежить від погоди	Висока, але затримки можливі через погодні умови	Середня, залежить від сезону	Найвища, стабільність і мінімальний вплив зовнішніх факторів
Вантажопідйомність	Обмежена (до 40 тонн)	Висока для масових вантажів	Найвища для великих обсягів	Низька через технічні обмеження літаків	Висока для об'ємних вантажів	Висока для рідин і газів
Частота	Найвища, підходить для термінових перевезень	Висока, залежить від графіку	Низька, великі інтервали між рейсами	Висока для популярних напрямків	Низька через сезонність	Постійна, потік безперервний
Дешевизна	Помірна, економічна для коротких відстаней	Низька вартість для масових перевезень	Найдешевша для великих обсягів	Найдорожча через експлуатаційні витрати	Дешевша за залізничний на регіональних маршрутах	Найнижча для великих обсягів при довгострокові й експлуатації

Вантажопідйомність характеризує здатність перевозити вантажі будь–якої ваги й обсягу. За цією ознакою найвища оцінка належить водному транспорту, друге місце посідає залізничний транспорт.

Частота – це число перевезень (транспортувань) у графіку руху. Оскільки трубопроводи працюють у безперервному режимі, вони й тут посідають перше місце.

Найменшу собівартість перевезення мають водний, залізничний та трубопровідний види транспорту.

Проаналізуємо детальніше процес перевезення вантажів. Існує декілька схем перевезення, умовно їх називають так: «один до одного»; «один до

багатьох»; «багато до багатьох» [19]. Схеми організації процесу перевезення продукції та їх характеристики та завдання, що вирішуються при реалізації цих схем наведено на рис 1.4.

Варто зазначити, що вибір схеми організації процесу перевезення залежить від мети та завдань перевезення.

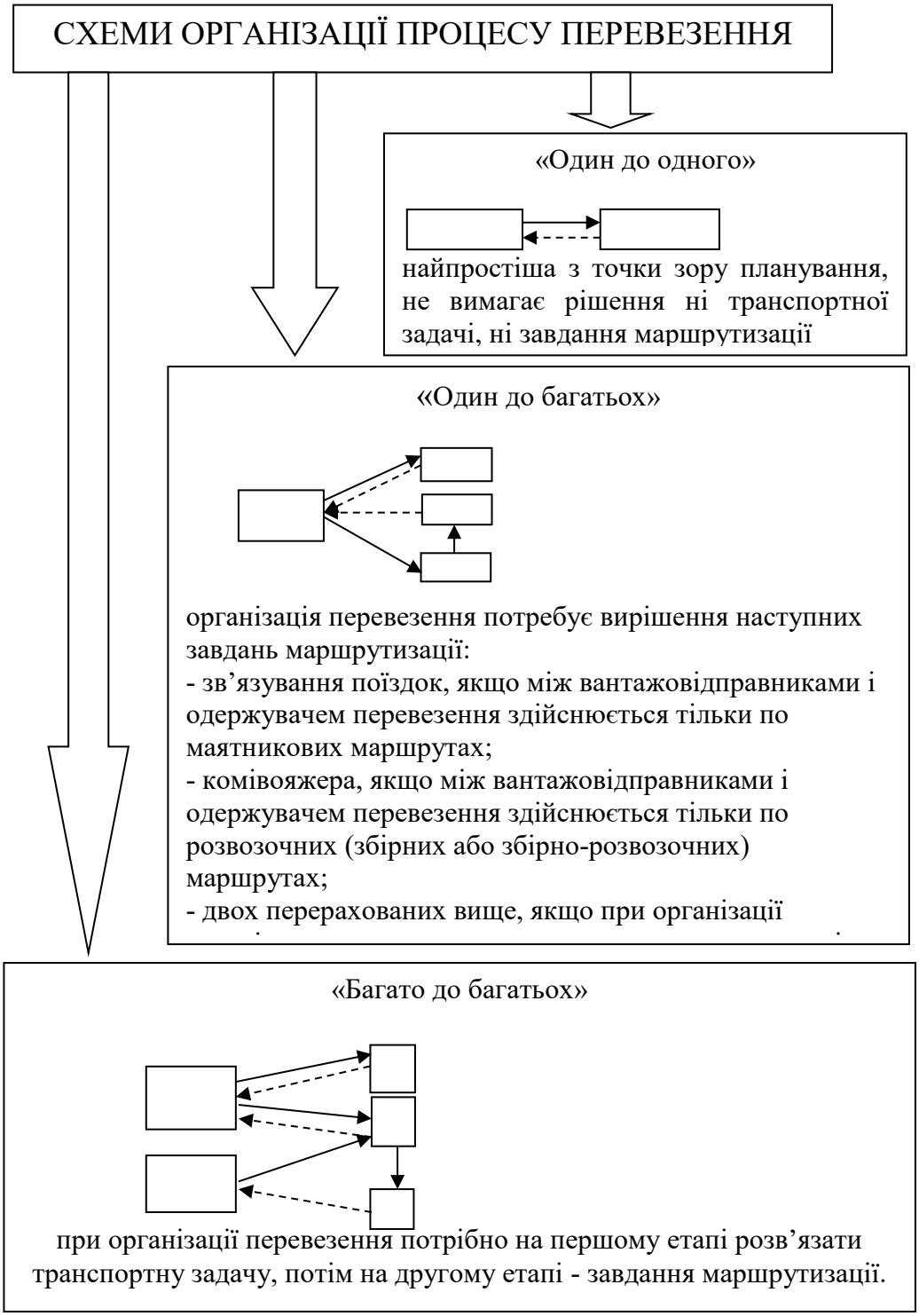


Рисунок 1.4 – Схеми організації процесу перевезення продукції [19]

У дослідженнях Т. Гапчака запропоновано алгоритм моделювання організації процесу перевезення. Алгоритм наведено на рис. 1.5.

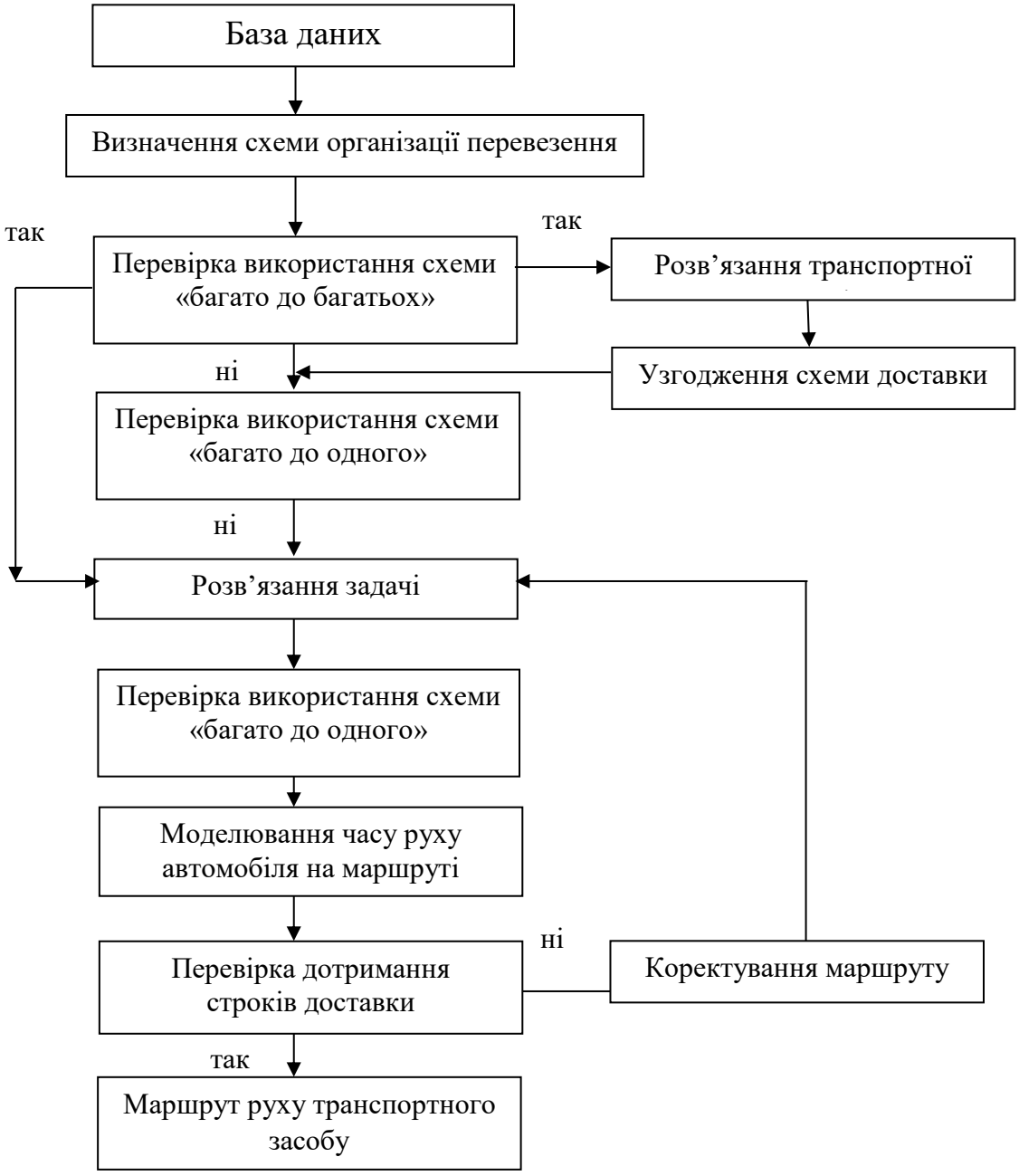


Рисунок 1.5 – Алгоритм моделювання організації процесу перевезення [19]

Критеріями оптимальності в транспортній задачі можуть виступати:

– транспортна робота;
– витрати часу на доставку;
– вартість перевезення.

Результатом застосування алгоритму є визначення, по яких маршрутах буде здійснюватися перевезення вантажу від кожного відправника до одержувачів, закріплених за ним після рішення транспортної задачі.

1.2. Поняття комбінованої задачі доставки

На початку свого розвитку логістика зосереджувалася на вирішенні простих задач доставки вантажів, які характеризувались наявністю одного з базових обмежень. Основними типами обмежень у цих задачах були:

– обмеження маршруту. Це класичні транспортні задачі, в яких необхідно визначити оптимальний маршрут між пунктами відправлення та доставки вантажів. Оптимізація виконувалася з урахуванням мінімізації витрат на транспортування, наприклад, зменшення загальної відстані або часу перевезення. Такі задачі зазвичай розв’язувалися методами лінійного програмування;

– обмеження на транспорт. Умови цього типу враховували характеристики транспортних засобів, які використовувалися для перевезення вантажів. Наприклад, тип транспортного засобу (вантажівки, залізничні вагони, кораблі або літаки), його вантажопідйомність, об’єм або спеціалізоване обладнання (рефрижератори, цистерни тощо). Крім того, враховувалися вимоги до транспортування різних видів вантажів, таких як небезпечні речовини, продукти харчування;

– обмеження часу. У цих задачах враховувалися часові рамки для виконання доставки. Наприклад, доставка могла мати чіткий графік, де вантаж мав бути доставлений у визначені часові вікна. Це включало не тільки час прибуття до пункту призначення, але й періоди завантаження чи розвантаження;

– обмеження розташування точок. Цей тип обмежень передбачав врахування географічного розташування ключових точок маршруту, таких як склади, пункти перевантаження, точки заправки, або інші об'єкти

інфраструктури. Наприклад, для великих відстаней оптимізація маршруту включала планування зупинок для дозаправки або обслуговування транспортного засобу.

Ці задачі вирішувалися переважно аналітичними методами, базуючись на математичних моделях і припущеннях, що значно спрощували реальні умови. Проте зі збільшенням масштабів логістичних систем, зростанням обсягів вантажів і кількості маршрутів, а також підвищенням вимог до точності й ефективності процесів, виникла необхідність поєднувати декілька обмежень. Поняття комбінованої задачі доставки (Combined Delivery Problem) виникло як відповідь на цю необхідність.

Основи цього поняття закладено у 1980–х роках, коли дослідник М. М. Соломон працював над задачами маршрутизації транспортних засобів із часовими вікнами (VRPTW), розширюючи класичну задачу маршрутизації транспортних засобів (VRP – Vehicle Routing Problem) для включення часових обмежень.

Подальший розвиток комбінованих задач відбувся в 1990–х і 2000–х роках завдяки таким науковцям, як Паоло Тот і Даніеле Віго, які досліджували комбіновані підходи в оптимізації логістичних задач. У своїй книзі "Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications" вони запропонували комплексний підхід до розв’язання задач, які включають кілька видів обмежень: транспортних засобів, часу, типу вантажу, маршрутів [3,20]. Такі дослідники як М. Балдаччі та Крістіана Архетті, акцентують увагу на специфічних задачах із поділом поставок, що розширює межі традиційного VRP [4,6].

Одним із важливих факторів, який дозволив вирішувати складні комбіновані задачі, стала контейнеризація, яка виникла у 1960–х роках і надала змогу стандартизувати вантажі, що значно спростило процес перевантаження товарів між різними видами транспорту. Одними із перших, хто використав даний підхід, були такі компанії, як Sea–Land Service Inc на Атлантичному узбережжі США, Matsons на Тихоокеанському узбережжі та

Associated Steamships Ltd в Австралії. Застосування контейнеризації відіграє важливу роль у мультимодальних комбінованих задачах доставки, де необхідно забезпечити координацію між кількома видами транспорту [21].

Існуючі на даний час комбіновані задачі доставки вантажів можна класифікувати за критеріями: за поєднанням основних логістичних компонентів; за типом транспортних засобів; за часовими характеристиками; за кількістю критеріїв оптимізації; за типом невизначенності та ризиків; за типом інтеграції логістичних процесів.

За поєднанням основних логістичних компонентів виділяють:

– комбіновані задачі маршрутизації та завантаження (Vehicle Routing Problem with Loading Constraints). Вони поєднують задачі маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) із задачами завантаження (Packing Problem), враховують обмеження по вантажопідйомності, об'єму, а також просторове розміщення вантажів у транспортних засобах. До цього виду задач можна віднести VRP з тривимірним завантаженням та VRP з секвенційним завантаженням, CVRP [20];

– комбіновані задачі розкладу та транспортування (Integrated Scheduling and Transportation Problems). Поєднують задачі планування виробництва або обслуговування з задачами транспортування готової продукції або ресурсів. В таких задачах необхідно узгодити графіки виробництва з графіками доставки, враховуючи часові обмеження та ресурсні обмеження. Прикладом таких задач є задача інтегрованого планування виробництва та доставки, Job Shop Scheduling з транспортуванням [22];

– комбіновані задачі управління запасами та маршрутизації (Inventory Routing Problem, IRP). Поєднують управління рівнями запасів у пунктах попиту з оптимізацією маршрутів доставки, враховують динамічні зміни попиту, витрати на зберігання та транспортування (IRP з часовими вікнами, багатоперіодичний IRP) [23];

– комбіновані задачі перерозподілу та перевантаження (Hub Location and Routing Problems). Поєднують вибір оптимальних місць розташування хабів (перевантажувальних пунктів) з оптимізацією маршрутів між ними, враховують витрати на будівництво або використання хабів, а також витрати на транспортування між хабами та кінцевими пунктами (Задача розміщення хабів з маршрутизацією, двоетапні транспортні задачі) [22].

За типом транспортних процесів:

– одномодальні комбіновані задачі. Характерним є використання одного виду транспорту (наприклад, автомобільного), але поєднуються різні логістичні задачі [23];

– мультимодальні комбіновані задачі. Використовується декілька видів транспорту (автомобільний, залізничний, морський, повітряний), що потребує координації між ними. Враховуються різні характеристики транспортних засобів, витрати, обмеження та можливості перевантаження [22] (Мультимодальний VRP, задачі інтермодального транспорту).

