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

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДОСТАВЛЕННЯ ВАНТАЖІВ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНЬ

Виконав: студент ІІ курсу, групи 8.0513-ек
спеціальності 051 «Економіка»
освітньої програми «Економічна кібернетика»
Тихий Данило Сергійович
Керівник зав. каф. ек. кіб., д.е.н, професор
Максишко Н.К.
Рецензент проф. каф. ек. кіб., д.ф.-м.н.,професор
Козін І.В.

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»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«____»_____2024 року

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

Тихий Данило Сергійович

1. Тема роботи Моделювання процесу доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах обмежень

керівник роботи – Максишко Наталія Костянтинівна, д.е.н., професор

затверджені наказом ЗНУ від 29 грудня 2023 року № 2252-с

2. Строк подання студентом роботи: 02 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: постановка завдання, наукова література за темою роботи, офіційні статистичні дані

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: аналіз особливостей та інновацій в сфері транспортних перевезень (ТП) в Україні, огляд та систематизація постановок задач ТП з урахуванням видів обмежень, огляд математичних моделей та методів розв’язання задач ТП, опис існуючого ПО для розв’язання задач ТП, розробка моделі та алгоритму оптимізації процесу доставлення вантажів в умовах транспортних обмежень та його програмна реалізація

5. Перелік графічного матеріалу: рисунки, таблиці, презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	д.е.н. проф. Максишко Н.К.		
Розділ 2	д.е.н. проф. Максишко Н.К.		
Розділ 3	д.е.н. проф. Максишко Н.К.		

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 _____ Д. С. Тихий

Керівник роботи _____Н. К. Максишко

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____О.І. Макаренко

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить три розділи, 111 с., 18 рис., 1 табл., 54 джерела, три додатки.

Об’єкт дослідження – процес доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах транспортних обмежень.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи розв’язання задачі доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах транспортних обмежень.

Мета роботи – розробка моделі та методу оптимізації процесу доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах транспортних обмежень.

Методи дослідження – аналіз, узагальнення, систематизація, математичне моделювання, методи оптимізації, чисельні методи, імітаційне моделювання.

У роботі досліджено значення, особливості та тенденції розвитку транспортних перевезень в економіці України та світу, здійснено огляд та систематизацію змістовних постановок, моделей та методів розв’язання задач транспортних перевезень з урахуванням видів обмежень, проаналізовано існуюче програмне забезпечення для розв’язання задач транспортних перевезень. Доведено, що задача доставки товарів з одним або з фіксованим числом постачальників може бути зведена до безумовної задачі пошуку оптимальної перестановки на множині перестановок, удосконалено три відомі алгоритми (метаевристики) – випадкового локального пошуку, імітації відпалу, еволюційного алгоритму – для пошуку оптимальних перестановок та за їх використання побудовано метод пошуку наближеного розв’язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників. Як реалізацію розробленого методу в програмному середовищі Visual Basic for Application та СУБД MS ACCESS розроблено комп’ютерну програму «Метаеврістики. Задачі маршрутизації», яка може бути використана в існуючих системах підтримки прийняття рішень в галузі транспортних перевезень.

ТРАНСПОРТНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ТРАНСПОРТНА ЗАДАЧА З ОБМЕЖЕННЯМИ, ОПТИМІЗАЦІЯ, МЕТАЕВРИСТИКИ

SUMMARY

The master's thesis consists of three chapters, 111 pages, 18 figures, 1 table, 54 references, three appendices.

The object of research is the process of delivering goods by road under transport constraints.

The subject of research is mathematical models and methods for solving the problem of delivering goods by road under transport constraints.

The purpose of the thesis is to develop a model and algorithm for optimizing the process of delivering goods by road under transport constraints.

Research methods are analysis, generalization, systematization, mathematical modeling, optimization methods, numerical methods, simulation modeling.

The work examines the significance, features and trends in the development of transport in the economy of Ukraine and the world, reviews and systematizes substantive statements, models and methods for solving transport problems taking into account types of constraints, and analyzes existing software for solving transport problems. It is proved that the problem of delivering goods with one or a fixed number of suppliers can be reduced to an unconditional problem of finding an optimal permutation on a set of permutations, three well-known algorithms (metaeuristics) - random local search, simulated annealing, evolutionary algorithm - for finding optimal permutations have been improved and using them a method of finding an approximate solution to the transport problem with restrictions on the number of suppliers has been built. As an implementation of the developed method in the Visual Basic for Application software environment and the MS ACCESS database, a computer program "Metaheuristics. Routing Problems" has been developed, which can be used in existing decision support systems in the field of transport.

TRANSPORTATION, MODELING, TRANSPORT PROBLEM WITH CONSTRAINTS, OPTIMIZATION, METAHEURISTICS

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
РЕФЕРАТ
SUMMARY
ВСТУП.....7

РОЗДІЛ 1 ТРАНСПОРТНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ В УКРАЇНІ: РОЛЬ, ОСОБЛИВОСТІ, ІННОВАЦІЇ.....10

1.1 Роль та значення транспортних перевезень в економіці України та світі ...10

1.2 Аналіз статистики транспортних перевезень в Україні.....22

1.3 Характеристика видів, особливостей (умов та обмежень) та інновацій в сфері транспортних перевезень.....32

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....41

2.1 Огляд та систематизація постановок задач транспортних перевезень з урахуванням видів обмежень.....41

2.2 Огляд математичних моделей та методів розв'язання задач транспортних перевезень 49

2.3 Опис існуючого програмного забезпечення для розв'язання задач транспортних перевезень.....60

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОСТАВЛЕННЯ ВАНТАЖІВ В УМОВАХ ТРАНСПОРТНИХ ОБМЕЖЕНЬ..77

3.1 Змістовні постановки та математичні моделі транспортної задачі з урахуванням додаткових обмежень 77

3.2 Побудова модифікацій метаевристик на множині перестановок для розв'язання задачі доставки вантажів.....85

3.3 Розробка методу пошуку наближеного розв'язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників та його програмна реалізація.....92

ВИСНОВКИ.....97

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ 99

ДОДАТОК А Фрагмент тексту комп'ютерної програми «метаевристики. задачі маршрутизації».....105

ДОДАТОК Б Приклад структури файлів вхідних та вихідних даних задачі транспортних перевезень.....109

ДОДАТОК В приклад графічного зображення розв'язку задачі 111

ВСТУП

Транспортні перевезення – одна з найважливіших сфер матеріального виробництва, яка забезпечує виробничі і невиробничі потреби господарства та населення країни. Без транспортних перевезень був би неможливими територіальний поділ праці та забезпечення різноманітних потреб людини. Динаміка (збільшення або зменшення) обсягів транспортування вантажів свідчить про зростання чи спад економіки. У результаті збройної агресії транспортна галузь України зазнала суттєвого негативного впливу, зокрема, зменшення можливостей перевезення вантажів всіма наявними видами транспорту. З одного боку, це призводить до зміни існуючої структури транспортних перевезень, а, з іншого боку, посилює необхідність пошуку нових можливостей щодо удосконалення бізнес-процесів, пов’язаних з доставкою вантажів саме автомобільним транспортом. Зростання ролі транспортної логістики у досягненні оперативних та стратегічних цілей розвитку підприємств, армії та держави у цілому надзвичайно актуалізує дослідження саме цієї проблематики.

На сьогодні існує велика кількість наукових праць, присвячених розвитку та управлінню транспортною логістикою. Зокрема, значний внесок в цю тематику внесли українськи вчені Б. Анікін, В. Банько, А. Буковський, А. Лозовий, Г. Кукуруза, Л. Миротіна, М. Перебийніс, Б. Шабов та інші, а також зарубіжні науковці, зокрема, С. Річчі, А. Абдельбарі, С. Ельгаззар, та інші.

Математичні моделі задач транспортування та методи їх розв’язання розглядаються у роботах таких учених, як О. Зайченко, Ю. Зайченко, О. Ісакова, І. Козін, Н. Максишко, С. Наконечний, С. Савіна, О. Шевченко, М. Соломон, та інших.

Проте, незважаючи на велику кількість наукових публікацій у цьому напрямі, актуальність подальших досліджень зумовлена такими чинниками:

- на сьогодні існує велика різноманітність постановок задач доставлення вантажів автомобільним транспортом з урахуванням різного роду обмежень. Як правило, обчислювальна складність таких задач з додатковими обмеженнями не є поліноміальною, а зростає експоненційно від розмірності задачі;

- у зв’язку зі швидким зростанням розмірності задач логістики класичні точні методи не є ефективними, а тому не дають змоги за прийнятний для прийняття рішень час отримувати точні розв’язки;

- для подолання такої проблеми сучасною тенденцією розвитку оптимізаційних методів є створення наближених гібридних методів, які поєднують різні метаевристики для досягнення кращих результатів, особливо при розв'язанні задач транспортних перевезень.

Метою даної роботи є розробка моделі та методу оптимізації процесу доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах транспортних обмежень.