За часовими характеристиками:

– статичні комбіновані задачі. Усі параметри задачі відомі заздалегідь і не змінюються з часом. Можна застосовувати класичні методи оптимізації, планування здійснюється на один період [23];

– динамічні комбіновані задачі. Параметри задачі змінюються з часом, наприклад, з'являються нові замовлення, змінюються умови дорожнього руху. Потребують використання методів динамічного програмування або реалістичних евристик, планування здійснюється на декілька періодів або в режимі реального часу (Динамічний VRP, динамічний IRP) [24].

За кількістю критеріїв оптимізації:

– однокритеріальні комбіновані задачі. Оптимізація здійснюється за одним критерієм (наприклад, мінімізація витрат або часу доставки), вона спрощує розв'язання задачі, але може не враховувати інші важливі аспекти [25];

– багатокритеріальні комбіновані задачі. Оптимізація здійснюється за декількома критеріями одночасно (наприклад, мінімізація витрат і часу, максимізація рівня обслуговування). Потребують використання методів багатокритеріальної оптимізації, таких як метод Парето. (Багатокритеріальний VRP, багатокритеріальний IRP) [22];

За типом невизначеності та ризиків:

– детерміновані комбіновані задачі. Усі параметри задачі точно відомі. Для данного типу задач можна застосовувати класичні методи оптимізації [25];

– стохастичні комбіновані задачі. Деякі параметри задачі є випадковими величинами з відомими розподілами (наприклад, попит, час доставки) [23]. Потребують використання методів стохастичної оптимізації (Стохастичний VRP, стохастичний IRP);

– робастні комбіновані задачі. Параметри задачі можуть змінюватися в певних межах, і необхідно знайти рішення, стійке до таких змін. Використовуються методи робастної оптимізації (Робастний VRP, робастний IRP) [22].

За рівнем інтеграції логістичних процесів:

– однорівневі комбіновані задачі. Оптимізація здійснюється на одному рівні логістичної мережі (наприклад, тільки на рівні розподілу) [20]. Менш складні в моделюванні, але можуть не враховувати взаємодію з іншими рівнями;

– багаторівневі комбіновані задачі. Включають декілька рівнів логістичної мережі (закупівлі, виробництво, розподіл). Потребують комплексного підходу, враховують взаємодію між різними рівнями (Задачі планування ланцюга поставок (Supply Chain Planning)) [22];

Оптимізація комбінованих задач доставки вантажів є важливою складовою сучасної транспортної логістики, яка спрямована на зменшення витрат, підвищення ефективності маршрутів та відповідність складним обмеженням. Для цього використовуються математичні моделі та евристичні

алгоритми, які допомагають знаходити ефективні рішення в умовах реального часу.

1.3 Методи штучного інтелекту в логістиці

Розвиток технологій дозволив збирати та зберігати величезні обсяги даних про логістичні операції, такі як інформація про маршрути, запаси, попит клієнтів і стан транспорту. Традиційні математичні методи оптимізації, такі як лінійне програмування, були обмежені в можливостях обробки великих масивів динамічних даних, тому необхідно було почати пошук нових рішень. Одним із рішень став штучний інтелект, застосування якого у логістиці відкриває простір можливостей для автоматизації та оптимізації логістичних процесів.

Важливий вклад у розвиток застосування штучного інтелекту в логістиці внесли як українські, так і іноземні науковці. Серед українських вчених слід відзначити І. М. Горбася та М. А. Федоренка, які дослідили поточний стан і перспективи ринку логістичних послуг в Україні, виділивши важливість інноваційних технологій для підвищення ефективності логістики [26].
В. І. Скіцько у своїй роботі розглядає синергію цифрових технологій, зокрема ШІ, що забезпечує підвищену оперативність та адаптивність логістичних систем [27].

Не менш важливий внесок зробили А. Лопатін і Н. Іщенко, які дослідили застосування ШІ у виборі постачальників у сучасних логістичних системах, підкресливши його значення для оптимізації логістичних рішень [28]. І. І. Новаківський та Г. В. Рачинська детально проаналізували, як ШІ може сприяти управлінню інноваційними процесами в ланцюгах постачання, що є одним з ключових напрямків сучасної логістики [29]. Значний теоретичний внесок належить М. О. Кизиму, І. Ю. Матюшенку та І. В. Шостаку, які у своїй монографії досліджують перспективи розвитку інформаційно–

комунікаційних технологій і ШІ, виділяючи його роль у підвищенні продуктивності логістичних систем як в Україні, так і у світі [30].

Системи на основі ШІ дозволяють аналізувати великі обсяги даних для прогнозування попиту, оптимізації маршрутів і підвищення ефективності операцій, що особливо актуально в умовах військових конфліктів. Використання дронів, автоматизованих складів та інтеграція інформаційних систем допомагає зменшити ризики та забезпечити стабільне функціонування ланцюгів постачання навіть у найскладніших умовах [10].

Основні напрями використання ШІ у логістиці наведені на рис. 1.7.



Рисунок 1.6 – Напрями використання ШІ у логістиці

[Узагальнено 26 – 30]

Розглядаючи визначення ШІ, можна виділити його ключові можливості, такі як навчання, сприйняття, прогнозування, взаємодія, адаптація та міркування.

Описати можливості ШІ можна наступним чином [31]:

– навчання

Навчання є фундаментальною здатністю ШІ, що забезпечує його спроможність прогнозувати, аналізувати та приймати рішення, базуючись на досвіді і даних. Існують різні типи навчання: навчання з учителем, що полягає у навчанні на основі маркованих даних; навчання без учителя, яке здійснюється на основі немаркованих даних; напівкероване навчання, що комбінує обидва підходи; і переносне навчання, яке дозволяє ШІ використовувати вже отримані знання в нових умовах.

– сприйняття

Ця можливість дозволяє ШІ інтерпретувати навколишнє середовище, використовуючи такі інструменти, як комп'ютерний зір, обробка звукових сигналів і природної мови. Завдяки цій здатності ШІ здатний «бачити», «чути» і розуміти текст, що значно розширює спектр його застосувань у реальних сценаріях.

– прогнозування

ШІ здатний будувати прогнози на основі минулих даних і виявлених закономірностей, що є критично важливим для прийняття рішень. Ця здатність охоплює числові прогнози (регресія), класифікацію даних, прогнозування часових рядів і виявлення аномалій, що дозволяє прогнозувати різні показники й запобігати потенційним проблемам.

– взаємодія

Взаємодія передбачає здатність ШІ приймати рішення у відповідь на зміни в оточенні або у співпраці з користувачем. Вона охоплює навчання з підкріпленням, де ШІ навчається методом проб і помилок, а також взаємодію людини з ШІ, що дозволяє більш зручну й ефективну співпрацю.

– адаптація

ШІ здатний адаптуватися і вдосконалювати свої навички на основі нових даних або змін у середовищі, що робить його більш гнучким та ефективним. Така адаптивність забезпечується безперервним навчанням і еволюційними

алгоритмами, що дозволяють постійно поліпшувати моделі, не починаючи їх навчання з нуля.

– міркування

Міркування дає можливість ШІ аналізувати, планувати та приймати рішення, що є необхідним для виконання складних завдань, таких як логічне мислення, планування стратегій та прийняття оптимальних рішень у складних умовах. Ця можливість охоплює такі процеси, як символічні міркування, створення планів та формування стратегічних рішень.

Яскравим прикладом успішного впровадження штучного інтелекту в логістичні процеси є компанія Maersk. Вона є однією з найбільших транспортно–логістичних компаній у світі. Maersk почала активно інтегрувати технології штучного інтелекту приблизно у 2018 році, усвідомлюючи необхідність цифрової трансформації для підвищення конкурентоспроможності [32]. Відтоді компанія значно розширила застосування інтелектуальних рішень у своїх логістичних операціях, використовуючи різні методи ШІ, завдяки яким має змогу отримувати точніші прогнози, оптимізувати маршрути та підвищувати прозорість перевезень.

Для досягнення цих цілей Maersk застосовує декілька ключових методів штучного інтелекту, кожен з яких спрямований на покращення окремих аспектів логістики [32]:

– аналіз даних та машинне навчання. Maersk використовує машинне навчання для аналізу величезних обсягів даних, зокрема про транспортні потоки, час очікування та погодні умови. Завдяки цьому компанія може прогнозувати затримки, розробляти адаптивні стратегії та забезпечувати безперервність постачання. Алгоритми машинного навчання допомагають Maersk не тільки швидше реагувати на зміни, а й передбачати можливі ризики.

– оптимізація маршрутів за допомогою ШІ. Maersk впровадила систему оптимізації маршрутів, яка враховує численні фактори, такі як завантаженість портів, погодні умови та витрати на паливо. Завдяки алгоритмам оптимізації ШІ компанія може вибирати найефективніші

маршрути для суден, зменшуючи час у дорозі та витрати на перевезення. Це також знижує вплив на навколишнє середовище, що відповідає прагненню Maersk стати екологічно відповідальною компанією.

– прогнозування попиту. Ще один важливий напрямок використання ШІ — прогнозування попиту. Алгоритми прогнозування, які базуються на аналізі історичних даних, дозволяють Maersk краще планувати перевезення, враховуючи сезонні коливання та інші чинники. Це допомагає компанії більш точно оцінювати необхідні ресурси і зменшувати надлишкові витрати на зберігання товарів.

– чат–боти та автоматизація обслуговування клієнтів. Щоб покращити комунікацію з клієнтами, Maersk використовує чат–боти, що працюють на основі обробки природної мови (NLP). Чат–боти надають клієнтам актуальну інформацію про стан їхніх замовлень, можливі затримки та інші важливі аспекти логістики. Це допомагає знизити навантаження на центр обслуговування клієнтів і забезпечує своєчасний доступ клієнтів до необхідної інформації.

Інтеграція ШІ у логістичні процеси Maersk призвела до значних покращень. Завдяки оптимізації маршрутів та прогнозуванню попиту, компанії вдалося знизити витрати на транспортування, зменшити час доставки та покращити управління запасами [32].

Крім того, використання чат–ботів покращило обслуговування клієнтів, оскільки вони тепер отримують оперативні відповіді на свої запити. Це, у свою чергу, підвищує рівень задоволеності клієнтів і допомагає зміцнити репутацію Maersk як надійного партнера в логістичній сфері.

В цілому, інтеграція ШІ в логістичні процеси не лише оптимізує операційну діяльність, але й сприяє побудові стійких та адаптивних ланцюгів постачання, що є особливо актуальним в умовах глобалізації та нестабільності ринків. Таким чином, впровадження ШІ у логістиці не лише відповідає сучасним викликам, але й відкриває нові можливості для стратегічного управління, що забезпечує конкурентні переваги компаніям на ринку.

РОЗДІЛ 2
КОМБІНОВАНІ ЗАДАЧІ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗВ'ЯЗАННЯ

2.1 Постановка задач маршрутизації транспорту

Проблема маршрутизації з обмеженням на вантажопідйомність транспортного засобу (CVRP) є добре відомою проблемою транспорту, запропонованою в 1959 році [9].

Серед багатьох задач логістики, завдання CVRP, є найважливішим та найпоширенішим. Ця задача є однією з основних і базових версій VRP і відноситься до NP–складних комбінаторних оптимізаційних задач (від англ. Non–deterministic Polynomial–time hard problems) — це клас задач, для яких не відомо жодного ефективного (поліноміального) алгоритму розв'язку [33]. Тобто, зростання часу, необхідного для вирішення задачі, дуже швидко збільшується з ростом її розміру. Сформулюємо загальну постановку цього завдання.

Нехай задано n–1 точки доставки (клієнтів), в які товар повинен бути доставлений. Ці точки будуть пронумеровані цифрами n=1,2,...,n–1. Товар є однорідним і нескінченно ділиться за вагою.

Кожний пункт доставки визначається точкою на площині. Декартові координати цього пункту відомі.

Крім того, вважається вказаним місце складу (депо), в якому зберігається обсяг продукції, достатній для задоволення всіх запитів постачальників. Номер складу – 0.

Завдання координат точок дозволяє розрахувати матрицю відстаней D між цими точками, ця матриця симетрична і має розмір nxn. У більш загальному випадку будемо припускати, що матриця D задана, а її елементи визначають всі витрати, пов'язані з рухом товару між відповідними точками доставки та депо.

Ці витрати не залежать від кількості переміщених товарів і визначаються лише взаємним розташуванням точок. Елементи такої матриці будемо називати узагальненою відстанню між точками.

Для кожного клієнта задано обсяг продуктів, який повинен бути доставлений зі складу до цього клієнта.

Допустиме рішення для задачі CVRP складається з набору маршрутів, які починаються та закінчуються в депо так, що до кожного клієнту встановлений лише однин маршрут, а загальна потреба клієнтів, призначених для маршруту, не перевищує вантажопідйомність Q транспортного засобу. Зокрема, величина потреби будь–якого клієнта в продукції не перевищує вантажопідйомності Q транспортного засобу.

Приклад такого рішення представлений на рис. 2.1. При цьому, немає обмежень щодо загальної довжини маршруту.

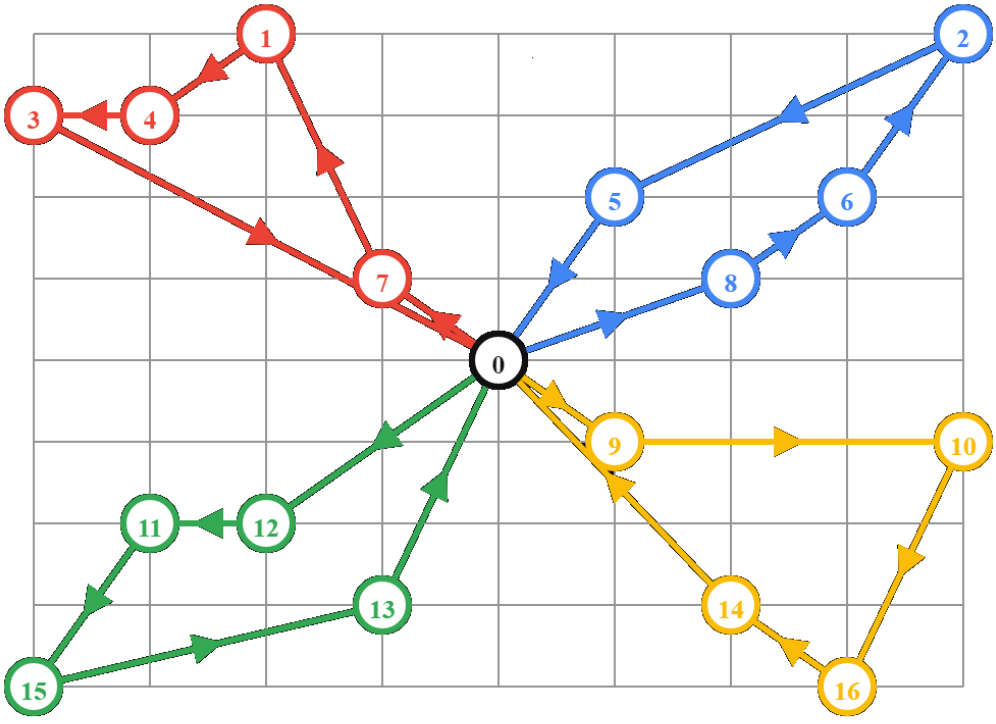


Рисунок 2.1 Допустима схема маршрутів

Звернемо увагу на те, що допустиме рішення задачі в умовах, описаних вище, завжди існує. А саме: тривіальне рішення, в якому продукція почерзі

доставляється кожному клієнту у кількості його потреби. Після доставки транспортний засіб повертається до депо тим шляхом, за яким була доставка до клієнта. Кількість повернень до депо у цьому рішенні збігається з кількістю клієнтів.