Для досягнення цієї мети поставлено та вирішено такі завдання:

– дослідити значення, особливості та тенденції розвитку транспортних перевезень в економіці України та світу;

– здійснити огляд та систематизацію постановок, моделей та методів розв’язання задач щодо транспортних перевезень з урахуванням видів обмежень;

– проаналізувати існуюче програмне забезпечення для розв’язання задач транспортних перевезень;

– довести зводимість математичної моделі задачі доставки товарів з одним або з фіксованим числом постачальників до безумовної задачі оптимізації на множині перестановок;

– розробити метод пошуку наближеного розв’язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників та здійснити його програмну реалізацію.

Об’єкт дослідження – процес доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах транспортних обмежень.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи розв’язання задачі доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах транспортних обмежень.

Наукова новизна результатів, що були отримані, полягає в зведенні математичної моделі задачі доставки товарів з одним або з фіксованим числом постачальників до безумовної задачі оптимізації на множині перестановок, удосконаленні трьох відомих алгоритмів – випадкового локального пошуку, імітації відпалу та еволюційного алгоритму – для пошуку оптимальних перестановок та побудові на їх базі методу пошуку наближеного розв’язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників. Практична значимість результатів полягає у програмній реалізації розробленого методу, яка може бути використана в існуючих системах підтримки прийняття рішень в галузі транспортних перевезень.

РОЗДІЛ 1
ТРАНСПОРТНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ В УКРАЇНІ: РОЛЬ, ОСОБЛИВОСТІ, ІННОВАЦІЇ

1.1 Роль та значення транспортних перевезень в економіці України та світі

У глобальному середовищі економічні можливості та успіх країни чи регіону пов’язані з мобільністю людей і товарів, з інтенсивним використанням інформаційно-комунікаційних технологій. Зв'язок між кількістю та якістю транспортної інфраструктури й рівнем економічного розвитку очевидний. Транспортний сектор відіграє важливу роль у сучасній економіці та суспільстві, а також має значний вплив на економіку країни чи регіону. Ефективний транспортний сектор є важливою складовою економічного розвитку.

Розвиток транспортної галузі країни є показником її економічного процвітання та успішності. Розвинена транспортна інфраструктура та пов’язані транспортні мережі позитивно корелюють з високим рівнем економічного розвитку. Коли транспортні системи ефективні, вони створюють економічні та соціальні можливості і вигоди, які призводять до позитивних наслідків, таких як кращий доступ до ринків, зайнятість та додаткові інвестиції. Коли транспортні системи недостатньо розвинені та ненадійні, вони можуть спричинити економічні витрати, такі як зменшення або втрата ринкових можливостей й зниження рівня й якості життя. Оцінка соціально-економічної ефективності транспортних проєктів має бути обов'язковою при прийнятті рішення щодо їх реалізації.

Транспорт є основою інфраструктури торгівлі та має значний вплив на конкурентоспроможність окремих галузей у країнах і регіонах. Недосконаліть транспортної системи негативно впливає на ефективність економіки в цілому. І

навпаки, прискорений розвиток транспортної інфраструктури та вдосконалення транспортно-логістичної системи може мати значний вплив на економічне зростання та на добробут населення. У середньому 13,2% бюджету кожного домогосподарства витрачається на транспортування товарів і послуг [1].

Транспортний сектор має вагомий внесок в економіку країни, забезпечуючи робочими місцями значну кількість людей, які займаються виробництвом транспортних засобів, контролем безпеки руху, управлінням транспортними засобами, що забезпечує безпечне та ефективне пересування людей і вантажів. Отже, транспортні мережі є центром ланцюжка поставок і основою економіки кожної країни. Транспортний сектор також сприяє розвитку міжнародної торгівлі особливо в умовах глобалізації, коли жодна країна не може повноцінно функціонувати ізольовано від інших країн. Без належної транспортної інфраструктури національна та міжнародна торгівля була б майже неможливою, а країнам, що розвиваються, було б значно важче інтегруватися у світову економіку.

Одним із ключових показників макроекономіки є економічне зростання, і ключову роль у цьому відіграють логістика та транспорт.

Щоб стимулювати економічне зростання, уряди повинні інвестувати в логістичну інфраструктуру, таку як дороги, залізниці, аеропорти та порти. Крім того, уряди потребують державних інвестицій, щоб дбати про довкілля та захищати права громадян на чисте повітря, гідні місця для життя та роботи, а також основні права людини та рівність. Уряди країн мають різне ставлення та пріоритети щодо того, скільки уваги вони приділяють цим питанням.

У змішаній економіці одним із способів вимірювання успішності впливу уряду на економіку є порівняння того, як він вплинув на розвиток логістики та транспорту.

Уряд хоче мати ефективну транспортну систему, оскільки вона дозволяє легше переміщати робочу силу від домогосподарств до фірм, товари та послуги

між фірмами та від фірм до домогосподарств. Крім того, це дозволяє робочій силі легко переміщатися між фірмами, а продуктам і послугам – від фірм до домашніх господарств. Низький рівень безробіття свідчить про те, що це відбувається.

Транспорт має важливе значення для ефективної роботи економіки, об'єднуючи ресурси, що використовуються у виробництві товарів і послуг, і доставляючи результати виробничого процесу клієнтам.

Потенційний економічний вплив удосконалення транспорту, ймовірно, буде не тільки значним і широкомасштабним, але й залежатиме від контексту. Наприклад, деякі сектори промисловості отримують вигоду від того, що вони є частиною кластера подібних або споріднених підприємств, маючи доступ до широкого та глибокого кола спеціалістів, інші сектори більше покладаються на підключення до міжнародних шлюзів для доступу до закордонних ринків, тоді як інші сектори функціонують ідеально. добре, де б вони не знаходилися.

Розвиток розуміння транспорту та пов'язаних з транспортом проблем і можливостей, з якими стикаються альтернативні сектори промисловості, є важливим першим кроком у розробці інвестиційної програми для підвищення продуктивності та конкурентоспроможності.

Інвестиції в транспортні мережі можуть вплинути на функціонування ринків праці, продуктивність бізнесу та конкурентоспроможність. Ці впливи взаємодіють з часом і можуть призвести до покращення економічного результату та географічного розподілу економічної діяльності. Вони також можуть впливати на довкілля, якість життя та загальну привабливість міст.

Поліпшення транспортного зв'язку завдяки збільшенню пропускної здатності мережі, скороченню часу в дорозі та витрат разом із підвищенням надійності мережі призводять до підвищення продуктивності завдяки тому, що іноді називають «економікою агломерації».

Якщо інвестиції в транспорт є «трансформаційними», вони також можуть впливати на розташування економічної діяльності, наприклад, дозволяючи

підприємствам переміщатися у більш продуктивні місця з кращим доступом до навичок, інших ресурсів і клієнтів. Інвестиції в транспортне сполучення можуть не тільки вплинути на обсяг економічної діяльності в регіоні, але також можуть вплинути на його розташування.

Інвестиції мають прямий вплив на ринкову ефективність на основі змін у продуктивності та економічному зростанні. Механізми забезпечення економічного впливу включають певні складові (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Транспортні інвестиції та економічне зростання

Джерело:[2]

Розглянемо більш детально зміну кожної складової економічного зростання під впливом інвестицій в транспортну інфраструктуру.

Переваги для користувачів транспорту. Економія часу завдяки скороченню часу в дорозі та покращенню якості та надійності транспортних мереж і послуг. Переваги для користувачів транспорту також можуть включати вигоди від покращення громадського простору та/або привабливість маршруту.

Переваги для інших осіб. У випадку інвестицій у громадський транспорт, вони включають зменшення негативних зовнішніх ефектів від автомобільних подорожей (тобто зменшення заторів і викидів CO_2) і опціональних цінностей (тобто значення, яке приділяється підтримці громадського активу чи послуги, навіть якщо існує невелика або зовсім відсутня ймовірність індивід фактично коли-небудь його використовував).

Ефект продуктивності. Вплив на продуктивність завдяки підвищенню ефективності в результаті покращеного підключення, що ефективно зближує підприємства, постачальників і працівників. Ці переваги є додатковими до переваг для користувачів і некористувачів на національному рівні.

Індукований інвестиційний вплив. Зміни в рівні або розміщенні інвестицій приватного сектора в результаті транспортних інвестицій. Ці переваги залежать від контексту та можуть бути частково витіснені з інших сфер.

Вплив на зайнятість. Вплив на ринок праці в результаті покращення зв’язку, що може дозволити людям перейти на більш продуктивну роботу або вийти на ринок праці в результаті скорочення та здешевлення поїздок на роботу і назад.

Регенераційні впливи. Місцеві економічні наслідки в результаті покращення місцевого іміджу та привабливості розвитку землекористування. У деяких випадках транспорт може виступати каталізатором місцевого економічного зростання. Ці переваги можуть бути не повністю додатковими на національному рівні та можуть виникати в результаті переміщення економічної діяльності з інших місць.

Окрім потенційного довгострокового впливу на продуктивність, будівництво значних інфраструктурних проєктів забезпечує вливання ресурсів у місцеву економіку під час будівництва, що може створити нові робочі місця. Хоча ці витрати можуть бути просто перенаправлені з іншої діяльності уряду, місцеві наслідки можуть бути як значними в короткостроковій перспективі, так і каталітичними в довгостроковій перспективі.

Розвиток транспортних систем відбувається в соціально-економічному контексті. Хоча політика та стратегії розвитку зосереджуються на фізичному капіталі, останніми роками спостерігається кращий баланс, включаючи питання людського капіталу. Незалежно від відносної важливості фізичного та людського капіталу, розвиток не може відбуватися без їх відповідної взаємодії, оскільки інфраструктура не може залишатися ефективною без належного управління, експлуатації та обслуговування. Водночас господарська діяльність не може відбуватися без інфраструктурної бази. Висока трансакційна та орієнтована на обслуговування функції багатьох транспортних видів діяльності підкреслюють складний зв’язок між потребами фізичного та людського капіталу. Наприклад, ефективна логістика спирається на інфраструктуру та управлінський досвід.

Через інтенсивне використання інфраструктур транспортний сектор є важливою складовою економіки та звичайним інструментом розвитку. Це тим більше стосується глобальної економіки, де економічні можливості все більше пов’язані з мобільністю людей і вантажів, включаючи інформаційні та комунікаційні технології. Зв'язок між кількістю та якістю транспортної інфраструктури та рівнем економічного розвитку очевидний. Щільність транспортної інфраструктури та мережі з високим зв’язком зазвичай асоціюються з високим рівнем розвитку. Коли транспортні системи є ефективними, вони забезпечують економічні та соціальні можливості та переваги, які призводять до позитивних мультиплікаційних ефектів, таких як

кращий доступ до ринків, зайнятість та додаткові інвестиції. Коли транспортні системи мають недостатню пропускну здатність або надійність, вони можуть мати економічні витрати, такі як зменшення або втрачені можливості та нижча якість життя.

На сукупному рівні ефективне транспортування зменшує витрати в багатьох секторах економіки, тоді як неефективне транспортування збільшує ці витрати. Крім того, вплив транспорту може мати передбачувані чи непередбачувані наслідки. Наприклад, затори часто є непередбачуваним наслідком надання користувачам безкоштовної або недорогої транспортної інфраструктури. Однак затори також вказують на зростаючу економіку, де пропускна спроможність та інфраструктура важко впоратися зі зростаючими потребами в мобільності. Транспорт несе важливе соціальне та екологічне навантаження та розвивається під впливом певних чинників (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Чинники розвитку транспортних систем

Масштаб	Природне середовище	Історичні чинники	Технологічні чинники	Політичні чинники	Економічні чинники
Місцеві	Гідрографія і геоморфологія	Культура і моделі розселення	Дороги	Зонування	Зайнятість і розподіл
Регіональні	Клімат	Урбаністичні системи	Залізниці та канали	Правила оподаткування	Конкуренція та компліментарність
Національні транснаціональні	Відстань	Держава/ Колоніалізм/ Імперіалізм	Коридори і морські шляхи	Умови торгівлі	Ринки
Глобальні	Океанічні маси	Глобалізація	Повітряний транспорт і комунікації	Багатосторонні угоди (СОТ)	Незалежність і порівняльні переваги

Джерело: [2]

Оцінка економічного значення транспорту вимагає класифікації видів впливу, що передбачає основні (фізичні характеристики транспортування), операційні та географічні аспекти.

Найбільш фундаментальний вплив транспорту пов’язаний із фізичною здатністю перевозити пасажирів і вантажі та пов’язаними з цим витратами на підтримку такої мобільності. Це передбачає встановлення маршрутів, що забезпечують нові або існуючі взаємодії між економічними суб’єктами.

Покращення показників часу, зокрема з точки зору надійності, а також зменшення втрат або пошкоджень. Це передбачає кращий рівень використання існуючих транспортних засобів, що приносить користь користувачам, оскільки пасажири та вантажі перевозяться швидше та з меншими затримками.

Доступ до ширшої ринкової бази, де можна покращити економію за рахунок масштабу виробництва, розподілу та споживання. Підвищення продуктивності за рахунок доступу до більшої та різноманітнішої бази вхідних ресурсів (сировини, деталей, енергії чи робочої сили) та ширших ринків для різноманітної продукції (проміжних і готових товарів). Інший важливий географічний вплив стосується впливу транспорту на розміщення діяльності та його впливу на вартість землі.

Таким чином, економічне значення транспортної галузі можна класифікувати за певними напрямами (рис.1.2)

Розглянемо більш детально економічне значення транспортної галузі у розрізі окремих напрямів.

Ємність (основний). Поліпшення інтермодальних (терміналів) і модальних можливостей шляхом інвестицій в інфраструктуру є основною стратегією сприяння економічним можливостям. Економіка має більший потенціал для перевезення пасажирів і вантажів, що забезпечує економію на масштабах і вищі рівні економічного виробництва.

Витрати (основний). Розвиток транспорту зазвичай асоціюється з нижчими одиничними транспортними витратами, що означає, що мобільність стає доступнішою. Крім того, додаткові обсяги можна транспортувати за аналогічною



Рисунок 1.2 – Економічне значення транспортної галузі залежно від напрямів

Джерело: [2]

ціною. Загалом частка транспортних витрат у кінцевій вартості товарів зменшується.

Час (операційний). Економічні вигоди від удосконалення часу є багатовимірними. По-перше, пасажири та вантажі швидше прибудуть до місця призначення, що зручно та має економічну цінність. По-друге, виграш часу призводить до кращого рівня управління запасами та кращого використання транспортних активів (інфраструктури, терміналів, транспортних засобів, контейнерів тощо).

Надійність (операційний). Зазвичай передбачає більшу ймовірність того, що пасажирська або вантажна одиниця досягне запланованого пункту призначення протягом запланованого часу та без втрат, псування чи пошкодження (для вантажу). Надійність дозволяє економічним системам краще синхронізувати свою діяльність, що, як і переваги в часі, дозволяє краще використовувати транспортні активи.

Доступність (географічний). Можливість отримати доступ до ширшої ринкової бази є загальною економічною вигодою для фірм. Такі ресурси, як сировина, деталі, енергія чи робоча сила, стають більш доступними для економіки. У той же час така продукція, як готова продукція, має доступ до ширшої ринкової бази. Кращий доступ до регіональних і глобальних ринків пасажирських перевезень також має економічні наслідки, пов’язані з комерційними операціями та туризмом.

Розташування (географічний). Важливий вплив транспорту стосується розміщення економічної діяльності. Конкретні об’єкти, розташовані поблизу модальної або інтермодальної інфраструктури, ймовірно, принесуть більшу цінність, ніж менш доступні об’єкти. Це часто називають ефектом кластеризації. Таким чином, через рішення щодо розміщення комерційної, житлової чи виробничої діяльності змінюється економічний ландшафт.

Інтерпретацію напрямів економічного значення транспортної інфраструктури представлено на рисунку 1.3.

Розглянувши економічну значення транспортної інфраструктури доцільно надати оцінку точки зору макро- та мікроекономіки. На макроекономічному рівні транспорт і пов’язана з ним мобільність пов’язані з рівнем виробництва, зайнятістю та доходом у національній економіці. У багатьох розвинутих економіках на транспорт припадає від 6% до 12% ВВП. Крім того, витрати на логістику можуть становити від 6% до 25% ВВП. Вартість усіх транспортних активів, включаючи інфраструктуру та транспортні засоби, легко може становити половину ВВП розвиненої економіки.

На мікроекономічному рівні (важливість транспорту для окремих частин економіки) транспорт пов’язаний із витратами виробника, споживача та розподілу. Таким чином, для кожного сектора економіки можна оцінити важливість конкретної транспортної діяльності та інфраструктури. Зазвичай вищий рівень доходу пов'язаний з більшою часткою транспортних витрат у