Оптимальне рішення для CVRP є допустимим рішенням, який мінімізує загальну вартість перевезень. Немає обмежень на кількість маршрутів.

Серед можливих додаткових обмежень в умові задач CVRP можуть бути присутні наступні:

а) може бути задано кілька пунктів–депо, в яких автомобіль може дозаправитися та завантажити нову партію товару. При цьому можуть існувати обмеження на доставку товару з конкретного початкового пункту. Це дозволяє автомобілям подовжити маршрут, не повертаючись до початкового депо. Можливе накладання таких додаткових умов:

– обмеження на постачання з конкретного пункту: наприклад, певний товар може бути доступний лише в окремому депо, що обмежує можливість перевезення з інших пунктів;

– часові обмеження на завантаження або роботу депо: деякі депо можуть працювати лише у певні години, що накладає додаткові обмеження на планування маршрутів;

б) можливе перевантаження товару у проміжних пунктах доставки. Це обмеження передбачає можливість перевантаження або перерозподілу товару в проміжних пунктах, що можуть служити проміжними складськими об'єктами або пунктами для оптимізації логістики. Це може включати:

– часткове розвантаження або передача товарів іншому транспортному засобу, який продовжить маршрут;

– використання проміжних пунктів для тимчасового зберігання товару перед його подальшим доставленням, що дозволяє знизити навантаження на транспортні засоби та оптимізувати маршрути;

в) в умовах задачі може бути передбачений парк автомобілів з різними характеристиками, такими як:

– вантажопідйомність: автомобілі різного типу мають різні максимальні навантаження, що вимагає більш точного підбору транспортного засобу для конкретного замовлення або маршруту;

– вартість оренди: різні автомобілі можуть мати різні витрати на оренду або експлуатацію, і для мінімізації загальних витрат важливо оптимально вибрати транспортний засіб для кожного маршруту;

– типи автомобілів: можуть використовуватися транспортні засоби різних типів, наприклад, фургони, вантажівки або спеціалізовані автомобілі (для холодного зберігання, для великогабаритного вантажу тощо), кожен з яких підходить для різних типів вантажу або маршрутів;

г) обмеження на кількість автомобілів:

Це обмеження задає максимальну кількість транспортних засобів, які можуть бути використані для виконання доставки. Дане обмеження може бути актуальним у ситуаціях, коли компанія володіє обмеженою кількістю транспортних засобів або має встановлену кількість автомобілів для конкретного завдання. Це змушує оптимізувати використання ресурсів таким чином, щоб максимально ефективно використовувати доступний парк автомобілів для покриття всіх вимог доставки.

Д) можуть бути й інші обмеження.

При виконанні всіх умов попередньої задачі, відкривається можливість перейти до більш складної версії. А саме до задачі, у якій, крім обмежень на місткість транспорту, додаються часові вікна для обслуговування клієнтів – CVRPTW(Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows). В рамках цієї задачі кожен клієнт повинен бути обслуговуваний у визначений проміжок часу.

Значущими прикладами застосування CVRPTW є доставки до супермаркетів, поштові та банківські перевезення, збір промислових відходів, патрулювання і доставка газет у містах.

Зростання практичної значущості цієї задачі відбувалося паралельно з розширенням і поглибленням досліджень, спрямованих на її розв’язання.

Значний прогрес було досягнуто як у використанні евристик для розв’язку цього класу задач, так і у створенні оптимальних підходів [34].

Як і у задачі CVRP, вхідними даними для CVRPTW є n локацій (депо та набір із n+1 клієнтів), матриця D, розміром (n+1) × (n+1), яка визначає відстані (або витрати) між кожною парою локацій, величина q_i, що визначає потребу кожного клієнта i в певному ресурсі максимальна кількість ресурсу Q, яку може перевозити транспортний засіб.

Також задано максимальну кількість товару Q, яку може перевезти транспортний засіб (автомобіль) за один раз, і відому довжину максимально можливого пробігу автомобіля без дозаправки. Задано швидкість автомобіля та витрати на одиницю пройденої відстані.

Крім цього, для кожного вузла i визначається:

– час обслуговування si, який показує, скільки часу займає обслуговування клієнта i;

– часове вікно [ti, Ti], де ti < Ti, в межах якого необхідно доставити потрібний обсяг товару до відповідного пункту. Якщо автомобіль прибуває до пункту до початку часового вікна, він очікує його відкриття, і за кожну одиницю часу простою нараховується штраф заданої величини. Транспортний засіб може прибути на місце клієнта раніше початку часового вікна, але повинен чекати, поки вікно "відкриється", щоб розпочати доставку. Доставку не можна почати після закриття часового вікна. Таким чином, обмеження щодо часових вікон вважаються жорсткими обмеженнями [35].

– обмеження V на кількість доступних транспортних засобів. Допустиме рішення для CVRPTW складається з набору маршрутів (не більше V), які починаються і закінчуються в депо, при цьому кожен клієнт відвідується рівно один раз у межах свого часового вікна, а загальний попит на кожному маршруті не перевищує місткість транспортного засобу Q.

Оптимальне рішення для CVRPTW — це допустиме рішення, яке мінімізує загальну відстань усіх маршрутів. Варто зазначити, що в рамках

обмежень розглядається мінімізація лише загальної відстані, і рішення має дотримуватися обмеження на максимальну кількість транспортних засобів V.

Задача CVRPTW є складною оптимізаційною задачею, і для її розв'язання розроблено безліч методів. Найпоширеніші підходи поділяються на точні методи та евристики.

Точні методи. З розвитком обчислювальної техніки зросла можливість застосування точних методів для розв'язання CVRPTW. Одним з основних підходів є метод генерації колонок, що полягає у розбитті задачі на підзадачі — "головну задачу" та "підзадачу". Метод дозволяє поступово додавати до моделі нові рішення, покращуючи ефективність розв'язання. Розвиток цього підходу включає роботи Desrochers, Desrosiers і Solomon (1992), Halse (1992), та інші. Сучасні точні методи для CVRPTW базуються на застосуванні гібридних підходів, що поєднують методи Лагранжевої релаксації, розщеплення змінних та скорочення дерева розв’язків [34].

Евристики та метаевристики. Завдяки високій обчислювальній складності CVRPTW, евристичні та метаевристичні методи є дуже поширеними для наближеного розв'язання задачі. Такі методи як генетичні алгоритми, мурашині алгоритми, табу–пошук та інші дозволяють отримати якісні рішення за помірний час. Наприклад, алгоритми на основі дерева рішень використовують евристики для обмеження пошуку в просторі розв'язків, що значно підвищує ефективність.

Таким чином, використання метаевристичних методів для розв'язання задач CVRPTW дозволяє отримувати наближені рішення з високою ефективністю навіть за умов складних обмежень. Проте, для підвищення точності та адаптивності таких підходів до реальних умов доцільно перейти до використання фрагментарних моделей комбінованих задач.

Ці моделі забезпечують структуроване представлення задачі на перестановках, що відкриває можливості для розробки алгоритмів, здатних генерувати більш точні та оптимальні рішення.

2.2 Відомі алгоритми розв’язання транспортних задач

Існуючі на сьогоднішній день методи вирішення задач маршрутизації транспорту (далі – ЗМТ) можна в найширшому розумінні класифікувати таким чином:

– точні методи;
– класичні евристичні методи;
– метаевристичні методи.

Точні методи гарантують отримання оптимальних розв’язків. Однак практичне застосування таких алгоритмів можливе лише для задач невеликої розмірності. Точні підходи засновані на точних математичних алгоритмах. Такі методи розв’язання обраного класу задач засновані на повному переборі всіх можливих розв’язків, і є неефективними при розв’язанні задач великої розмірності через їх великі часові витрати.

До кінця 1980–х років найефективнішими точними методами вирішення ЗМТ були методи гілок і кордонів, засновані на базових комбінаторних спрощеннях для завдання про призначення, завдання мінімального обходу графа, а також методу скорочення простору станів.

До теперішнього часу запропоновані складніші межі, засновані на лагранжових релаксаціях та адитивному підході, що дозволило вирішувати завдання істотно більшої розмірності. Однак для вирішення практичних завдань точні методи використовують дуже рідко тому, що їх застосовують при деяких додаткових припущеннях, вони чутливі до будь–яких додаткових обмежень, а час обчислень експоненціально залежить від розмірності задачі.

Для вирішення задач більшої розмірності, які ми зустрічаємо в реальному житті, використовуються наближені методи, до яких відносяться класичні евристики та метаевристичні методи, завдяки яким обчислення відбуваються набагато швидше ніж точними методами, проте не гарантують отримання оптимального розв’язку.

Класичні евристики можна поділити на такі групи:

– конструктивні алгоритми;

– двофазні алгоритми;

– покращуючі алгоритми.

Найпростішими з евристичних алгоритмів є конструктивні. Вони будують розв’язок без його покращення.

Класичні евристики були розроблені у 1960–1990х роках. Евристичні методи виконують пошук у відносно обмеженому просторі та в цілому дають досить непогану якість рішень за невелику кількість обчислень. Крім того, більшість з них можуть бути легко пристосовані для обліку різноманітних обмежень, що виникають у реальних умовах. Тому евристики, як і раніше, широко використовуються, особливо в комерційних програмних пакетах.

Остані 2 десятиріччя спостерігається стрімкий розвиток метаевристичних алгоритмів, формування яких розпочалося ще в середині минулого століття. Розроблятись вони почали вперше після 1990–х років. Ці алгоритми являють собою результати новітніх розробок. Наразі відомо близько 40–50 широко застосовуваних і перевірених алгоритмів, а також кілька сотень алгоритмів, що перебувають на початкових етапах свого становлення. Більшість цих алгоритмів були запропоновані на основі ідей, які виникли як наслідок спостережень процесів у живій та неживій природі. Метаевристики, на відміну від класичних евристик, основані на методі не локального, а глобального пошуку. Такі спеціалісти, як Алгасарова, Емільянова та Пожидаєв, вважають, що це забезпечує три їх важливих переваги:

– вони дозволяють досліджувати більший простір пошуку, для отримання рішення, максимально наближеного до глобального оптимуму;

– вони здатні до подолання точки локального мінімума для продовження пошуку;

– вони здатні знайти рішення, близьке до оптимального за прийнятний проміжок часу.

До алгоритмів метаевристик, які використовуються найчастіше належать:

– пошук із з заборонами (метод "табу");
– метод імітації відпалу;
– генетичний алгоритм;
– алгоритм мурашиних колоній;
– інші метаеврістики;
– нейронні мережі.

Генетичний алгоритм (ГА) виник в результаті спроб копіювати природні явища. Це евристичний алгоритм пошуку, що використовується для вирішення задач оптимізації та моделювання шляхом послідовного підбору, комбінування та варіації шуканих параметрів.

Задача кодується так, щоб її розв’язок можна було подати у вигляді вектора «хромосома», а механізми ГА нагадують біологічну еволюцію. Можна виділити такі етапи генетичного алгоритму:

а) випадкове створення деякої кількісті векторів (початкової популяції);

б) визначення функції пристосованості для особин популяції (оцінювання);

в) обчислення пристосованості кожного індивідуума в популяції, а потім середньої пристосованості всієї популяції;

г) вибір індивідуумів з поточної популяції в якості двох батьків для реалізації оператора схрещування (crossover);

д) реалізація оператору мутації (mutation) із заданими ймовірностями та формування генотипу нащадків;

е) визначення кількості індивідуумів для виключення їх з популяції, щоб її розмір залишався постійним;

ж) визначення пристосованості (значення цільової функції) і перерахування середньої пристосованості;

з) продовження життєвих циклів, поки не буде задовільнено критерій зупинки .

Генетичні алгоритми в різних формах використовуються в багатьох наукових та технічних проблемах та в різних предметних областях, а саме: для створення різних обчислювальних структур, автоматів або мереж сортування; для проектування нейронних мереж або управлінні роботами; для моделювання управління виробництвом, в економіці та фінансах, медицині та біології, математиці та алгоритмуванні, геофізиці; в багатьох прикладних програмах, включаючи проектування літаків, налаштування параметрів алгоритмів і пошук стійких станів систем нелінійних диференціальних рівнянь і безпосередньо у вирішенні задач маршрутизації.

В багатьох випадках генетичні алгоритми виявляються більш ефективними, ніж традиційні алгоритми та методи. А розвиток комп'ютерних технологій і обчислювальної потужності комп'ютерів тільки зміцнить позиції генетичного алгоритму як ефективного алгоритму пошуку.

У метаевристиках акцент робиться на проведення глибоких досліджень у найбільш перспективних галузях простору рішень. Ці методи поєднують складні правила пошуку, структури даних та рекомбінації рішень. Якість одержуваних за допомогою цих методів рішень, як правило, набагато вища, ніж у класичних евристик, але час обчислень при цьому зростає [36]. Більше того, деякі метаевристики залежать від контексту конкретної задачі і вимагають точно налаштовані параметри, що управляють, а це може зробити важким їх поширення на інші завдання [37].

Зупинимось більш детально на генетичних алгоритмах, а саме на прикладі алгоритму мурашиної колонії. Мурашині алгоритми досліджуються європейськими вченими з середини 90–х років. Почалося все з вивчення поведінки реальних мурах. Експерименти з Argentine ants, що проводились Госсом в 1989 і Денеборгом в 1990 році стали початком для подальшого дослідження ройового інтелекту. Дослідження застосування отриманих знань для дискретної математики почав Марко Дориго з Університету Брюсселя, Бельгія. Саме він вперше зумів формалізувати поведінку мурах і застосувати стратегію їхньої поведінки для вирішення завдання про найкоротших шляхах.

Пізніше за участю Гамбарделло, Тайлларда і Ді Каро були розроблені і багато інших підходи до вирішення складних оптимізаційних задач при допомогою мурашиних алгоритмів.

На сьогоднішній день вже отримані результати, достатні для оптимізації таких складних комбінаторних задач, як задача комівояжера, задача оптимізації маршрутів вантажівок, завдання розмальовки графа, квадратична задача про призначення, завдання оптимізації мережевих графіків, завдання календарного планування і багато інших. Особливо ефективні мурашині алгоритми при динамічної оптимізації процесів в розподілених нестаціонарних системах, наприклад, трафіків в телекомунікаційних мережах [38].

Мурашиний алгоритм один з ефективних поліноміальних алгоритмів для знаходження наближених розв'язків задачі комівояжера, а також аналогічних завдань пошуку маршрутів на графах. Підхід запропонований бельгійським дослідником Марко Доріго (англ. Marco Dorigo) [39]. Суть підходу полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, що шукають дороги від колонії до їжі.

У основі алгоритму лежить поведінка мурашиної колонії маркування вдалих доріг великою кількістю феромону.

В природі, мурахи (початково) блукають довільним чином, і по знаходженні їжі повертаються до колонії, залишаючи по собі феромонний слід. Якщо інші мурахи знаходять такий шлях, вони схильні припинити свої блукання, натомість слідувати позначеним шляхом, посилюючи його під час повернення у разі знайдення їжі.

Однак, з часом, феромонові шляхи випаровуються, тоді привабливість шляхів зменшується. Чим більше часу потрібно мурасі, щоб подолати дорогу, тим більше часу мають феромони, щоб випаруватись. Натомість, короткий шлях проходиться частіше, отже щільність феромонів стає більшою на короткому шляху. Випаровування феромонів також надає перевагу уникнення локально найкращих шляхів. Якби випаровування не відбувалось взагалі,

шляхи обрані першим мурахою тяжіли б стати вкрай привабливими для наступних. В цьому разі, розвідка можливих шляхів була б обмежена.

Таким чином, коли мураха знаходить вдалий (тобто короткий) шлях з колонії до джерела їжі, інші мурахи швидше слідуватимуть йому, і позитивний зворотний зв'язок зрештою призведе до обрання цього шляху всіма мурахами. Ідея мурашиного алгоритму полягає в наслідуванні поведінки з «симулятором мурахи», що прогулюється графом, який представляє проблему, що треба розв'язати.