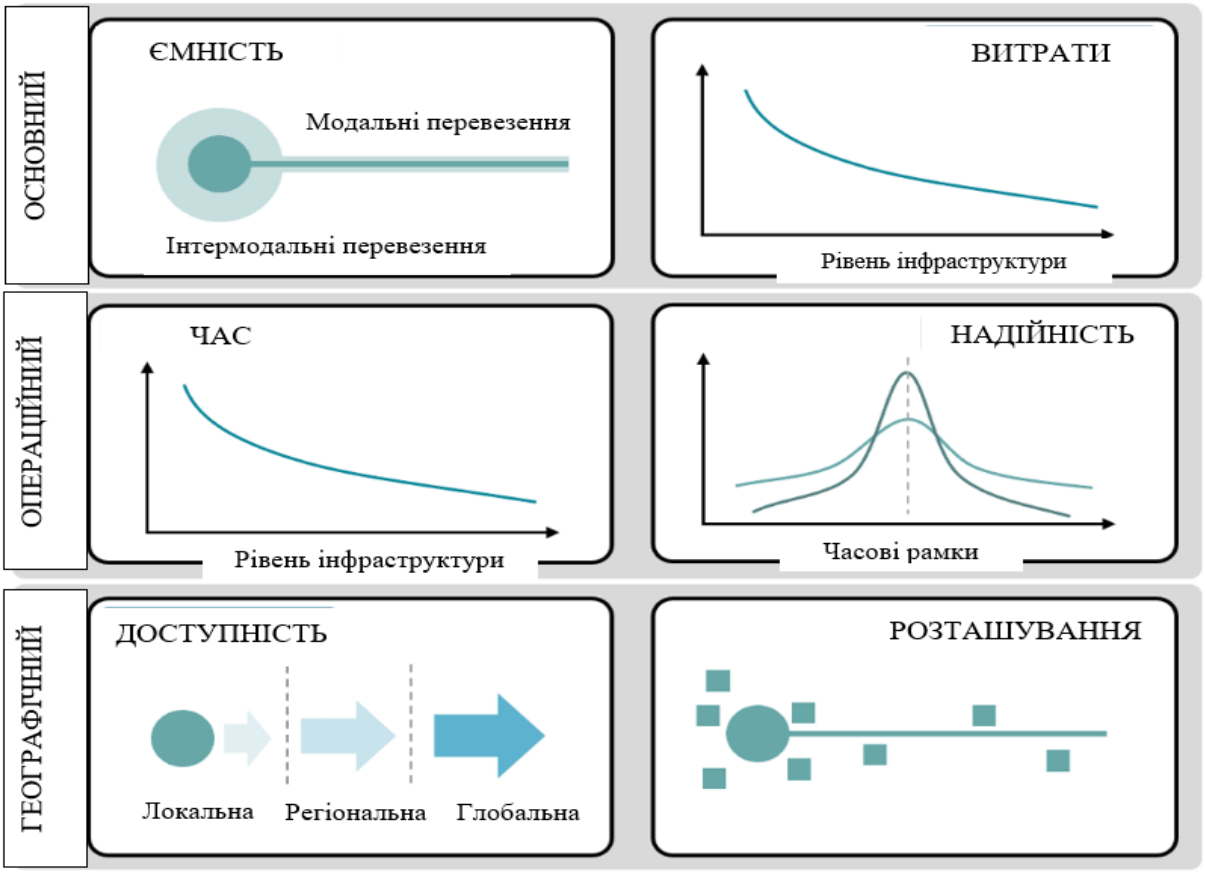


Рисунок 1.3 – Інтерпретація напрямів економічного значення транспортної інфраструктури

Джерело: [2]

витратах на споживання. На транспорт припадає від 10% до 15% витрат домогосподарств. Для порівняння, на його частку припадає близько 4% витрат на кожну одиницю продукції у виробництві, але ця цифра значно відрізняється залежно від підгалузі.

Додана вартість і ефект зайнятості від транспортних послуг зазвичай виходять за межі тих, які створює ця діяльність; непрямі ефекти помітні. Наприклад, транспортні компанії купують деякі свої ресурси (паливо, матеріали, технічне обслуговування) у місцевих постачальників. Ці ресурси створюють додаткову додану вартість і робочі місця в місцевій економіці. У свою чергу, постачальники купують товари та послуги в інших місцевих фірм. Існують

подальші раунди місцевих повторних витрат, які створюють додаткову додану вартість і робочі місця. Так само домогосподарства, які отримують дохід від зайнятості в транспортній діяльності, витрачають частину своїх доходів на місцеві товари та послуги. Ці покупки призводять до створення додаткових робочих місць і доданої вартості, при цьому частина доходу від цих додаткових робочих місць витрачається на місцеві товари та послуги, створюючи таким чином додаткові робочі місця та дохід для місцевих домогосподарств. У результаті цих послідовних раундів перевитрат у рамках місцевих закупівель загальний вплив на економіку перевищує початковий цикл виробництва, доходу та зайнятості, створених пасажирським і вантажним транспортом.

Таким чином, із загальної точки зору, економічні наслідки транспортування можуть бути прямими, непрямими та індукованими (табл. 1.2).

Таблиця 1.1 – Класифікація економічних впливів транспортної системи

Види впливу	Сутність
Прямий	Результатом є підвищення потужності та ефективності, коли транспорт забезпечує робочі місця, додану вартість, більші ринки, а також покращення часу та витрат. Загальний попит економіки зростає.
Непрямий	Результат покращеної доступності та економії масштабу. Непряма додана вартість і робочі місця є результатом місцевих закупівель діяльністю, яка безпосередньо залежить від транспортування. Транспортна діяльність несе відповідальність за широкий спектр непрямих ефектів доданої вартості та зайнятості через зв'язки транспорту з іншими економічними секторами (наприклад, фірмами, що постачають офісне обладнання, постачальниками обладнання та запчастин, послугами з технічного обслуговування та ремонту, страховими компаніями, консалтинговими та іншими видами діяльності послуги).
Індукований	Результат ефекту економічного мультиплікатора, коли ціни на товари, товари чи послуги падають, а їх різноманітність збільшується. Наприклад, сталеливарна промисловість потребує рентабельного імпорту залізної руди та вугілля для доменних печей і експорту готової продукції, такої як сталеві стріли та рулони. Виробники, торгові точки та розподільчі центри, що обробляють імпортні контейнерні вантажі, покладаються на ефективну роботу транспорту та морських портів.

Джерело: [3]

Транспорт об’єднує фактори виробництва в складну мережу взаємовідносин між виробниками та споживачами. Зазвичай результатом є більш ефективний поділ виробництва шляхом використання порівняльних географічних переваг, а також засобів для розвитку економії за рахунок масштабу та обсягу.

Таким чином продуктивність простору, капіталу та праці підвищується разом із ефективністю розподілу та особистою мобільністю. Економічне зростання все більше пов'язане з розвитком транспорту, а саме інфраструктури, а також з управлінськими знаннями, які є вирішальними для логістики. Таким чином, хоча транспорт є інфраструктурно інтенсивною діяльністю, жорсткі активи повинні підтримуватися набором м’яких активів, а саме робочою силою, управлінням та інформаційними системами. Рішення щодо використання та експлуатації транспортних систем повинні прийматися для оптимізації вигод і мінімізації витрат і незручностей.

1.2 Аналіз статистики транспортних перевезень в Україні

До повномасштабного російського вторгнення на територію України ринок вантажних перевезень характеризувався стабільним функціонуванням, генеруючи суттєву частку ВВП. Значення показників вантажних перевезень станом на 2021 рік, наявні у дослідженнях [3-5] та даних Державної служби статистики України [6], свідчать про високий рівень розвитку транспортної галузі:

– сукупний обсяг вантажних перевезень усіма видами транспорту становив 619,9 млн т;

– загальний вантажообіг – 289635,4 млн т – км;

– середня відстань перевезень наземним транспортом – майже 400 км;

– загальний експорт транспортних послуг – 4657,5 млн дол США;

– загальний імпорт транспортних послуг – 1777,6 млн дол США;

– кількість перетинів державного кордону України вантажним транспортом – понад 2,6 млн;

– загальна довжина шляхів сполучення – 181,9 тис км.

Динаміка обсягів вантажних перевезень за 2015 – 2021 роки у розрізі окремих сегментів транспорту представлена на рис. 1.4.

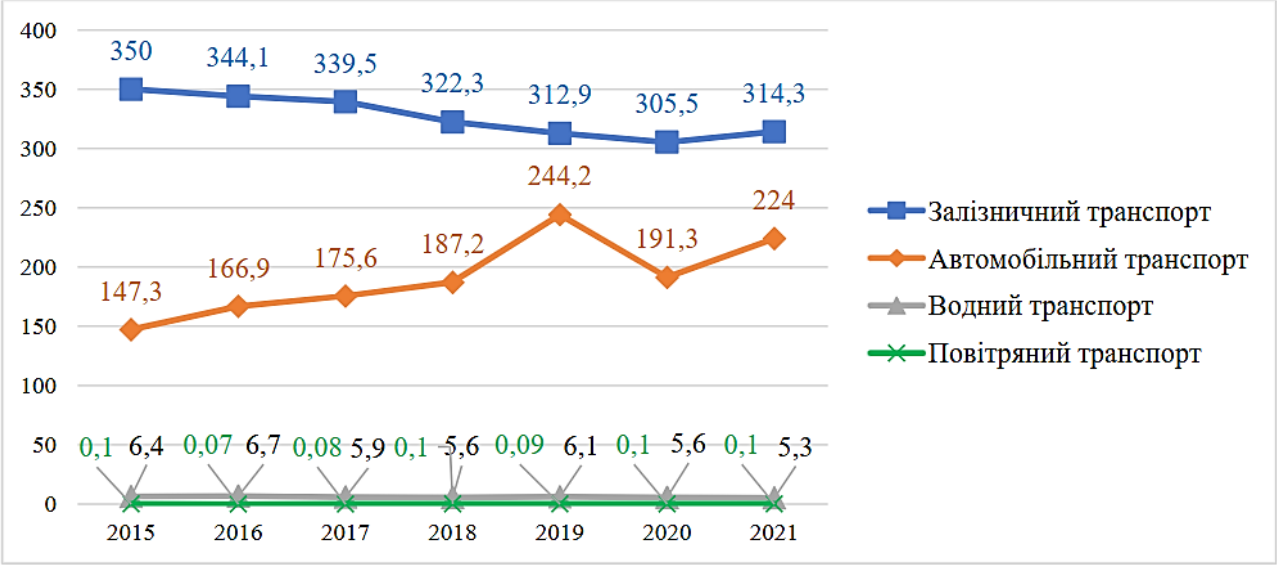


Рисунок 1.4 – Динаміка обсягів вантажних перевезень в Україні за 2015–2021 роки, млн т

Джерело: [7]

Український ринок вантажних перевезень до повномасштабного російського вторгнення характеризувався низкою позитивних та негативних тенденцій. Серед позитивних можна виокремити такі тенденції:

– позитивна динаміка обсягів вантажних перевезень за 2015–2021 роки (значне зниження обсягів відбулося лише в 2020 році, що було спричинено карантинними обмеженнями внаслідок пандемії COVID-19);

– поступове зростання відносної частки автомобільного транспорту серед сегментів ринку вантажних перевезень, що загалом наближає структуру української галузі транспорту та логістики до європейської [7];

– впровадження представниками галузі сучасних цифрових технологій та вдосконалених принципів логістичного управління [8].

Водночас для галузі були характерні також певні негативні особливості, серед яких: недостатній рівень розвитку логістичної інфраструктури в Україні, неефективна робота пунктів пропуску на кордоні, обтяжлива система дозволів для перевезення вантажу в європейські країни тощо [9-10]. Проте, незважаючи на зазначені проблемні питання, галузь мала значний потенціал для подальшого розвитку.

Після початку повномасштабного російського вторгнення на територію України стан ринку вантажних перевезень виявився майже катастрофічним. Із чотирьох традиційних сегментів ринку (авіаційного, морського, залізничного та автомобільного) діяльність перших двох була фактично призупинена, адже повітряний простір та більшість морських портів України були закриті відразу після запровадження режиму воєнного стану. Відповідно, саме на залізничний та автомобільний транспорт було покладено завдання компенсувати втрачені ресурси галузі. Проте функціонування зазначених сегментів в умовах воєнного стану було пов’язано з низкою негативних чинників, серед них:

– тимчасова окупація певних регіонів України та, як наслідок, недоступність окремих маршрутів перевезень;

– нестача необхідних факторів виробництва: людського капіталу (частина працівників транспортної та логістичної галузей пішли на фронт опинилися на непідконтрольних територіях/загинули); капітальних ресурсів (певне транспортне обладнання зазнало руйнувань); матеріально-технічних ресурсів (стратегічно важливі для ефективної обороноздатності країни ресурси були спрямовані на першочергові потреби фронту);

– значне падіння оплачуваного попиту на послуги компаній вантажних перевезень (наприклад, споживчий сегмент вантажних перевезень перші півтора місяці повномасштабної війни майже взагалі не функціонував [11]; крім того, були втрачені такі важливі замовники послуг, як ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь» та ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча»);

– зміна характеру діяльності: від комерційного до соціального. Зокрема, роль комерційних операцій стала другорядною у порівнянні з актуальними потребами виконання компаніями певних соціальних функцій (наприклад, перевезення «Укрзалізницею» мільйонів громадян України, перевезення гуманітарного вантажу автомобільними перевізниками тощо) [12-13].

Наведені вище обставини зумовили закономірне зменшення обсягів перевезень в українській галузі транспорту та логістики. За аналітичними даними щодо тенденцій розвитку ринку вантажних перевезень у 2022 році [7], війна призвела до зниження обсягів автомобільних перевезень на 22%, залізничних – на 48%, морських – на 85%, авіаційних – майже на 100% (рис. 1.5).

При цьому вагому роль у вантажних перевезеннях відіграли саме міжнародні перевезення, адже в умовах обмеження експорту основних статей аграрної промисловості України (таких, як пшениця, кукурудза, ячмінь тощо) виникла гостра потреба у забезпеченні зовнішньоторговельного обороту, що є необхідним для притоку іноземної валюти до України і певної стабілізації економічного стану. Завдяки зусиллям державних структур та приватного бізнес-сектору обсяг вантажообігу в міжнародному сполученні в 2022 році вдалося підтримати на рівні 91,2 млн т, серед яких 59,5% (54,2 млн т) забезпечив наземний транспорт, а 38,6% (35,2 млн т) – морський [14]. Суттєве зниження обсягів міжнародних вантажних перевезень наземним транспортом відбулося лише в березні 2022 року (-33,9% у порівнянні з попереднім місяцем). Але вже у квітні, після звільнення багатьох українських територій, відповідний показник зріс на

40% і надалі протягом 2022 року залишався порівняно стабільним, хоча довоєнного рівня (6,4 млн т за січень 2022) так і не досяг.

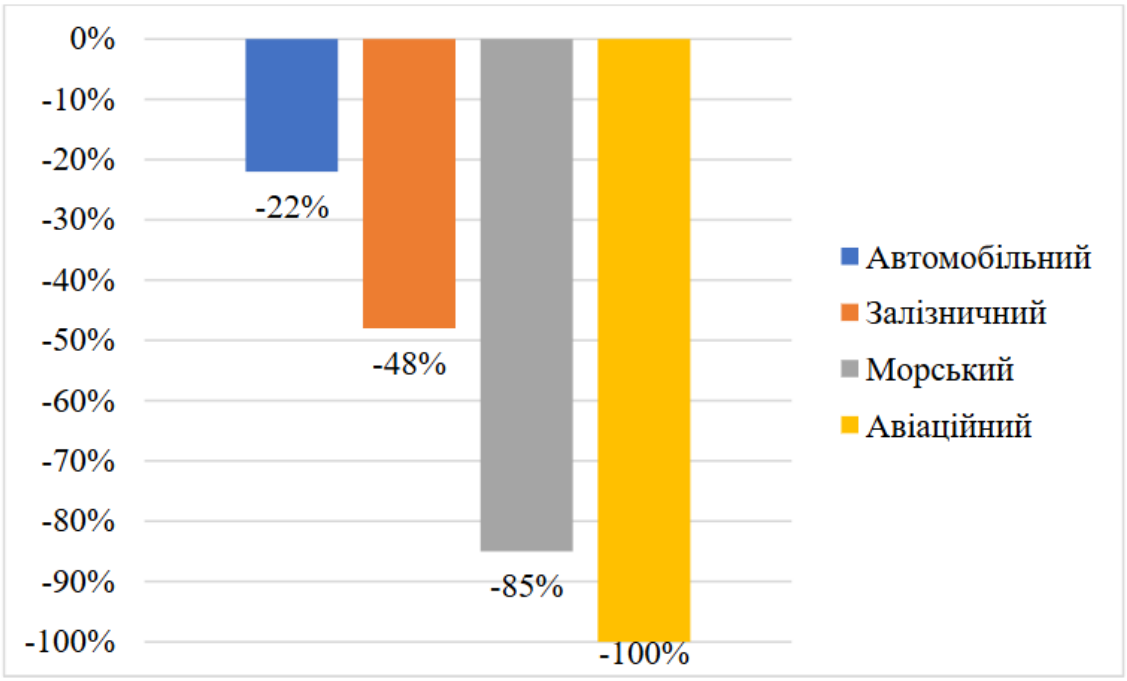


Рисунок 1.5 – Зниження обсягів вантажних перевезень на території України після початку повномасштабного російського вторгнення, %

Джерело: [7]

Дещо іншими були тенденції розвитку морського транспорту в 2022 році. Показник обсягу міжнародних вантажних перевезень морським транспортом досяг свого історичного мінімуму у квітні 2022 року та становив 0,9 млн. т (його значення було в 15,5 разів менше від довоєнного рівня) [7], до вересня 2022 року залишався на рівні, набагато нижчому від значень відповідного показника вантажних перевезень наземним транспортом, у той час як до війни морський транспорт суттєво випереджав наземний за даними показниками. З серпня 2022 року ситуація почала кардинально змінюватися у позитивний бік після підписання зернової угоди.

Основними статтями експорту залізничним транспортом у 2022 році були залізна та марганцева руда (46%), зернові вантажі (28%), чорні метали (10%) тощо; автотранспортом – їжа та тютюн (14%), меблі (11%), деревина (11%), основні матеріали (8%), хімічна продукція (7%), машини та устаткування (6%), будівельні матеріали (6%), кокс та паливо (5%), агропродукція (5%) тощо [15].

Головне досягнення для залізничного транспорту в 2023 р. – це стабілізація фінансового стану та створення бази для зростання вантажопотоків (рис. 1.6-рис. 1.9).

Аналіз фінансових показників результатів діяльності «Укрзалізниці» свідчить про позитивну динаміку доходів. Якщо на початку війни в 2022 р. доходи зменшилися порівняно із 2021 р. і складали 63 млрд грн, то вже в 2023 р. їх обсяг складав 73 млрд грн. Крім того, а у 2024 р. прогнозується отримати 2024 р. млрд грн.



Рисунок 1.6 – Фінансові показники результатів діяльності «Укрзалізниці»

Джерело: [16]

Спостерігається зростанні капітальних інвестицій (рис. 1.7). Найбільшу кількість коштів спрямовано на ремонт вантажних вагонів, їх побудову, а також ремонт пасажирських вагонів.



Рисунок 1.7 – Капітальні інвестиції «Укрзалізниці»

Джерело: [16]

Щодо вантажних перевезень за період 2021-2024 рр. (рис. 1.8) необхідно зазначити, що найбільший їх обсяг був у 2021 р. – 314 млн т. У 2022-2023 рр. спостерігається зменшення і вже в 2024 р. заплановано досягти рівня 2022 р., навіть трохи перевищити його.