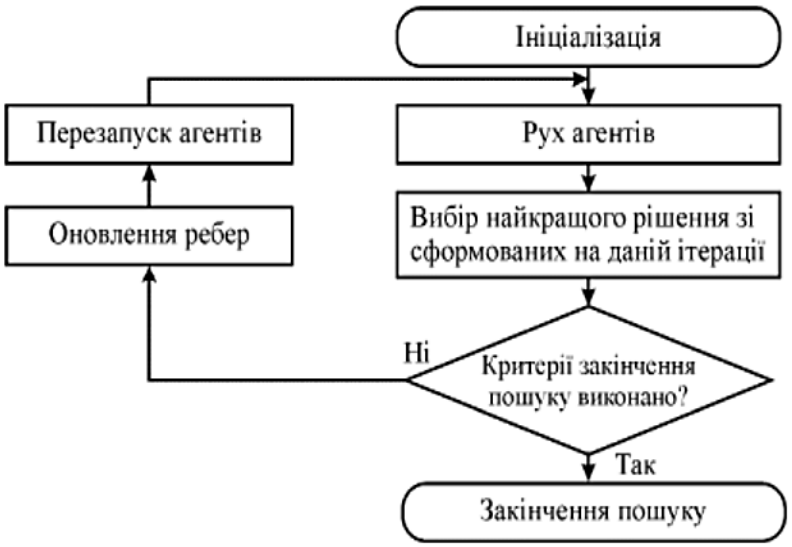


Рисунок 2.2 – Узагальнена схема роботи методу мурашиного алгоритму [40]

Всього запропоновано 3 методи мурашиних систем, що відрізняються способом оновлення шляхів ребер:

– кількісний;
– щільністий;
– циклічний.

У щільнісному й кількісному методах агенти залишали феромони в процесі формування рішення, а у циклічному методі після закінчення переміщення, тобто після формування рішення.

Наступним універсальним і потужним методом оптимізації є алгоритм мшаних стрибаючих жаб (SFLA). Алгоритм є простим для розуміння та реалізації, має невелику кількість параметрів, успішно застосовувався для розв'язання задач комбінаторної та неперервної оптимізації. Даний алгоритм був запропонований у 2006 році Eslami M. R. Narimani [41]. Він заснований на поведінці колонії жаб, які координуються та співпрацюють для досягнення найкращого результату. Ідея алгоритму черпається з природного процесу пошуку їжі жабами, де вони комбінують локальне й глобальне дослідження простору.

Багато алгоритмів, зокрема описані вище евристики, краще працюють на перестановках завдяки можливості застосування спеціальних операторів, таких як кросовер, мутація, інверсія або локальний пошук, які природно визначені для перестановок. Представлення алгоритмів на перестановках дозволяє суттєво скоротити простір пошуку порівняно з неперестановочними представленнями. Наприклад, замість розгляду всіх можливих комбінацій відвідувань клієнтів алгоритм розглядає тільки ті, які є допустимими впорядкованими перестановками. А для використання алгоритмів на перестановках, виникає необхідність представлення описаних раніше задач на фрагментарних структурах.

2.3 Фрагментарні підходи до моделювання задач доставки вантажів

Задачі логістики часто залежать від зміни зовнішніх умов, наприклад, нових замовлень, обмежень на транспортування, умов на дорогах тощо. Фрагментарна структура дає змогу легко адаптуватися до таких змін, обробляючи окремі фрагменти маршруту, що дозволяє ефективно оновлювати рішення. Фрагментарна структура визначає спосіб представлення транспортної мережі, де кожен допустимий фрагмент є потенційним етапом виконання доставки. Це полегшує застосування алгоритмічних методів для

знаходження оптимального маршруту і дає змогу використовувати алгоритми на перестановках, що значно покращує розв'язок [42–46].

Орієнтованою фрагментарною структурою (X, E) на кінцевій множині будемо називати множину кінцевих послідовностей елементів множини *X*, таких, якщо послідовність $\{x_1, x_2, ..., x_m\}$ належить множині *E*, то і будь–яка її початкова підпослідовність $\{x_1, x_2, ..., x_k \mid k < m\}$ також належить множині *E* [47].

Послідовності елементів із множини *E* називаються допустимими фрагментами. Допустимі фрагменти потужності 1 називаються елементарними. Допустимий фрагмент називатимемо максимальним, якщо він не є підпослідовністю жодного іншого допустимого фрагмента. За визначенням порожня множина є допустимим фрагментом.

Якщо задана ефективна процедура перевірки належності послідовності множині *E*, то кожен максимальний фрагмент можна побудувати таким жадібним алгоритмом:

а) спочатку вибирається деяке лінійне впорядкування множини *X*;

б) на початковому кроці вибирається порожня послідовність $X_0 = \varnothing;$;

в) на кроці з номером *k* + 1 вибирається перший за заданим порядком елемент такий, що виконується умова $x_{k+1} \in X \setminus \{x_1, x_2, ..., x_k\},$. Цю умову називатимемо умовою приєднання;

г) алгоритм закінчує роботу, якщо на черговому *k*–му кроці не вдалося знайти елемент $x \in X \setminus X_{k-1}$ з необхідною властивістю.

Зауважимо, якщо $\forall\{x_1, x_2, ..., x_k\} \in E$ й $\forall x \in X$ існує алгоритм поліноміальної трудомісткості за кількістю елементів множини *X* для перевірки умови приєднання $\{x_1, x_2, ..., x_k, x\} \in E$, то завдання побудови максимального фрагмента є поліноміально розв'язаним.

Результат роботи фрагментарного алгоритму (максимальний фрагмент) залежить від того, які будуть вибиратися елементи на кожному кроці, тобто від початкового впорядкування множини *X*. Таким чином, виникає природне

відображення множини S_n перестановок розмірності $n = |X|$ в множину максимальних фрагментів фрагментарної структури сюр'єктивним.

Нехай задана фрагментарна структура (X, E) на кінцевій множині *X*. Нехай визначена монотонна за включенням функція–критерій $f : E \to R^1$, яка кожному допустимому фрагменту ставить у відповідність деяке речове число, тобто $\forall E_1, E_2 \in E$ з умови $E_1 \subseteq E_2$ випливає, що $f(E_1) \le f(E_2)$ (або $f(E_1) \ge f(E_2)$).

Одним із способів задання подібної функції є адитивний. А саме: кожному елементу множини $x \in X$ ставиться у відповідність невід'ємне число(вага) $w(x) \ge 0$. Функція визначається співвідношенням $f(\{x_1, x_2, .., x_k\}) = \sum_{i=1}^{k} w(x_i)$.

Задача оптимізації на фрагментарної структурі полягає у відшуканні допустимого фрагмента з максимальним (або з мінімальним) значенням критерію. Очевидно, оптимальним розв’язком цієї задачі при монотонно зростаючому критерії буде один із максимальних фрагментів. Принаймні максимальний фрагмент завжди є серед оптимальних розв’язків. Зазначимо, що умова максимальності фрагмента може бути обов'язковою у задачі оптимізації і без додаткових припущень про цільову функцію.

З наведених вище результатів випливає, що будь–яка задача оптимізації на фрагментарній структурі може бути зведена до комбінаторної задачі оптимізації на множині перестановок розмірності *n*. З кожною функцією $f : E \to R^1$, заданою на фрагментарній структурі, пов'язана функція $F : S_n \to R^1$, що відображає множину S_n перестановок в R^1. Значення цієї функції на перестановці $s \in S_n$ визначається наступним алгоритмом.

Спочатку з перестановки за допомогою фрагментарного алгоритму будується максимальний фрагмент $e \in E$, а потім обчислюється значення функції $F(e)$ на цьому фрагменті. Таким чином для пошуку оптимального фрагменту можна використовувати будь яку метаевристику, яка спрямована на пошук оптимальної перестановки в множині перестановок. Основним

елементом цієї метаевристики буде алгоритм пошуку значення функції $F(s)$ на будь–якій перестановці $s \in S_n$. Саме цей алгоритм пов'язаний з конкретною оптимізаційною задачею.

Серед метаевристик, що вирішують задачу пошуку оптимальної перестановки зупинимося на двох метаевристиках. А саме розглянемо алгоритм мурашиної колонії та алгоритм стрибаючих жаб.

РОЗДІЛ 3.
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗАДАЧ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ

3.1 Метаевристики на множині перестановок

Еволюційні метаеврістики найбільш відомий і поширений клас метаеврістик. Починаючи з генетичного алгоритму [49] цей клас постійно поширюється за рахунок використання нових операторів.

На множині перестановок S_n з n елементів еволюційний алгоритм містить декілька кроків. Напочатку визначаються основні параметри алгоритму:

N – кількість поколінь в еволюції;

P – розмір популяції;

K – кількість пар для схрещування;

$Cross(x,y)$ – оператор кросоверу $Cross: S_n \times S_n \to S_n$, який кожній парі перестановок з n елементів ставить у відповідність нову перестановку з цієї ж множини;

$Mut(x)$ – оператор мутації $Mut: S_n \to S_n$, який кожній перестановці з n елементів ставить у відповідність нову перестановку з цієї ж множини;

$\alpha \in (0,1)$ – ймовірність мутації;

Змінна k – лічильник поколінь.

Крок 0. Створюється початкова популяція за рахунок вибору набору з P випадкових перестановок із S_n. Для кожного елемента популяції розраховується значення цільової функції. Ця популяція стає поточною, k=0.

Крок 1. Вважаємо k=k+1. В поточній популяції випадково обирається набор з K пар перестановок для схрещування. Причому ймовірність вибору

елемента пари тим вище, чим менше значення цільової функції на цьому елементі. Наприклад, можна використовувати турнірний вибір.

Крок 3. Формуються нові перестановки з пар за допомогою оператору кросоверу.

Крок 4. З ймовірністю α кожна з нових перестановок змінюється за рахунок використання оператору мутації.

Крок 5. Нові перестановки додаються до поточної популяції і утворюють проміжну популяцію. Для всіх нових елементів розраховується значення цільової функції. Всі елементи проміжної популяції упорядковуються по значенню.

Крок 6. В проміжній популяції обираються P перестановок з найкращим (найменшим) значенням цільової функції. Ці перестановки утворюють нову поточну популяцію.

Крок 7. Якщо k<N, то переходимо на Крок 1. Якщо k=N, то алгоритм закінчує роботу. Найкраща по значенню цільової функції перестановка береться в якості субоптимального розв’язку задачі.

Розглянемо відому метаевристику – алгоритм мурашиної колонії [51], яка також може бути використана для пошуку оптимальної перестановки [47].

Як було описано раніше, ідея мурашиного алгоритму – моделювання поведінки мурах, пов'язаної з їхньою здатністю швидко знаходити найкоротший шлях від мурашника до джерела їжі та адаптуватися до умов, що змінюються, знаходячи новий найкоротший шлях. При своєму русі мураха мітить шлях феромоном, і ця інформація використовується іншими мурахами для вибору шляху. Це елементарне правило поведінки визначає здатність мурах знаходити шляхи, близькі до оптимальних.

Покажемо, як подібний механізм застосувати для пошуку оптимальної(а саме мінімальної по значенню цільової функції) перестановки. Задається кількість N циклів розрахунку і кількість K мурах. Процедура обчислення складається з виконання всіх циклів розрахунку. На кожному циклі кожна мураха пробігає маршрут, який починається з першої точки, яка може

визначатися довільно і проходить всі елементи перестановки. Таким чином кожен шлях мурахи між позиціями 1,2,..,*n* визначатиметься перестановкою $s = (i_1, i_2, \ldots, i_n)$. Мурахи мають власну пам'ять. Кожна мурашка має список вже відвіданих позицій – список заборон. Позначимо $J_{i,k}^t$ список позицій, які на циклі *t* необхідно відвідати *k*–му мураху, що знаходиться в позиції *i*.

Мурахи мають «нюх» – вони можуть уловлювати слід феромону, що підтверджує бажання мурахи пройти з позиції *i* в позицію *j* на підставі досвіду інших мурах. Кількість феромону на циклі з номером *t* при переході з позиції *i* в позицію *j* визначається величиною $\tau_{ij}\ t$. На початковому етапі цю кількість можна ставити довільно.

Імовірність переходу *k*–ї мурахи з позиції *i* в позицію *j* на циклі з номером *t* визначається наступним співвідношенням:

$$P_{ij,k}(t) = \begin{cases} \dfrac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}}{\sum\limits_{l \in J_{i,k}^t} [\tau_{il}(t)]^{\alpha}}, & j \in J_{i,k}^t \\ 0, & j \notin J_{i,k}^t \end{cases} \qquad (3.1)$$

де α – параметр, що задає вагу сліду феромону. Кількість феромону, що відкладається, становить величину:

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \dfrac{Q}{L_k(t)}, (i,j) \in T_k(t) \\ 0, (i,j) \notin T_k(t) \end{cases}, \qquad (3.2)$$

де *Q* – позитивний параметр,

$L_k(t)$ – значення цільової функції *F* на перестановці, що відповідає маршруту *k*–ї мурахи на циклі з номером *t*.

Зміна кількості феромону визначається наступним виразом:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\cdot\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij,k}(t), \qquad (3.3)$$

де m – кількість мурах,

p – коефіцієнт «випаровування» ($0 \le p \le 1$).

Алгоритм припиняє роботу, коли виконано деяке правило зупинки, наприклад, досягнуто межу числа циклів. Мінімальна за значенням цільової функції перестановка, знайдена на останньому циклі, перетворюється на розв’язок задачі.

Розглянемо наступну метаевристику – алгоритм мішаних стрибаючих жаб, яка також може бути використана для пошуку оптимальної перестановки на множині .

Розглянемо множину перестановок S_n елементів множини X.

На початку роботи алгоритму визначаються наступні параметри:

N – кількість ітерацій алгоритму;

K – розмір популяції (кількість жаб);

множина {1,2,…, Q}– класів, на які поділено популяцію;

D – кількість елементів в кожному класі ($K = Q\cdot D$);

D_0 – кількість кращих елементів у класі.

Випадковим чином будується початкова популяція $P^{(0)} = \{s_1, s_2, ..., s_K\}$ $P^{(0)=}$, яка складається з K випадково обраних перестановок розмірності $n = |X|$. Для кожного елемента популяції $P^{(0)}$ розраховується значення цільової функції F.

На кожному черговому кроці $k \le N$. Елементи поточної популяції $P^{(k)}$ упорядковуються по зростанню значень цільової функції. Визначається перестановка x* з мінімальним значенням функції F.

Популяція $P^{(k)}$ розбивається на Q класів $P_q^{(k)} = \{s_{qi} \mid s_{qi} = s_j, j = q + (i-1) \cdot Q, i = 1,2,...,K/Q\}, q = 1,2,...,Q.$

Потужності всіх класів співпадають $|P_i^{(k)}| = K/Q$. В кожному класі обираються перестановки з найменшим і найбільшим значенням цільової функції.

В кожному класі покращуються за рахунок стрибків ті перестановки (жаби), що займають позиції з номерами від D_0+1 до D. Під покращенням розуміється перехід до нової перестановки з меншим значенням цільової функції.

Розглянемо алгоритм покращення перестановки s в класі з номером q, яка стоїть на місці з номером i. Позначимо відповідно через $s^{\min}, s^{\max}$ перестановки в поточній популяції з мінімальним і максимальним значенням цільової функції.

Нехай визначено оператор кросоверу $cross(s_1, s_2)$, який кожним двом перестановкам s_1, s_2 ставить у відповідність третю перестановку $s_3 = cross(s_1, s_2)$ В класі з номером q обираються дві $s_q^{\min}$ і $s_q^{\max}$ перестановки з найменшим і найбільшим значенням цільової функції.

Крок 1. Розглянемо перестановку $s' = cross(s, s_q^{\min})$. Якщо $F(s') < F(s)$, то замінюємо перестановку s на s' і переходимо до наступної перестановки у класі q. В протилежному випадку переходимо на Крок 2.

Крок 2. Розглянемо перестановку $s' = cross(s_q^{\max}, s^{\min})$. Якщо $F(s') < F(s)$, то замінюємо перестановку s на s' і переходимо до наступної перестановки у класі q. В протилежному випадку переходимо на Крок 3.

Крок 3. Розглянемо перестановку $s' = cross(s^{\max}, s^{\min})$. Якщо $F(s') < F(s)$, то замінюємо перестановку s на s' і переходимо до наступної перестановки у класі q. В протилежному випадку перестановка s не змінюється.

Якщо всі перестановки, що набувають змін у класі вичерпано, то переходимо до наступного класу.

Якщо всі класи перебрано, то об'єднуємо змінені класи і будуємо наступну популяцію $P^{(k+1)} = \bigcup_{q=1}^{Q} P_q^{(k)}$ і упорядковуємо елементи популяції по зростанню значень цільової функції. Найкраща, з точки зору значення цільової функції, перестановка в популяції з номером N+1 обирається в якості субоптимального розв'язку задачі. Для покращення субоптимального розв'язку оптимізаційної задачі на перестановках можна використовувати алгоритм локального пошуку на перестановках. Вихідні параметри цього алгоритму – це радіус околиці пошуку та кількість випадкових точок для перевірки. Як правило радіус околиці пошуку береться рівним 1 або 2. Кількість точок для перевірки K в 1–околиці перестановки $s_0 \in S_n$ обирається в межах проміжку $[1, n(n-1)/2]$, або задається у відсотках від максимальної кількості $n(n-1)/2$. Алгоритм працює наступним чином: випадково обираються два різних цілих числа із проміжку $a, b \in [1, n]$ і виконується транспозиція в перестановці s_0, яка обмінює місцями елементи на позиціях a і b. Після цього розраховується значення цільової функції на зміненій перестановці. Ця процедура повторюється K разів. В якості чергового наближення обирається та перестановка серед змінених, для якої значення цільової функції найкраще (найменше в нашому випадку). Після цього вся процедура повторюється для нової початкової точки. Алгоритм закінчує роботу якщо серед змінених точок не існує точки, для якої значення цільової функції краще ніж для початкової точки. Остання знайдена точка береться як новий субоптимальний розв'язок задачі.

3.2 Побудова фрагментарних моделей для комбінованих задач CVRP, CVRPTW та їх програмна реалізація

Повернемось до задачі про доставку вантажу CVRP, умови якої було описано вище. Покажемо, що задача може розглядатися як задача оптимізації

на фрагментарній структурі. Множина X складається з точок маршруту. Причому кожна точка крім точки 0 входить у цю множину 1 раз, а точка 0 входить у множину X у кількості n+1 екземпляра (n – це кількість точок маршруту за виключенням точки 0). Тепер опишемо допустимий фрагмент як послідовність точок множини X. Кожен допустимий фрагмент можна уявити як конкатенацію послідовностей $E_1, E_2, ..., E_k$. Кожній з таких послідовностей $E_i = \{0, x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{ip}\}$ $i = 1, 2, ..., k$ відповідає маршрут, який починається в точці 0, проходить послідовно через всі точки послідовності. Причому довжина цього маршруту не перевищує довжини пробігу машини з відрахуванням відстані від останньої точки маршруту до точки 0. У послідовності можуть бути кілька точок 0, які відповідають поверненням в депо і перезавантаженням машини. Сума потреб у точках між двома черговими поверненнями в депо не повинна перевищувати вантажопідйомності машини. У конкатенації послідовностей $E_1, E_2, ..., E_k$ кожная точка $x \in X$, крім депо (точка 0), є рівно один раз. Легко переконатися в тому, що всі такі фрагменти утворюють фрагментарну структуру. Допустимому розв'язку задачі відповідає максимальний фрагмент, який містить усі точки множини X.

Нехай вартість оренди однієї машини дорівнює c, а вартість однієї одиниці довжини маршруту – v. Тоді значення цільової функції на допустимому фрагменті $E_1, E_2, ..., E_k$ визначається формулою $c + vL$, де L – довжина маршруту, що відповідає даному допустимому фрагменту.

Таким чином, задача доставки вантажу CVRP є оптимізаційною задачею на фрагментарній структурі і, отже, для пошуку субоптимальних рішень цієї задачі можуть бути використаний відомі алгоритми для задач оптимізації на фрагментарній структурі [51].

Розглянемо алгоритм побудови допустимого маршруту і відповідно розрахунку значення цільової функції для задачі CVRP на базі фрагментарної моделі задачі, що наведена вище.

Нехай задана перестановка $E = \{x_1, x_2, ..., x_p\}$ всіх елементів множини X.

Введемо позначення:

n – кількість точок доставки вантажу (без точки 0);

W – максимальна вантажопідйомність машини;

L – максимальна довжина пробігу машини;

W_E – накопичена вага на маршруті;

L_E – накопичена довжина пробігу;

k – номер чергової точки маршруту M;

Y_k – чергова точка маршруту;

$w(x)$ – потреба у вантажі у точці x;

M – множина точок маршруту;

F – значення цільової функції;

F_0 – накопичене значення цільової функції;

$r(x, y)$ – відстань між точками x і y.

Якщо серед точок $x_j \in E$ хоча б для однієї точки виконується хоча б одна з умов $r(0, x_j) > \frac{L}{2}$ або $w(x_j) > W$, то задача не має розв'язків у прийнятих припущеннях.

Якщо зазначені умови відсутні, допустимий маршрут знаходиться наступним алгоритмом.

Проглядаються послідовно елементи перестановки послідовності E і будується маршрут M транспортного засобу, що є упорядкованим списком точок.

На початковому етапі k=0 і послідовність точок маршруту M складається з однієї точки $Y_0 = 0$. При цьому F_0=0

Крок 1: вважаємо $L_E = 0; W_E = 0$ і починаємо перегляд послідовності E.

Крок 2: вибирається чергова точка x_j послідовності E та перевіряється виконання наступних умов:

а) точка співпадає з точкою 0 (депо).

б) накопичена довжина маршруту не перевищує величини L за

вирахуванням відстані від точки x_j до точки 0 і накопичена вага посилок не перевищує величини *W*:

$$L_E + r(Y_k, x_j) \le L - r(x_j, 0); \qquad (3.4)$$
$$W_E + w(x_j) \le W .$$

Якщо виконано умову а) і остання точка Y_k маршруту *M* не збігається з точкою 0, то значення функції F змінюється: $F_0 = F_0 + r(Y_k, 0)$. Точка $Y_{k+1} = x_j = 0$(депо) додається до множини точок маршруту *M* і вважаємо $k = k+1$. Точка x_j видаляється з послідовності E . Якщо послідовність E не порожня, то переходимо на Крок 1. Якщо послідовність E порожня, то алгоритм закінчує роботу.

Якщо виконано умову а) і остання точка маршруту M збігається з точкою 0, то видаляємо точку x_j з послідовності E . Якщо послідовність E не порожня, то переходимо на Крок 1. Якщо послідовність E порожня, то алгоритм закінчує роботу.

Якщо виконано умову б), то вважаємо

$$\begin{aligned} L_E &= L_E + r(Y_k, x_j) \\ W_E &= W_E + w(x_j) \quad , \\ F_0 &= F_0 + r(Y_k, x_j) \end{aligned} \qquad (3.5)$$

точка $Y_{k+1} = x_j$ додається до маршруту M і вважаємо $k=k+1$. Якщо послідовність E не порожня, то переходимо на Крок 2. Якщо послідовність E порожня, то вважаємо, $F = F + r(x_j, 0)$. Точка $Y_{k+1} = 0$(депо) додається до множини точок маршруту *M*, $k=k+1$ і алгоритм закінчує роботу.

Якщо умови а) і б) не виконані то вважаємо $F_0 = F_0 + r(Y_k, 0)$, $Y_{k+1} = 0$, $k=k+1$ і точка 0(депо) додається до множини точок маршруту *M*. Потім

переходимо на Крок 1.

Результатом роботи алгоритму буде допустимий маршрут *M*, який складається з одного або декількох циклів, що починаються та закінчуються у точці 0. Крім того отримано значення цільової функції $F = c + p \cdot F_0$ на маршруті *M*.

Вочевидь, що при відповідному виборі впорядкованої послідовності точок *E* будь–який допустимий маршрут може бути побудований цим алгоритмом.

Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимального маршруту завдання CVRP. Метод мурашиного алгоритму запропоновано для розв'язання задач маршрутизації транспорту з обмеженнями на вантажопідйомність (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP). В його основі лежить описана раніше поведінка мурах. Доцільність використовування цього методу для задачі CVRP пов'язна з його ефективністю, адже задача CVRP відноситься до задач фрагментарної структури і таким чином буде зведена до задачі безумовної оптимізації на множині перестановок.

Для перевірки якості використання мурашиного алгоритму було розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої реалізований запропонований метод (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Головне вікно програми

Вхідні дані для CVRP складаються з опису n місць розташування (склад або депо та набір з $n-1$ клієнтів), симетричної матриці D розміром $n \times n$, що визначає відстань (або деякі інші витрати) для проїзду меж кожною парою місць розташування, величин $\{q_i\}_{i=2,3,\ldots,n}$, що визначають попит на деякий ресурс з боку кожного з клієнтів та максимальну кількість Q ресурсу, що може перевозити транспортний засіб.

Вхідні файли, для тестування алгоритмів взяті з відомої бібліотеки тестових завдань для задачі CVRP – CVRPLIB . Формат вхідного файлу описується специфікацією формату TSPLIB95.

Для початку роботи у програмі необхідно натиснути кнопку «Старт» (рис.3.1), після чого відкривається робоче вікно програми (рис.3.2). У заголовку форми розташовані кнопки управління, У робочому вікні програми (рис. 3.2) вибираються файл з умовами задачі та файл розв'язку (або новий файл для опису розв'язку).

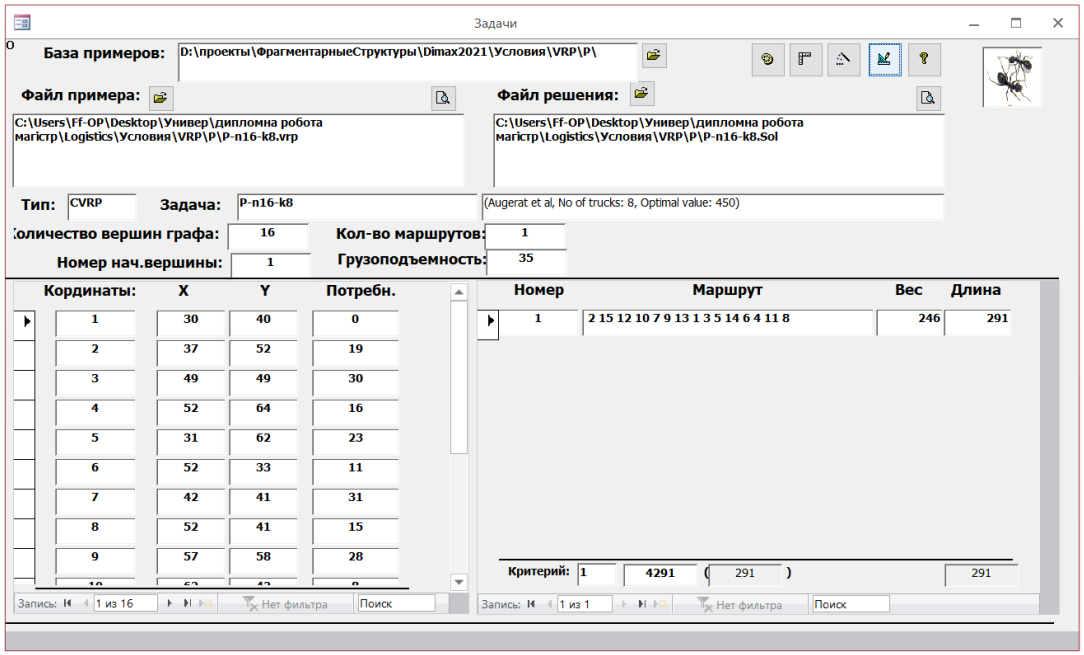


Рисунок 3.2 – Робоче вікно програми

У робочому вікні за допомогою кнопки  можна описати параметри мурашиного алгоритму (рис. 3.3).

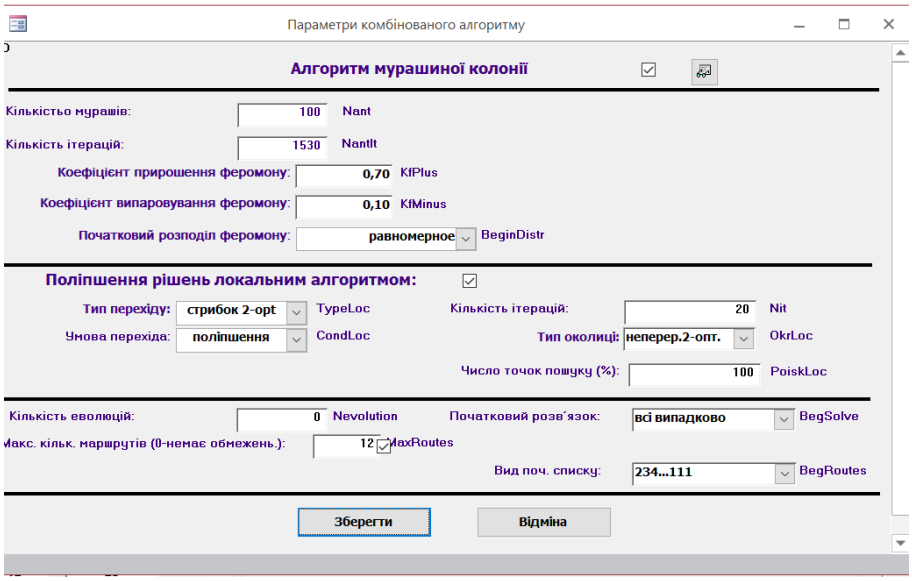


Рисунок 3.3 – Параметри мурашиного алгоритму

Розглянемо, як приклад файл з умовами задачі P–n16–k8.vrp. Це текстовий файл з наступною структурою:

NAME : P–n16–k8 <ім̧я файлу>

COMMENT : (Augerat et al, No of trucks: 8, Optimal value: 450) <примітка>

TYPE : CVRP <тип задачи>

DIMENSION : 16 < розмір – кількість точок>

EDGE_WEIGHT_TYPE : EUC_2D <від метрики>

CAPACITY : 35 < вантажопідйомність транспортного засобу >

NODE_COORD_SECTION <координати точок /нижче>

1 30 40 <номер координати точки>

2 37 52 <номер координати точки>

……

16 37 69 <номер координати точки>

DEMAND_SECTION <опис вимог клієнтів>

1 0 <номер розмір вимоги >

2 19 < номер розмір вимоги >

……

16 11 < номер розмір вимоги >

DEPOT_SECTION <номер точки – складу/депо >

Опис допустимого рішення для завдання CVRP складається з набору маршрутів, які починаються і закінчуються в депо, так що кожен клієнт відвідується рівно один раз по одному маршруту, а загальний попит з боку клієнтів, призначених для маршруту, не перевищує пропускну спроможність транспортного засобу Q.

Формат файлу–розв'язку також відповідає специфікації TSPLIB95. Як приклад розглянемо структуру файлу P–n16–k8.sol – розв'язок попередньої задачі:

Route #1: 3 1 <опис першого маршруту>

Route #2: 11 4 1 <опис другого маршруту>

…….