Рисунок 1.8 – Вантажні перевезення «Укрзалізниці»

Джерело: [16]

Вантажні перевезення «Укрзалізниці» від початку війни за місяцями у період 2022-2024 рр. (рис. 1.9) демонструють постійне їх зростання, незважаючи на складні умови та невизначеність.



Рисунок 1.9 – Вантажні перевезення «Укрзалізниці» від початку війни за місяцями (млн т)

Джерело: [16]

Варто відзначити зусилля українського уряду, спрямовані на створення належних умов для міжнародних вантажних перевезень. Так, протягом 2022 року було підписано дві надзвичайно важливі угоди, вплив яких на міжнародні вантажні перевезення виявився досить суттєвим. Однією з цих угод є угода про лібералізацію вантажних перевезень з ЄС (так званий. «транспортний безвіз»), яка позбавила українських автоперевізників необхідності отримувати додаткові дозволи на двосторонні і транзитні перевезення через країни ЄС, таким чином суттєво пришвидшуючи зовнішньоторговельні операції України. Ефективність дії транспортного безвізу підтверджується зростанням кількості перетинів кордону з ЄС вантажним автомобільним транспортом, які зросли на 43% у порівнянні з відповідним періодом 2021 року [17].

Другою з вищезгаданих угод є зернова угода, відповідно до якої було розблоковано частину морських портів України задля екс-порту зерна та деякої іншої аграрної продукції. Динаміка обсягів міжнародних вантажних перевезень через морські порти після підписання зернової угоди (рис. 1.10) (зокрема, зростання відповідного показника з липня по вересень 2022 року понад у 3 рази) підтверджує результативність підписаної угоди.

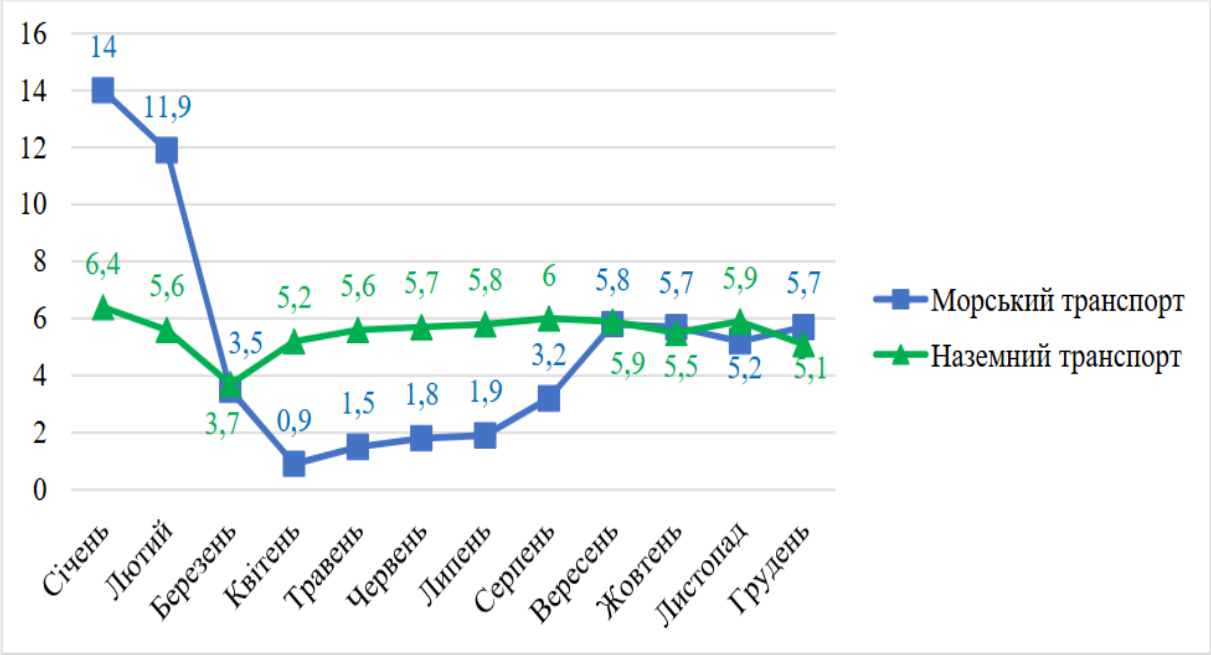


Рисунок 1.10 – Динаміка обсягів міжнародних вантажних перевезень України у 2022 році, млн т

Джерело: [7]

Станом на кінець липня 2023 року зернова угода призупинена, оскільки рф оголосила про свій вихід з цієї ініціативи [18]. Водночас варто зауважити, що наразі триває пошук інших альтернатив транспортування української агропродукції морським транспортом. Протягом 2022 року було реалізовано інші важливі ініціативи, спрямовані на підтримку міжнародних вантажних перевезень. Так, було запущено пілотний проєкт «єЧерга», діяльність якого спрямована на позбавлення українських водіїв необхідності знаходитися в чергах на кордоні протягом декількох діб, а також на подолання корупційних схем, що виникли на основі тіньової роздачі дозволів на вантажні перевезення до ЄС. Державними структурами (зокрема, Державною прикордонною службою України та Державною митною службою України) максимально скоординовано зусилля задля підвищення добової пропускної здатності наявних пунктів

пропуску. Відкриті додаткові пропускні пункти, що дозволило дещо розвантажити наявні пункти пропуску.

Водночас певні проблеми міжнародних вантажних перевезень все ж залишаються невирішеними. Так, незважаючи на численні спроби оптимізувати черги міжнародного вантажного транспорту (насамперед автомобільного транспорту), середній місячний кілометраж серед українських перевізників оцінюється лише на рівні 4 тис. км. (для порівняння – середній місячний кілометраж польських міжнародних вантажних перевізників сягає 15–17 тис. км). Крім того, спроби відкриття нових пропускних пунктів залежать не лише від української сторони, тому інколи стикаються з певним зовнішнім супротивом. Наявні також деякі інші проблемні аспекти, пов’язані з недосконалою інфраструктурою митниць, великими чергами на кордоні в умовах сучасних реалій тощо. Сучасні тенденції розвитку внутрішніх та міжнародних вантажних перевезень в Україні доводять перспективність та вагомий потенціал галузі, навіть в умовах воєнного часу.

За дослідженнями проєкту «Logist.fm» (інформаційно-аналітичного ресурсу, присвяченому питанням організації перевезень усіма видами транспорту) прогнозувалося, що у першій половині 2023 року вдасться відновити 60% – 70% втрачених потужностей автомобільних вантаж-них перевезень та 40% – 50% – залізничних перевезень. Інші дослідження, проведені «TradeMasterGroup», передбачали можливість повного повернення до довоєнних обсягів вантажних перевезень вже у 2023 році.

Отже, вітчизняна галузь вантажних перевезень у перспективі може досягти високого рівня розвитку за умови реагування та вирішення наявних проблем, розробки відповідних проєктів та ініціатив, впровадження яких потребуватиме скоординованих зусиль державних установ та приватного сектора. У роботі [19] систематизовано основні пропозиції щодо удосконалення надання послуг вантажних перевезень в умовах воєнного часу та у післявоєнний період в Україні.

За думкою авторів, реалізація запропонованих заходів сприятиме комплексному вирішенню наявних проблем галузі вантажних перевезень в Україні за участі держави та приватного сектора. Як показує світовий досвід, саме така форма співпраці є дієвою та дозволить досягти суттєвих результатів у повоєнній відбудові країни.

1.3 Характеристика видів, особливостей (умов та обмежень) та інновацій в сфері транспортних перевезень

Розвиток транспорту, який відбувся з початку промислової революції, був пов’язаний зі зростанням економічних можливостей. На кожному етапі розвитку глобальної економіки була розроблена або адаптована конкретна транспортна технологія, що має низку впливів. Економічні цикли пов’язані з різними інноваціями, включаючи транспорт, що впливає на економічні можливості виробництва, розподілу та споживання. Історично виділяють шість основних хвиль економічного розвитку, де конкретна транспортна технологія створила нові економічні, ринкові та соціальні можливості:

Морські порти. Історична важливість морських портів у торгівлі була тривалою. Ця важливість була посилена на ранніх етапах європейської експансії з 16 по 18 століття, широко відомих як епоха досліджень. Морські порти підтримували ранній розвиток міжнародної торгівлі через колоніальні імперії, але були обмежені через обмежений доступ до внутрішніх земель. Пізніше під час промислової революції багато портів стали важливими промисловими платформами. З глобалізацією та контейнеризацією морські порти збільшили своє значення в підтримці глобальної торгівлі та ланцюгів постачання. Вантажі, що обробляються морськими портами, відображають економічну складність їхніх внутрішніх районів. Прості економіки зазвичай асоціюються з масовими вантажами, тоді як складні економіки створюють більші контейнерні потоки.

Технологічний і комерційний розвиток підштовхнув більшу залежність від океанів як економічного та циркуляційного простору.

Річки та канали. Річкова торгівля переважала протягом всієї історії, і навіть канали будували там, де не існувало значних змін висоти, оскільки технологія шлюзів була зачатковою.

Перший етап промислової революції наприкінці 18 – початку 19 століть був пов'язаний з розвитком систем каналів із шлюзами в Західній Європі та Північній Америці, головним чином для транспортування важких вантажів. Це дозволило розробити елементарні та обмежені внутрішні системи розподілу, багато з яких використовуються й сьогодні.