Route #8: 2 1 <опис восьмого маршруту>

Cost 450 <значення цільової функції >

Тестування алгоритму пошуку субоптимальних розв'язків задачі CVRP проводилося по двом напрямкам. По–перше, використовувалися бази тестових прикладів з бібліотеці CVRPLIB, яка вказувалась раніше.

Другий набір тестових задач було згенеровано за допомогою генератора тестових завдань.

Алгоритм генерації полягає в наступному. Задаються параметри генерації, а саме:

N – кількість точок на площині – точки, в які потрібно доставити вантаж;

L – довжина максимального пробігу машини;

W – вантажомісткість машини.

Генеруються за допомогою генератора випадкових чисел координати N+1 точки на площині. Перша із генерованих точок вважається точкою депо.

Генеруються N випадкових чисел з інтервалу (0,W]. Ці числа розглядаються як потреби у вантажі в відповідних точках площині. Відстань

між точками розраховується як евклідова відстань. Цільова функція – довжина циклічного маршруту, який відповідає допустимому розв'язку задачі.

Мурашиний алгоритм працював протягом обмеженого часу – 3 хвилини на кожному із завдань. Результати тестування наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати тестування

Назва задачі (ім'я файлу)	Кількість точок	Оптимальне значення цільової функції	Значення знайдене за допомогою мурашиного алгоритму	Помилка (у відсотках)
P–n22–k8	22	215	219	1,86%
P–n22–k2	22	216	228	5,55%
P–n19–k2	19	212	219	3,3%
P–n45–k5	45	510	539	5,6%
P–n50–k8	50	631	647	2,47%

Фрагментарна модель задачі про доставку вантажу з часовими вікнами CVRPTW і алгоритм побудови допустимого маршруту. Розглянемо наступну задачу про доставку вантажу CVRPTW з часовими вікнами. В найпростішому випадку вважається що існує один пункт депо, з якого починаються і закінчуються всі маршрути. Парк машин необмежений і кожна з цих машин має однакові параметри, а саме:

T – найбільший час роботи машини;

W – вантажомісткість.

Елементи матриці відстаней цієї задачі визначають час, необхідний для переміщення машини з однієї точки до іншої. Для кожного пункту доставки (окрім пункту 0(депо)) задається часове вікно у вигляді часового інтервалу $[t^{beg}, t^{end}]$, де t^{beg} – час, починаючи з якого пункт може прийняти вантаж, t^{beg} – час, після якого вантаж вже не може бути прийнятим. Час необхідний для вивантаження не враховується (=0).

Ця задача теж може розглядатися як задача оптимізації на фрагментарній структурі. Фрагментарна структура задачі відповідає фрагментарній структурі задачі CVRP, що розглядалася вище. Але умови приєднання фрагменту інші.

Якщо машина прибула в пункт вивантаження раніше початку часового вікна, то вона очікує до відкриття вікна. Після вичерпання максимального часу роботи, машина вже не приймає участі в доставці вантажів. Буде використовуватися інша машина. Цільова функція цієї задачі має вигляд $aK + v_1 T + v_0 T_0$. Тут a – вартість оренди однієї машини, K – кількість машин, що були в роботі, v_1 – вартість одного часу роботи машини, v_0 – вартість одного часу простою машини, T – загальний час роботи всіх машин, T_0 – загальний час простою всіх машин. Алгоритм побудови допустимого маршруту для задачі CVRPTW повністю аналогічний алгоритму пошуку субоптимального розв'язку задачі CVRP з урахуванням умов, які було наведено вище.

Алгоритм побудови допустимого маршруту для задачі CVRPTW.

Нехай задана перестановка $E = \{x_1, x_2, ..., x_p\}$ всіх елементів множини X.

Введемо позначення:

n – кількість точок доставки вантажу (без точки 0);

W – максимальна вантажопідйомність машини;

T – максимальний час пробігу однієї машини;

N_{auto} – кількість машин, що використовуються;

T_m – час пробігу однієї машини;

W_E – накопичена вага на маршруті;

T_E – накопичений час пробігу;

k – номер чергової точки маршруту M;

Y_k – чергова точка маршруту;

$w(x)$ – потреба у вантажі у точці x;

M – множина точок маршруту;

Ft – значення часу руху машини;

Rt – значення часу простою машини;

$t(x, y)$ – величина часу між точками *x* і *y*.

$[t_{x_i}^{beg}, t_{x_i}^{end}]$ – часове вікно для точки з номером *i*, *i*=1,2,….,*n*.

Відлік часу починається з нуля для кожної з машин.

Якщо серед точок $x_j \in E$ хоча б для однієї точки виконується хоча б одна з умов $t(0, x_j) + t(x_j, 0) > T - \begin{cases} t_{x_j}^{beg} - t(0, x_j), \text{ якщо } t_{x_j}^{beg} - t(0, x_j) > 0 \\ 0 \quad \text{в іншому випадку} \end{cases}$ або $w(x_j) > W$, то задача не має розв'язків у прийнятих припущеннях.

Якщо зазначені умови відсутні, допустимий маршрут знаходиться наступним алгоритмом.

Проглядаються послідовно елементи перестановки послідовності *E* і будується маршрут *M* транспортного засобу, що є упорядкованим списком точок.

На початковому етапі *k*=0 і послідовність точок маршруту *M* складається з однієї точки $Y_0 = 0$. Використовується одна машина: N_{auto} =1. При цьому *Ft*=0, *Rt*=0.

Крок 1: вважаємо $T_E = 0; W_E = 0$. Послідовність точок *E* починає проглядатися з початку.

Якщо

$t(0, x_j) + t(x_j, 0) > T - T_m - \begin{cases} t_{x_j}^{beg} - T_m - t(0, x_j), \text{ якщо } t_{x_j}^{beg} - T_m - t(0, x_j) > 0 \\ 0 \quad \text{в іншому випадку} \end{cases}$, для будь якої точки послідовності *E*, то додається нова машина $N_{auto} = N_{auto}+1$, яка починає пробіг T_m =0.

Крок 2: вибирається чергова точка x_j послідовності *E* та перевіряється виконання наступних умов:

а) точка співпадає з точкою 0 (депо) .

б) накопичена довжина маршруту не перевищує величини L за вирахуванням відстані від точки x_j до точки 0 і накопичена вага посилок не перевищує величини W:

$$T_E + t(Y_k, x_j) \le T - T_m - t(x_j, 0);$$
$$W_E + w(x_j) \le W$$
$$T_E + t(Y_k, x_j) \le t_{x_j}^{end}.$$

Якщо виконано умову а) і остання точка Y_k маршруту M не збігається з точкою 0, то значення функції Ft змінюється: $Ft = Ft + t(Y_k, 0)$. Точка $Y_{k+1} = x_j = 0$(депо) додається до множини точок маршруту M і вважаємо $k = k + 1$. Точка x_j видаляється з послідовності E. Якщо послідовність E не порожня, то переходимо на Крок 1. Якщо послідовність E порожня, то алгоритм закінчує роботу.

Якщо виконано умову а) і остання точка маршруту M збігається з точкою 0, то видаляємо точку x_j з послідовності E. Якщо послідовність E не порожня, то переходимо на Крок 1. Якщо послідовність E порожня, то алгоритм закінчує роботу.

Якщо виконано умову б), то вважаємо:

$$T_E = T_E + t(Y_k, x_j) + \begin{cases} t_{x_j}^{beg} - T_m - t(Y_k, x_j), \text{ якщо } t_{x_j}^{beg} - T_m - t(Y_k, x_j) > 0 \\ 0 \quad \text{в іншому випадку} \end{cases}$$
$$Rt = Rt + \begin{cases} t_{x_j}^{beg} - T_m - t(Y_k, x_j), \text{ якщо } t_{x_j}^{beg} - T_m - t(Y_k, x_j) > 0 \\ 0 \quad \text{в іншому випадку} \end{cases}$$
$$T_m = T_m + t(Y_k, x_j) + \begin{cases} t_{x_j}^{beg} - T_m - t(Y_k, x_j), \text{ якщо } t_{x_j}^{beg} - T_m - t(Y_k, x_j) > 0 \\ 0 \quad \text{в іншому випадку} \end{cases},$$
$$W_E = W_E + w(x_j)$$
$$Ft = Ft + t(Y_k, x_j)$$

точка $Y_{k+1} = x_j$ додається до маршруту M і вважаємо k=k+1. Якщо послідовність E не порожня, то переходимо на Крок 2. Якщо послідовність E порожня, то вважаємо, $Ft = Ft + t(x_j, 0)$. Точка $Y_{k+1} = 0$ (депо) додається до множини точок маршруту M, k=k+1 і алгоритм закінчує роботу.

Якщо умови а) і б) не виконані то вважаємо $Ft = Ft + t(Y_k, 0)$, $Y_{k+1} = 0$, k=k+1 і точка 0(депо) додається до множини точок маршруту M. Потім переходимо на Крок 1.

Результатом роботи алгоритму буде допустимий маршрут M, який складається з одного або декількох циклів, що починаються та закінчуються у точці 0. Крім того отримано значення цільової функції $F = aN_{auto} + v_1 Ft + v_0 Rt$ на маршруті M.

Вочевидь, що при відповідному виборі впорядкованої послідовності точок E будь–який допустимий маршрут може бути побудований цим алгоритмом.

Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимального маршруту завдання CVRPTW. Для розв'язання задач маршрутизації транспорту з часовими вікнами (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows, CVRPTW) запропоновано метод змішаних стрибаючих жаб. Як було зазначено раніше, основою цього методу є принципи взаємодії та оптимізації, характерні для поведінки групи жаб у процесі пошуку найкращих рішень. Використання цього методу для задачі CVRPTW є доцільним завдяки його високій ефективності, оскільки задача CVRPTW належить до класу задач фрагментарної структури та може бути зведена до задачі безумовної оптимізації на множині перестановок.

Для оцінки ефективності алгоритму змішаних стрибаючих жаб було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє реалізувати запропонований підхід і перевірити його якість на практиці. Робоче вікно програми представлне на рис. 3.4. На ньому зображено робочу область, де вже представлено розв'язок одного файлу з умовами.

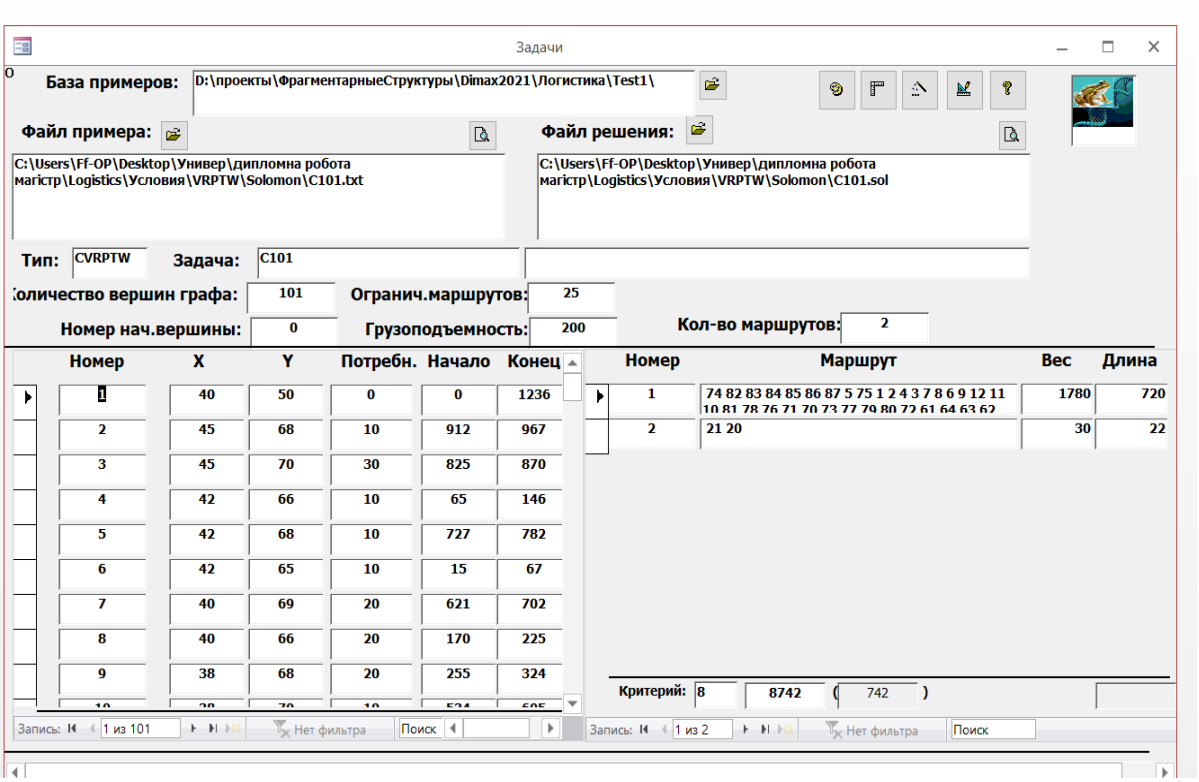


Рисунок 3.4 – Робоче вікно програми

Файл розв’язку, обчисленного програмою моє розширення .sol та вглядає так:

Route #1: 1 10 11 9 3 16 8 18 14 <опис першого маршруту>

Route #2: 12 15 2 13 <опис другого маршруту>

……..

Route #6: 20 19 7 6 22 21 23 25 24 26 27 31 62 36 28 29 34 35 33 30 32 61 60 59 58 42 43 44 45 46 47 49 48 52 53 40 57 41 56 55 54 51 50 39 38 37 63 64 65 66 67 68 73 72 75 74 87 89 69 82 83 84 86 85 76 77 81 78 79 80 88 90 71 70 99 98 97 95 96 94 92 100 91 93 <опис шостого маршруту>

Cost 1991 <значення цільової функції >

Останньою розглянемо узагальнену постановку комбінованої задачі транспортної логістики без виділення початкової точки (депо) – OCVRP.