Залізниці. Другий етап промислової революції в 19 столітті був пов'язаний з розробкою та впровадженням залізничних систем, що уможливило більш гнучкі та високопродуктивні системи внутрішнього транспорту. Це відкрило значні економічні та соціальні можливості через видобуток ресурсів, заселення регіонів і зростання мобільності вантажів і пасажирів.

Дороги. У 20-му столітті стрімко розвивалися комплексні системи автомобільного транспорту, такі як національні системи автомобільних доріг і виробництво автомобілів, як головного економічного сектора. Після Другої світової війни індивідуальний транспорт став широко доступним для верств населення із середнім рівнем доходу. Це було пов’язано зі значними економічними можливостями для обслуговування промислових і комерційних ринків за допомогою надійних доставок «від дверей до дверей». Автомобіль також створив нові форми соціальних можливостей, особливо з передмістям.

Повітряні шляхи та інформаційні технології. Друга половина 20 століття ознаменувалася розвитком глобальних повітряних і телекомунікаційних мереж у поєднанні з економічною глобалізацією. Стали можливими нові організаційні та управлінські форми, особливо у сфері логістики та управління ланцюгами поставок, що швидко розвиваються. Незважаючи на те, що морський транспорт

є фізичною опорою глобалізації, повітряний транспорт та ІТ підтримують прискорену мобільність пасажирів, спеціалізованих вантажів і пов’язаних з ними потоків інформації.

Жоден вид транспорту не відповідав за економічне зростання. Натомість режими були пов’язані з економічними функціями, які вони підтримують, і географією, в якій відбувалося зростання. Перші торговельні шляхи започаткували рудиментарну систему розподілу та транзакцій, яка згодом була розширена мережами морського судноплавства на далекі відстані та заснуванням перших транснаціональних корпорацій, які керували цими потоками. Основні потоки міжнародної міграції, що відбувалися з 18-го століття, були пов’язані з розширенням міжнародних і континентальних транспортних систем, які радикально сформували економіки, що розвиваються, такі як Північна Америка та Австралія. Транспорт зіграв каталітичну роль у цих міграціях, змінивши економічну та соціальну географію багатьох націй.

Транспорт був інструментом територіального контролю, особливо в колоніальну еру, коли транспортні системи, засновані на ресурсах, підтримували видобуток товарів у країнах, що розвиваються, і пересилали їх до індустріалізованих країн того часу. Мета захоплення ресурсів і ринкових можливостей стала сильним поштовхом для встановлення та структури транспортних мереж. Зовсім недавно розвиток портів, зокрема контейнерних портів, представляв стратегічний інтерес як інструмент інтеграції у світову економіку, як показує приклад Китаю. Між зовнішньою торгівлею та обсягами контейнерних портів існує прямий зв’язок або координація, тому розвиток контейнерних портів зазвичай розглядається як інструмент для використання можливостей, які створює глобалізація. Зростання контейнерних перевезень систематично в 3-4 рази перевищувало темпи зростання ВВП, що підкреслює значний мультиплікаційний ефект між економічним зростанням і контейнерною торгівлею. Однак цей мультиплікаційний ефект суттєво зменшився з 2009 року,

підкреслюючи зрілість поширення контейнеризації та її відмежування від економічного зростання.

Через демографічний тиск і урбанізацію економіка країн, що розвиваються, характеризується невідповідністю між обмеженою пропозицією та зростаючим попитом на транспортну інфраструктуру. У той час як деякі регіони отримують вигоду від розвитку транспортних систем, інші часто залишаються маргіналізованими через умови, в яких відіграє роль неадекватний транспорт. Транспорт сам по собі не є достатньою умовою розвитку. Проте відсутність транспортної інфраструктури може бути стримуючим фактором розвитку. Відсутність транспортної інфраструктури та регуляторні перешкоди спільно впливають на економічний розвиток, спричиняючи вищі транспортні витрати, але також затримки, що робить управління ланцюгом поставок ненадійним. Низький рівень транспортного обслуговування може негативно вплинути на конкурентоспроможність регіонів та їхню економічну діяльність і таким чином погіршити регіональну додану вартість, економічні можливості та зайнятість. Розробляються інструменти та заходи для оцінки та порівняння ефективності національних транспортних систем. Наприклад, у 2007 році Світовий банк опублікував свій перший в історії звіт рейтингу країн за показниками їх логістики на основі Індексу ефективності логістики. Ефективність логістики зазвичай асоціюється з економічними можливостями.

Ключем до успіху в транспортному бізнесі є забезпечення рентабельності, гнучкості та ефективності наданих послуг. Саме тому компанії вимушені впроваджувати сучасні стратегії та тенденції в цій галузі, щоб конкурувати з іншими учасниками ринку. Основні тренди транспортної галузі 2024 р. висвітлено у роботі [20] та представлено на рис. 1.11. Розглянемо їх більш детально.

Тренд №1: Інтегровані, безперешкодні подорожі. На сучасному етапі виникає необхідність, щоб подорожі були більш комфортними та мали менше

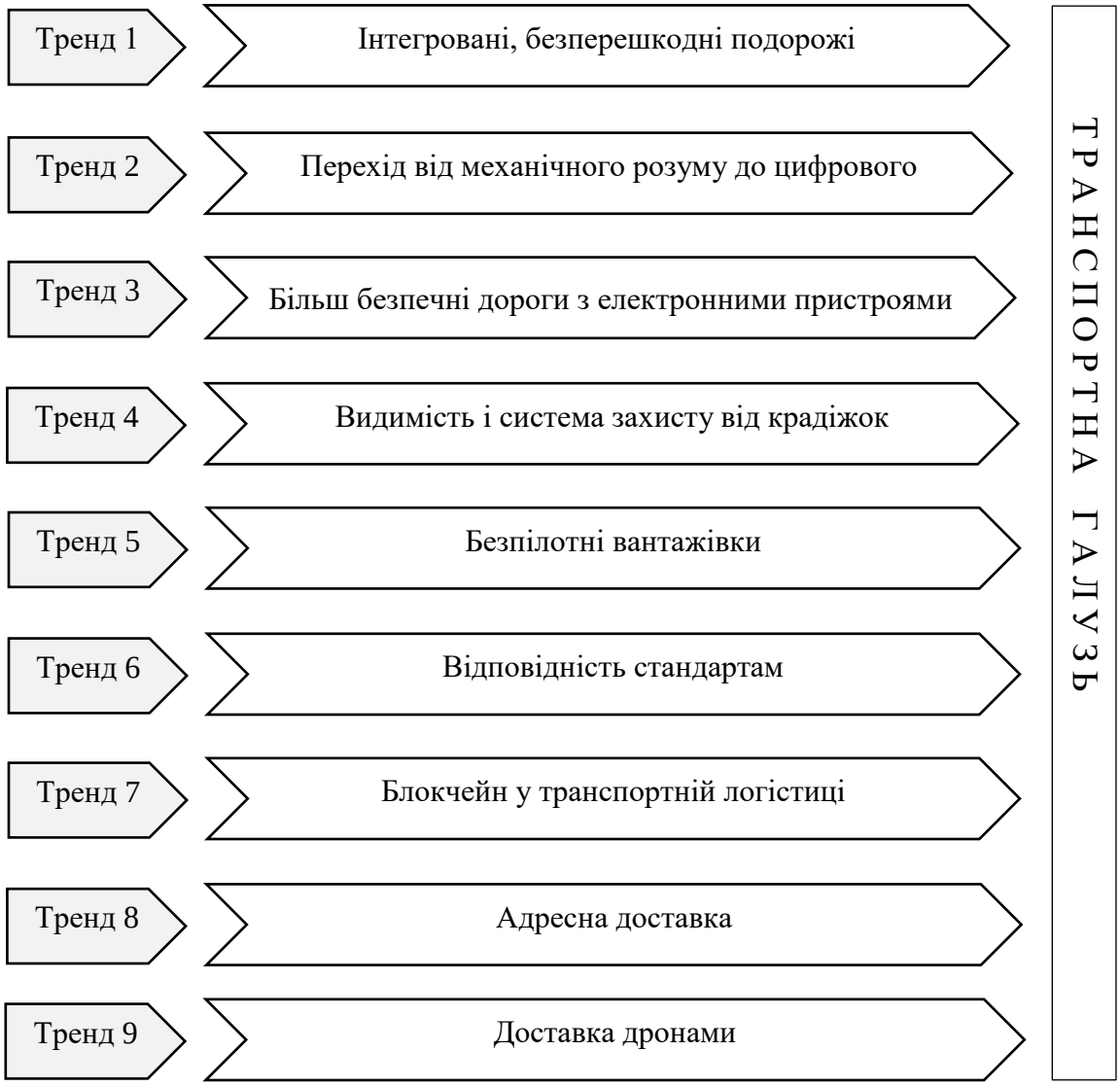


Рисунок 1.11 – Тренди транспортної галузі 2024 року

Джерело: [20]

проблем за рахунок використання MaaS, яка стала ключовим мейнстрімом у 2024 році. За прогнозними оцінками до 2028 року варто очікувати зростання ринку мобільності послуг до кількох мільйонів доларів США.