В даній постановці вихідні дані задачі поділені на наступні групи:

1. Координати точок – пунктів доставки. Кожна точка (Node) визначається своїми координатами (longitude, latitude). Приклад загальної інформації, що стосується розміщення точок наведена в таблиці 3.2:

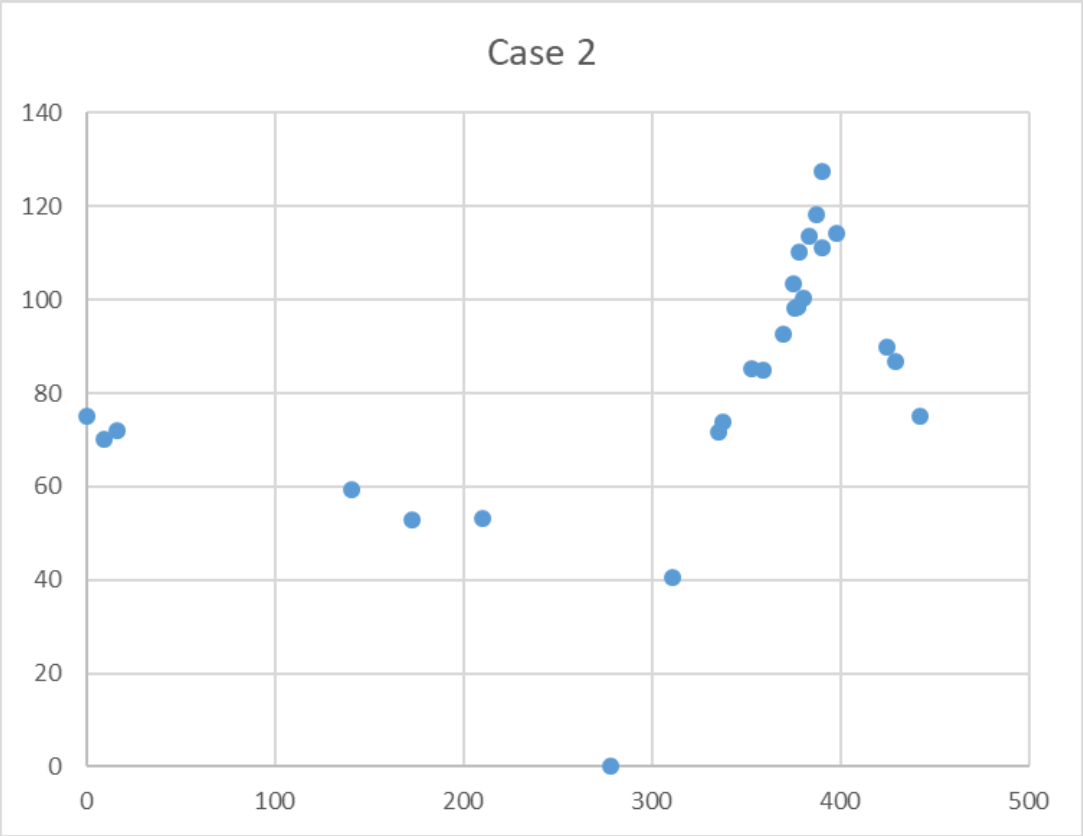


Рисунок 3.5 – Графік розташування пунктів доставки

Таблиця 3.2 – Розташування точок

node	longitude	latitude
N1	335,3314	71,7127
N2	310,7794	40,6556
N3	0	74,9983
N4	278,0034	0
N5	140,8824	59,332
N6	210,2387	53,2593
N7	173,1267	52,955
N8	16,05317	72,0142
N9	9,085973	70,2409
N10	390,3303	111,097

2. Інформація відносно вантажів (табл. 3.3). Вантаж (nb_csrgo) повинен бути переміщений з початкового пункту (departure_node) до кінцевого (arrival_node). Кожний вантаж має розмір (size) і вікно доставки (lb_time,ub_time)

Таблиця 3.3 – Інформація відносно вантажів

nb_cargo	size	lb_time	ub_time	departure_node	arrival_node
C1	1691	504	733	N22	N1
C2	962	40	661	N3	N21
C3	76	34	560	N3	N2
C4	146	28	716	N3	N10
C5	695	34	595	N3	N22
C6	207	28	733	N3	N6
C7	1732	57	610	N3	N25
C8	600	40	733	N3	N10
C9	771	28	459	N3	N10
C10	179	34	733	N3	N2
C11	88	34	595	N3	N22
C12	454	28	490	N3	N10

3. Інформація відносно транспортних засобів (табл. 3.4). Транспортний засіб (ТЗ) (nb_truck) має початкову (departure_node) і кінцеву (arrival_node) точки маршруту. Кожен транспорт має вантажомісткість (max_capacity) та час роботи (max_worktime).

Таблиця 3.4 – Інформація відносно ТЗ

nb_truck	departure_node	arrival_node	max_worktime	max_capacity
T1	N3	N17	780	10000
T2	N3	N19	780	10000
T3	N3	N10	780	10000
T4	N3	N15	780	10000
T5	N3	N14	780	10000
T6	N8	N16	780	10000
T7	N8	N18	780	10000
T8	N8	N1	780	10000
T9	N8	N2	780	10000

4. Задано наступні константи:

   node_fixed_time – фіксований час обслуговвування вантажа;

   loading_variation_coefficient – час завантаження/розвантаження однієї одиниці ваги вантажу;

truck_fixed_cost – вартість оренди одного транспортного засобу;
truck_running_cost – вартість однієї одиниці часу використання транспортного засобу;
cargo_reloading_cost – вартість перевалки одиниці ваги вантажу

Задача полягає в наступному: побудувати маршрути руху транспортних засобів з виконанням всіх заданих умов (час роботи, вантажомісткість, початкові та кінцеві пункти доставки вантажу, початкові та кінцеві пункти транспортних засобів), забезпечивши при цьому мінімальні витрати.

Ця задача, як і дві попередні теж може розглядатися, як задача на фрагментарній структурі. Однак побудова цієї фрагментарної структури значно складніше.

На першому етапі з кожним транспортним засобом $t_j \;\; j=1,2,...,m$ зв'яжемо перестановку $ts_j \in S_n \quad ts_j = (ts_{j1}, ts_{j2}, ..., ts_{jn})$. На базі цих перестановок за допомогою фрагментарного алгоритму будуть побудовані допустимі маршрути транспортних засобів. На наступному етапі обираються перестановка номерів маршрутів $ls \in S_m \quad ls = (ls_1, ls_2, ..., ls_m)$ і перестановка номерів вантажів $cs \in S_H \quad cs = (cs_1, cs_2, ..., cs_H)$. Далі будується накриваюче відображення

$$W = \underbrace{S_n \times S_n \times ... \times S_n}_{m \;\; раз} \times S_H \times S_m \to \textit{Множина допустимих розв'язків} \to R^1$$

Кожному елементу множини *W* зіставляється значення цільовою функції – сумарні витрати для реалізації відповідного розв'язку задачі.

Розглянемо алгоритм побудови допустимого розв'язку для задачі OCVRP.

Введемо позначення:

n – кількість точок відправки/доставки вантажу;

$\mathbf{N} = \{N_i\}, i = 1,2,...,n$ – вузли мережі (точки відправки/доставки);

$r_{ik} \quad i,k = 1,2,...,n$ – відстань(час) між вузлами *I* и *k* /runtime;

m – кількість транспортних засобів;

$\{T_j\}, j = 1,2,...,m$ – транспортні засоби;

W_j – вантажомісткість;

b_j^{beg} – початок маршруту;

b_j^{end} – кінець маршруту;

T_j – максимальний час маршруту;

H – кількість вантажів;

$\{C_\alpha\}, \alpha = 1,2,...,H$ – вантажі;

wnd_α^{beg} – початок вікна доставки;

wnd_α^{end} – кінець вікна доставки;

Nc_α^{beg} – пункт відпраклення;

Nc_α^{end} – пункт доставки;

Тепер розглянемо кожен етап алгоритму детально.

Алгоритм побудови допустимого маршруту для кожного j.

Проглядаються послідовно елементи перестановки ts_j:

– нехай k – довжина маршруту. На початковому етапі k=0, послідовність точок маршруту порожня.

– цикл по k. Проглядаються в обраному порядку всі точки в перестановці ts_j і будується маршрут L_j транспортного засобу T_j, який задається впорядкованим списком вузлів. Чергова вершина ts_{jp} додається до маршруту в одному із наступних випадків:

– $ts_{jp} = b_j^{beg}, \quad k = k+1, \quad t_{jk} = 0, \quad u_{jk} = ts_{jp}$;

– $ts_{jp} = b_j^{end}, \quad k = k+1, \quad t_{jk} = t_{jk-1} + r_{u_{jk}, ts_{jp}}, \quad u_{jk} = ts_{jp}$, де $u_{jk} \in \mathbf{N}$ – j–й пункт маршруту L_j;

– $t_{jk} + r_{u_{jk}, ts_{jp}} + r_{ts_{jp}, b_j^{end}} \le T_j, \quad k = k+1, \quad t_{jk} = t_{jk-`} + r_{u_{jk}, ts_{jp}}, \quad u_{jk} = ts_{jp}$;

– Якщо жодне з умов не виконується, переходимо до наступного вузла $k+1$.

В результаті роботи алгоритму для кожного транспортного засобу *j* буде побудовано допустимий за часом маршрут $L_j = \left(u_{jk}\right)_{k=\overline{1,l_j}}$, де l_j – довжина маршруту L_j, який буде корегуватися в майбутньому відповідно з набором вантажів.

Таким чином формується весь набір маршрутів $L_1, L_2, ..., L_m$

Попутно збудовано масив часів приходу у вузли маршрутів $\mathbf{T} = \left(t_{jk}\right)_{\substack{k=\overline{1,l_j} \\ j=\overline{1,m}}}$ і масив завантаження $\mathbf{W} = \left(w_{jk}\right)_{\substack{k=\overline{1,l_j} \\ j=\overline{1,m}}}$. Масив завантаження спочатку складається з одних нулей і змінюється по мірі додавання вантажів до маршруту.

Алгоритм заповнення вантажами транспортних засобів.

Будемо проглядати множину вантажів в заданому перестановкою *cs* порядку. Для кожного вантажу визначимо маршрут і транспортний засіб, який буде перевозити цей вантаж. Для кожного чергового вантажу C_{cs_α} будемо проглядати множину маршрутів в заданому перестановкою *ls* порядку. Для кожного маршруту L_{ls_j} будемо перевіряти умови допустимості даного вантажу для даного маршруту.

Умови допустимості:

– точка відправлення та точка доставки посилки належать маршруту (точка відправлення знаходиться перед точкою доставки): $\exists \mu, \nu$: $u_{j\mu} = Nc^{beg}_{cs_\alpha}, u_{j\nu} = Nc^{end}_{cs_\alpha} \in L_{ls_j}; \quad \mu < \nu;$

– виконуються обмеження часового вікна:

$t_{j\mu} \geq wnd^{beg}_{cs_\alpha}, t_{j\nu} + \lambda + \eta V_{cs_\alpha} \leq wnd^{end}_{cs_\alpha};$

де λ фиксований час обслуговування вантажу, η – час завантаження/розвантаження 1–ці вантажу

– виконуються обмеження вантажопідйомності транспортного засобу: $w_{jk} + V_{cs_\alpha} \le W_j$ в будь якому вузлі $k, \quad \mu \le k \le \nu$.

Якщо умови допустимості виконуються, то вантаж додається до списку вантажів даного маршруту і відбувається зміна завантаження і зсуваються час у відповідності з часом завантаження:

$$\forall k \quad \mu \le k \le \nu \quad w_{jk} \to w_{jk} = w_{jk} + V_{cs_\alpha}$$

$$\forall k \quad \mu < k \le \nu \quad t_{jk} = t_{jk} + \lambda + \eta V_{cs_\alpha};$$

$$\forall k > \nu \quad t_{jk} = t_{jk} + \lambda + 2\eta V_{cs_\alpha}$$

Далі переходимо до наступної посилки списку та починаємо процедуру заново. Якщо умови допустимості не виконуються, відбувається перехід до наступного маршруту по заданому порядку. Якщо всі маршрути вичерпані, то посилка залишається незатребуваною. Таким чином, результатом роботи алгоритму є списки посилок, приписаних до певного маршруту і список недоставлених посилок.

Очищення маршрутів.

Якщо в точках маршруту посилки не завантажувалися (і, відповідно, не вивантажувалися), цей маршрут видаляється зі списку маршрутів.

Якщо деякій точці маршруту не було операцій із вантажами (завантаження, вивантаження), то ця точка маршруту видаляється зі списку і відбувається перерахунок часів приходу в точку маршруту . Якщо при цьому відбувається порушення умов допустимості для деяких вантажів, приписаних до маршруту, то точка повертається на місце. На цьому етапі загальний час маршруту може скоротитися, але в такому випадку, як і раніше, допустиме рішення можна отримати за рахунок очікування, наприклад, відкриття тимчасового вікна.

Ідея відкритих маршрутів – маршрут залишається відкритим, якщо залишається час на обслуговування мінімального з вантажів, що залишилися

недоставленими. Після одного циклу цього алгоритму, можна здійснити спробу довантажити незатребувані вантажі у відкриті маршрути.

Обчислення цільової функції

Розраховується сума часів приходу на останню точку кожному маршруті. Якщо залишилися недоставлені вантажі, то цільової функції додається штраф у вигляді Mq, де q – число недоставлених вантажів.

Цільова функція – це постійні витрати на оренду машин та змінні, що залежать від витраченого часу, плюс штраф.

У наведеній моделі рішення визначається вибором набору перестановок. Базовий простір збігається з простором. $\underbrace{S_n \times S_n \times ... \times S_n}_{m\ раз} \times S_H \times S_m$. Кожному елемент базового простору відповідає єдиний розв’язок задачі. Можна показати, що будь–який допустимий розв'язок задачі може бути одержаний таким чином.

Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимального маршруту завдання OVRP. Розроблена програмна реалізація алгоритму пошуку субоптимального розв’язку для задачі OVRP, що наведений вище. Для цього використовуються дві метаевристики, а саме – еволюційно–фрагментарний алгоритм, та алгоритм перемішаних стрибаючих жаб. Головне і робоче вікна програми наведені на рис. 3.6 і рис. 3.7 відповідно.



Рисунок 3.6 – Головне вікно програми

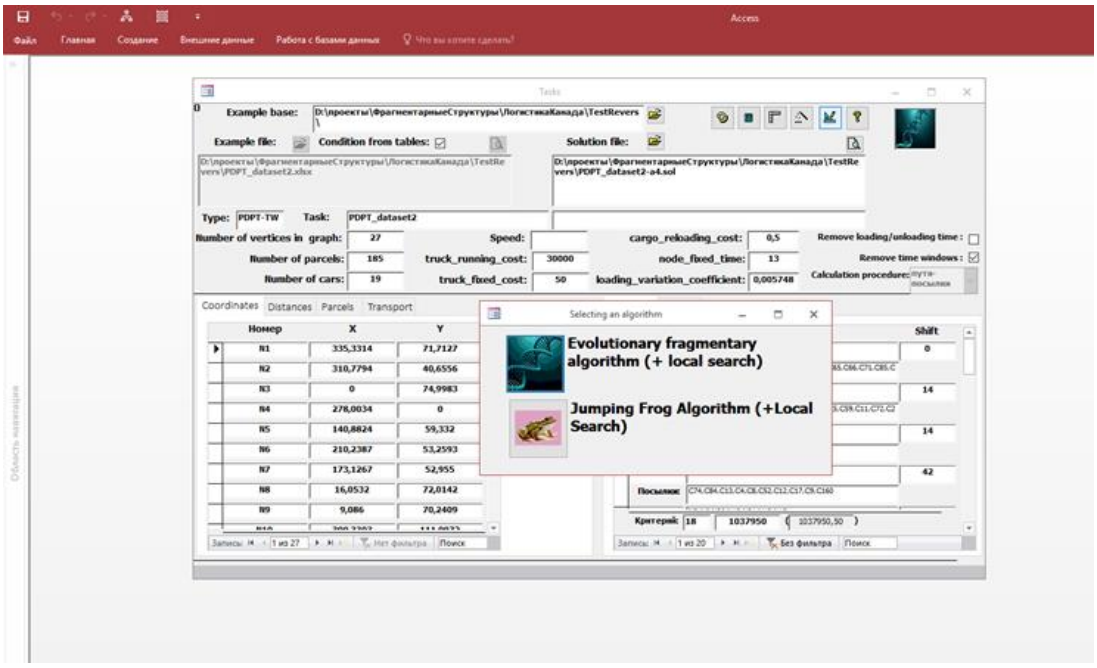


Рисунок 3.7 – Робоче вікно програми

На робочому вікні програми бачимо, що встановлено задані константи, у вигляді файлу з умовами використано факл PDPT_dataset2.xlsx. Файл із розв’язком задачі маршрутизації вантажів (PDPT_dataset2.sol) має детально структуровану форму, яка містить інформацію про маршрути транспортних засобів, відповідні вантажі, витрати, характеристики перевезення, а також допоміжні дані. Сама структура виглядає наступним чином:

Route #1:3,25,17

Cargo #1:7,133,42,54,14,19,15

Route #2:3,10,19

Cargo #2:4,8,9,84,13,12,74,17,160,172

Route #3:3,8,1,10

Cargo #3:65,16,39,150,149,52,127,24\8

…….

DisPlace #:66,24,0,28,0,4,10,90,96,24,32,16,72,40,8,0,78,24,18

Cost #:1030350,5

NoWind #:1

NoLunL #:0

DirPc #:1

filt_Truck#:T1:T2:T3:T4:T5:T6:T7:T8:T9:T10:T11:T12:T13:T14:T15:T16:T17:T18:T19:

filt_Cargo#:C1:C2:C3:C4:C5:C6:C7:C8:C9:C10:C11:C12:C13:C14:C15:C16:C17:C18:C19:C20:C21:C22:C23:C24:C25:C26:C27:C28:C29:C30:C31:C32:C33:C34:C35:C36:C37:C38:C39:C40:C41:C42:C43:C44:C45:C46:C47:C48:C49:C50:C51:C52:C53:C54:C55:C56:C57:C58:C59:C60:C61:C62:C63:C64:C65:C66:C67:C68:C69:C70:C71:C72:C73:C74:C75:C76:C77:C78:C79:C80:C81:C82:C83:C84:C85:C86:C87:C88:C89:C90:C91:C92:C93:C94:C95:C96:C97:C98:C99:C100:C101:C102:C103:C104:C105:C106:C107:C108:C109:C110:C111:C112:C113:C114:C115:C116:C117:C118:C119:C120:C121:C122:C123:C124:C125:C126:C127:C128:C129:C130:C131:C132:C133:C134:C135:C136:C137:C138:C139:C140:C141:C142:C143:C144:C145:C146:C147:C148:C149:C150:C151:C152:C153:C154:C155:C156:C157:C158:C159:C160:C161:C162:C163:C164:C165:C166:C167:C168:C169:C170:C171:C172:C173:C174:C175:C176:C177:C178:C179:C180:C181:C182:C183:C184:C185:

PerRoute#1:25;8;7;12;2;13;17;11;15;6;4;27;1;5;20;14;16;19;24;26;23;22;10;18;3;9;21;

……..

PerRoute#19:3;25;5;2;23;18;21;9;19;10;16;26;24;4;20;15;6;22;8;14;27;1;11;13;7;17;12;

PerCargo#:102;1;6;2;157;161;153;3;27;4;36;96;5;143;7;147;8;132;50;178;9;136;58;107;10;115;18;148;67;164;133;56;185;42;159;182;86;69;84;112;65;82;128;41;99;138;108;151;113;122;51;55;33;64;163;44;54;116;92;103;35;13;22;76;63;32;34;72;176;184;90;140;105;141;165;16;14;131;66;173;130;98;179;88;166;119;80;167;121;110;78;124;155;156;31;70;11;125;181;120;12;180;114;25;21;71;109;154;48;100;152;104;144;26;47;146;74;30;85;183;20;39;111;19;17;101;97;150;15;68;139;61;57;134;93;49;79;142;91;53;160;89;83;172;87;29;62;162;38;169;45;135;137;77;158;149;123;117;175;24;118;95;52;177;145;46;174;81;37;23;171;40;75;73;60;94;126;170;28;168;43;127;129;106;59;

PerDisPlace #:66;24;0;28;0;4;10;90;96;24;32;16;72;40;8;0;78;24;18;
PerTruck #:2;1;11;10;6;19;14;5;17;12;16;15;18;4;3;7;9;8;13;

Route #1 включає послідовність вузлів 3, 25, 17, а до Cargo #1, закріпленого за цим маршрутом, входять такі одиниці вантажу: 7, 133, 42, 54, 14, 19, 15. У файлі описано 19 маршрутів, кожен із яких має прив’язаний перелік вантажів. Крім того, присутні секції з додатковими параметрами.

Зокрема, параметр DisPlace # відображає витрати на транспортування за маршрутами: 66, 24, 0, 28, 0, 4, 10, 90, 96 тощо. Cost # позначає загальну вартість рішення, яка складає 1030350,5 одиниць. Інші параметри включають: NoWind # (1), NoLunL # (0), DirPc # (1), а також перелік ідентифікаторів транспортних засобів (filt_Truck #) та вантажів (filt_Cargo #), що брали участь у розв’язку задачі. Окрім цього, наведені детальні маршрути для кожного транспортного засобу у форматі PerRoute #, де зазначені послідовності вузлів для переміщення.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання поставлених завдань було досягнуто кілька ключових результатів, які узагальнюють реалізацію мети дослідження.

Проведено детальне вивчення основних понять і принципів транспортної логістики, що заклало основу для подальшого аналізу та моделювання комбінованих задач. Визначено ключові аспекти, що впливають на ефективність транспортних рішень, такі як оптимізація маршрутів, врахування обмежень і адаптація до специфічних умов. Розроблено чітке формулювання комбінованої задачі транспортної логістики, що враховує її складність і багатофакторний характер.

Проаналізовано відомі підходи та алгоритми для вирішення складних логістичних задач, включаючи класичні евристики та сучасні метаевристичні методи. Проведено оцінку їх переваг і недоліків з точки зору адаптивності до комбінованих задач. Побудовані математичні моделі на фрагментарній структурі для задач маршрутизації із врахуванням ємності транспортних засобів (CVRP), часових вікон (CVRPTW) та для узагальненої задачі (OVRP).

Моделі відображають обмеження задач та критерії оптимізації. На основі побудованих моделей застосовано ефективні алгоритми для пошуку оптимальних рішень. Використано адаптивні метаевристичні підходи, що дозволили врахувати специфічні умови кожної задачі, забезпечуючи при цьому можливість масштабування для великих наборів даних. Розроблені алгоритми було програмно реалізовано, використовуючи сучасні програмні засоби. Для цього створено окремі модулі, які дозволяють виконувати обчислення для кожної з задач: CVRP, CVRPTW та OVRP.

Розроблені алгоритми перевірено на базі існуючих текстових бібліотек та стандартних наборів даних. Результати продемонстрували високу ефективність створених алгоритмів, що дозволяє використовувати їх для реальних логістичних задач. Алгоритми забезпечили скорочення часу обчислень і підвищення точності рішень у порівнянні з класичними

підходами. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих методів і підходів до розв’язання задач комбінованої транспортної логістики. Розроблені моделі та алгоритми можуть бути використані для вирішення широкого спектру практичних задач, а програмна реалізація дозволяє інтегрувати рішення в реальні інформаційні системи. Це робить запропоновані підходи перспективними для подальших досліджень і практичного впровадження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Solomon M. M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 1987. Vol. 35, Iss. 2. Pp. 254–265. DOI: https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254.

2. Gendreau M., Potvin J.–Y. Tabu Search Techniques for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 1996. Vol. 30, Iss. 3. Pp. 219–229. DOI: https://doi.org/ 10.1007/BF02579017

3. Toth P., Vigo D. An Overview of Vehicle Routing Problems. *The Vehicle Routing Problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 2002. Pp. 1–26. DOI: https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.

4. Baldacci M., Mingozzi A., Roberti R. Recent Exact Algorithms for Solving the Vehicle Routing Problem Under Capacity and Time Window Constraints. *European Journal of Operational Research*, 2011. Vol. 218, Iss. 1. Pp. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.037.

5. Ivanov D., Dolgui A. Stress Testing Supply Chain Resilience: Design and Modelling Concepts. *International Journal of Production Research*, 2022. Vol. 60, Iss. 1. Pp. 65–80. DOI: 10.1007/s12063–021–00194–z

6. Archetti C., Speranza M. G. The Role of Green Vehicles in VRP: A Survey and Future Research Directions, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, Volume 123, pp. 1–19.

7. Марченко В. М., Шутюк В. В. Логістика : підручник. Київ : Вид. дім «Артек», 2018. 312 с.

8. Логістика : навч. посіб. / Безугла Л. С. та ін. Дніпро : Пороги, 2021. 252с.

9. Logistics Best Practices. *European Logistics Association (ELA)*. URL: https://www.elalog.eu/ (дата звернення 25.10.2024).

10. Rushton A., Croucher P., Baker P. The Handbook of Logistics and Distribution Management. *Kogan Page*, 2017. Pp. 78–125.

11. Логістика: Теорія та практика : навч. посіб. / Кислий В. М. та ін. Київ : Центр учбової літератури, 2010. 360 с.

12. Гримова Т. Використання SAP–систем для автоматизації бізнес–процесів Національного банку України. *Вісник Національного банку України.* 2010. № 8(174). С. 10–17.

13. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. *Pearson*. 2016. Pp. 55–65.

14. Заборська Н. К., Жуковська Л. Е. Основи логістики : навч. посіб. Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. 216с.

15. Декалюк О. В. Використання транспортних засобів в логістичній системі та основні проблеми транспортної логістики. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки.* 2011. № 1. С. 186–189.

16. Железняк, О. О., Рожок О. А. Інформаційне забезпечення та моделювання процесів транспортної логістики: (Інформація про транспортний процес як економічний ресурс, використання якого дозволяє оптимізувати перевезення). Актуальні проблеми економіки. 2005. № 1. С. 168–176.

17. Horbulin, V. P., Hulianytskyi, L. F. & Sergienko, I. V. Planning of Logistics Missions of the «UAV+Vehicle» Hybrid Systems. *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 59, No. 5, September, 2023. Pp. 733–742. URL: https://doi.org/10.1007/s10559–023–00609–8.

18. Перебийніс В. І. Транспортно–логістичні системи підприємств: формування та функціонування : монографія. Полтава : РВВ ПУСКУ, 2005. 207 с.

19. Гапчак Т. Г. Методи і моделі вирішення завдань транспортної логістики. URL: http://repository.vsau.org/getfile.php/4193.pdf (дата звернення 25.10.2024).

20. Toth P., Vigo D. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. Philadelphia : SIAM, 2014. 367 p.

21. Меньшикова О. В., Чмир О. Ю., Карабин О. О. Дослідження операцій : навч. посіб. Львів : ЛДУ БЖД, 2019. 196с.

22. Ghiani G., Laporte G., Musmanno R. Introduction to Logistics Systems Management. Chichester : Wiley, 2013. 379 p.

23. Офіційний сайт Maersk. URL: https://www.maersk.com/ (дата звернення 05.11.2024).

24. Laporte G., Osman I. H. Routing problems: A bibliography. *Annals of Operations Research*. 1995. Vol. 61, No. 1. Pp. 227–262.

25. Cordeau J.–F., Laporte G., Savelsbergh M. W., Vigo D. Vehicle Routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Vol. 14. Amsterdam : Elsevier, 2007. Pp. 367–428.

26. Горбась І. М., Федоренко М. А. Стан розвитку ринку логістичних послуг в Україні. *Пріоритети сучасної науки* (ч. І) : матеріали ІІІ Міжнар. наук.–практ. конф. (м. Київ, 19–20 лист. 2019 р.). Київ : МЦНіД, 2019. С. 6–13.

27. Скіцько В. І. Синергія цифрових технологій в логістичних системах. *Інвестиції: практика та досвід*. 2018. № 16. С. 18–24.

28. Лопатін А., Іщенко Н. Значення використання штучного інтелекту при виборі постачальника у сучасних логістичних системах. *Грааль науки*. 2021. № 9. С. 51–54.

29. Новаківський І. І., Рачинська Г. В. Застосування штучного інтелекту для управління інноваційними процесами у ланцюгах вартості. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2011. № 720. С. 303–309.

30. Кизим М. О., Матюшенко І. Ю., Шостак І. В. Перспективи розвитку інформаційно–комунікаційних технологій і штучного інтелекту в економіках країн світу та України : монографія. Харків : ВД «Інжек», 2012. 492 с.

31. Jackson I., Ivanov D., Dolgui A., Namdar J. Generative artificial intelligence in supply chain and operations management: a capability–based framework for analysis and implementation. *International Journal of Production Research.* 2024. Vol.62, Iss. 17, Pp. 6120–6145

32. Офіційний сайт Maersk. URL: https://www.maersk.com/ (дата звернення 05.11.2024).

33. Mehmet Akif Cifci, NP–hard Problems. URL: https://themanoftalent.medium.com/np–hard–problems–21852451488a (дата звернення 09.11.2024).

34. Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O. B. G., & Solomon, M. (2005). The Vehicle Routing Problem with Time Windows. In G. Desaulniers, J. Desrosiers, & M. M. Solomon (Eds.), Column Generation Springer. URL: http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/p.php?3641 (дата звернення 09.11.2024).

35. Маслова Н. О., Лисакова Н. В. Застосування комбінованого алгоритму при рішенні багатовимірних задач. *Наук. праці Донец. нац. тех. ун–ту. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2015. № 2. С. 51–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_inf_2015_2_10.

36. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Сєриков В. І. Метаевристичні алгоритми. Метафори–стратегії (оглядова стаття). *Вісн. Нац. тех. ун–ту «ХПІ». Серія : Машинознавство та САПР.* 2023. № 1. С. 3–18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpim_2023_1_3.

37. Radosavljević J. Metaheuristic Optimization in Power Engineering. New York : The Institution of Engineering and Technology, 2018. 536 p. DOI: 10.1049/PBPO131E.

38. Dorigo, M. and Blum, C. Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, 2005. No. 344. Pp. 243–278. URL: https://doi.org/10.1016/j.tcs.2005.05.020.

39. Colorni, M. Dorigo et V. Maniezzo. Distributed Optimization by Ant Colonies, actes de la première conférence européenne sur la vie artificielle. Paris, France, Elsevier Publishing, 1991. Pp. 134–142.

40. Устенко С. В., Бібко О. О. Використання методу мурашиної колонії для розв'язання оптимізаційних задач. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015, №3. С. 351–359.

41. Narimani M. R. A New Modified Shuffle Frog Leaping Algorithm for NonSmooth Economic Dispath. *World Applied Sciences Journal*. 2011. Vol.12 Pp. 803–814.

42. Козін І. В. Фрагментарні алгоритми у системах підтримки прийняття рішень. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. Дніпро, 2006. С. 131–137.

43. Козін І. В., Полюга С. І. Використання ЕВФ–алгоритмів для задачі прямокутного розкрою. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. Дніпропетровськ, 2009. С. 199–208.

44. Козін І. В., Полюга С. І. Фрагментарні структури та еволюційні алгоритми. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. Дніпропетровськ, 2008. С. 138–146.

45. Козін І. В., Полюга С. І. Еволюційно–фрагментарна модель упаковки пентаміно. *Дискретний аналіз і дослідження операцій*. 2014. Т. 21, № 6. С. 35–50.

46. Козін І. В. Фрагментарний алгоритм для задачі симетричного розміщення. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2005. № 1. С. 76–83.

47. Kozin I. V., Maksyshko N. K., Perepelitsa V. A. Fragmentary Structures in Discrete Optimization Problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. Nov. 2017, Vol. 53, Iss. 6, Pp. 931–936.

48. Дорошенко Л. П. Логістика. Теорія і практика. Київ : Центр учбової літератури, 2019. С. 102–110.

49. Наконечний С. І. Математичне програмування : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2003. 452 с.

50. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem. *Management Science*, 1959. Vol. 6, Iss. 1. Pp. 80–91, DOI: http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80.

51. Dorigo M. Optimization, Learning, and Natural Algorithms. PhD Thesis, Dipartimento di Elettronica, Politechnico Di Milano, Italy, 1992. 140 p.

Декларація академічної доброчесності

здобувача вищої освіти ЗНУ

Я___ *Доніна Катерина Олександрівна* , студентка_ *другого* _курсу,
форми навчання __*денна*_ _, факультету___ *економічного* ____,
спеціальності_ *051 Економіка*, адреса електронної пошти_ katya.donina@gmail.com,

- підтверджую, що написана мною кваліфікаційна робота на тему *«Застосування методів штучного інтелекту для вирішення комбінованої задачі доставки вантажів»* відповідає вимогам академічної доброчесності та не містить порушень, що визначені у ст. 42 Закону України «Про освіту», зі змістом яких ознайомлений/ознайомлена;
- заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи є ідентичною її друкованій версії;
- Згодна на перевірку моєї роботи на відповідність критеріям *академічної доброчесності у будь-який спосіб, у тому числі за допомогою* Інтернет-системи, а також на архівування роботи в базі даних цієї системи.

Дата_____ Підпис_____ ПІБ (студент) _____*Доніна К.О.*

Дата_____ Підпис_____ ПІБ (наук. керівник) *Козін І.В.*.