При цьому розвиток транспортних галузей, спрямований на мінімізацію витрат, мінімальні зупинки в контрольно-пропускних пунктах, що обумовлює розвиток інтегрованих і перевезень, ключовою метою яких є перш за все пункт призначення людини, а не на способі транспортування. Додатковими

особливостями в оптимізації транспортної інфраструктури є розвиток мультимодальних (змішаних) перевезень й створення хабів мобільності для них, створення умов та формування платформ для подорожей без квитка, інноваційний розвиток мікромобільності.

Важливою перевагою MaaS є надання інформації про попит, деталі транспортування, форми оплати за допомогою певної платформи. При цьому програмне забезпечення MaaS та онлайн-рішення популяризуються, що визначає перспективність зазначеного напряму в майбутньому.

Тренд №2. Перехід від механічного до цифрового інтелекту. Зауважимо, що використання штучного інтелекту (ШІ) передбачає не лише створення текстової та графічної інформації. На сучасному етапі є революцією глобальної мобільності, дозволяє досягти оптимізації трафіку та підвищити ефективність транспортної галузі. Спостерігається поступове використання штучного інтелекту в сфері транспортної логістики, і на сьогодні біля 20% компаній використовують ШІ за різним призначенням для оптимізації логістичних операцій. Підкреслимо, що у 2024 р. базою галузі електронної мобільності є штучний інтелект. Адже для того, щоб оптимально використовувати свої часові ресурси, ефективно адаптуватися до змін та успішно функціонувати в умовах посилення викликів та невизначеності необхідно залучати штучний інтелект, який є передумовою майбутнього зростання.

Тренд №3. Безпека доріг на основі використання електронних пристроїв для водіїв. Електронні пристрої (ELD) значно впливають на розвиток транспортної галузі в 2024 р. Особливістю функціонування зазначених пристроїв є інформування водіїв про необхідність зупинки та відпочинку, обмежуючи тижневі години праці до п’ятдесяти з двома вихідними, тобто закладаючи певні умови щодо співвідношення праці та відпочинку. Крім цього зазначені пристрої дозволяють контролювати обсяги вантажів, які дозволено перевозити, адже все контролюється ELD. При цьому вартість зазначених пристроїв є частиною

вартості послуг перевізників. У деяких країнах перевізників зобов'язують обов'язково встановлювати ELD (наприклад, США).

Тренд № 4. Видимість і система захисту від крадіжок. Для того, щоб забезпечити максимальну прозорість, важливим трендом у транспортній галузі є використання технологій відстежування та контролю. Однією з таких технологій є GPS-система проти крадіжки авто. Зазначена система дозволяє в режимі реального часу отримувати інформацію про місцеперебування окремих автомобілів або навіть автопарків. Крім цього, наявність додаткових протоколів дозволяє зменшити рівень витрат на всіх рівнях.

Тренд №5. Безпілотні вантажівки. На сучасному етапі процес розробки та вдосконалення технологічних рішень для безпілотних вантажівок. При цьому необхідно зауважити, що існують певні складнощі, однією з яких є необхідність вдосконалення програмного забезпечення, завдання якого полягає в підвищенні ефективності функціонування доріг з інтенсивним рухом. Зазначене належить до тенденцій транспортної галузі в майбутньому.

У перспективі транспортну галузь очікують значні зміни з точки зору технологій, що вимагає підготовки та адаптації до майбутніх трансформацій.

Наприклад, штучний інтелект дозволяє за рахунок наявності спеціальних датчиків оцінювати умови руху та визначити правила поведінки на дорозі в нестандартній ситуації. Крім того можливість обмінюватися інформацією за рахунок використання спеціальних пристроїв дозволяє підвищити безпечність руху та збільшує поінформованість водіїв щодо ситуації на дорогах, і тим самим приймати ефективні рішення для оптимізації маршруту.

Одним із найвідоміших пристроїв є електричний тягач Tesla, наділений функціями автопілота, що значно підвищує ефективність управління автомобілем. Зазначені технологічні досягнення користуються популярністю і широко використовуються в транспортних перевезеннях такими міжнародними компаніями, як Walmart, Pepsi, Asko, Loblaw та інші.

Тренд № 6. Відповідність стандартам. Зазначену тенденцію необхідно розуміти як зобов'язання або правило для кожної транспортної компанії. Адже в галузі перевезень постійно відбуваються зміни, які ініціюються на загальнодержавному або місцевому рівнях управління. Зазначені вимоги стосуються введення електронних журналів, понаднормової праці, правил безпечного руху, нововведень у законодавчій сфері тощо.

Тренд №7. Блокчейн у транспортній логістиці (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Напрями використання технології блокчейна у транспортній логістиці

Джерело: [20]

Важливою тенденцією транспортної галузі є максимальне використання всіх можливостей у майбутньому – блокчейн. Перспективним напрямом застосування блокчейну в галузі транспортування та перевезень є досягнення максимальної точності та реальності інформації щодо продуктивності, обслуговування та інших показників, котрі стосуються функціонування транспортних засобів в різні часові періоди.

Наприклад, за умови продажу автомобіля вдруге часто виникають питання щодо експлуатації транспортного засобу. Враховуючи незмінність та прозорість транзакцій через блокчейн всі учасники угоди мають можливість отримати реальну інформацію про автомобіль.

Значний рівень ефективності використання блокчейну в транспортній галузі досягається щодо моніторингу вантажопідйомності. Саме від зазначений показник випливає на вартість транспортування, обсяг вантажу і його вагу. Крім того використання спеціальних датчиків технології Інтернету речей (IoT) дозволяє визначити обсяг простору для кожного конкретного вантажу. Зазначена інформація використовується для розрахунку вартості доставки. За умови зберігання зазначених даних у системі на основі блокчейну, дозволяє автоматично здійснювати платежі згідно підписаного смарт-контракту.

Тренд № 8. Адресна доставка. Зі зростанням та розширенням ринку електронної комерції відбувається збільшення попиту на адресні поставки. При цьому вищий рівень обслуговування сприяє вищій конкурентоспроможності. Для автоперевізників значного обсягу вантажів важливим є розширення парку автомобілів для розширення своєї присутності на ринку. Необхідно враховувати, що кожна адресна доставка може мати жорсткі графіки постачання і супроводжуватися значними логістичними.

Тренд № 9. Доставка дронами. Одним із ключових трендів 2024 р. є використання дронів для доставки малогабаритних вантажів. Деякі компанії вже почали використовувати зазначений спосіб доставки. Наприклад, компанія Amazon вперше використала безпілотний літальний апарат для доставки замовлення клієнту в межах нової програми Prime Air, яка передбачає отримання замовлення протягом 30-ти хвилин. Використовуючи досвід компанії Amazon різні компанії в Україні почали інвестувати в доставку дронами задля підвищення рентабельності власного бізнесу.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

2.1 Огляд та систематизація постановок задач транспортних перевезень з урахуванням видів обмежень

Оптимізація логістичних маршрутів є ключовим викликом для сучасних транспортних компаній, і задача транспортних перевезень перебуває в епіцентрі наукових досліджень та практичних розробок.

Історія вивчення цієї складної оптимізаційної проблеми розпочалася понад шість десятиліть тому, коли дослідники Данциг і Рамзер [21] у 1959 році представили перше формалізоване математичне формулювання. Вони розглянули реальну виробничу ситуацію з постачання палива до автосервісних центрів, що стало відправною точкою для глибокого наукового опрацювання проблеми.

Подальший внесок у розвиток методології зробили Кларк і Райт [22] у 1964 році, запропонувавши інноваційну «жадібну» евристику, яка значно вдосконалила попередні підходи. Після цього наукова спільнота почала інтенсивно розробляти різноманітні моделі та алгоритмічні рішення.

Вагомий внесок у дослідження зробили видатні науковці. Фред Гловер [23] запровадив концепцію табу-пошуку та увів термінологічне поняття "метаевристика". Маріус Соломон [24] зосередився на темпоральних аспектах логістичних систем, досліджуючи часові обмеження та управління складською логістикою. Марко Доріго представив інноваційний мурашиний алгоритм [25], [26] який розширив можливості метаевристичних підходів.

Сучасні версії задача транспортних перевезень кардинально відрізняються від класичних моделей. Вони враховують надскладні реальні фактори: динамічні

зміни дорожнього трафіку, варіативність часових вікон завантаження/розвантаження, нестабільність попиту. Ці ускладнення принципово змінюють підходи до розв'язання задач.

Показовим є той факт, що найефективніші точні алгоритми здатні послідовно опрацьовувати задачі з близько 20 клієнтами. Натомість реальні виробничі завдання охоплюють тисячі клієнтських точок, десятки логістичних центрів та різноманітні транспортні обмеження. Саме тому дедалі більшого значення набувають евристичні та метаевристичні методи.

Технологічний прогрес у сфері обчислювальної техніки створює принципово нові можливості. Експоненціальне зростання швидкодії та обсягів оперативної пам'яті комп'ютерів дозволяє розв'язувати дедалі складніші optimizer задачі. Щороку з'являються нові модифікації задача транспортних перевезень та алгоритмічні підходи.

На сьогодні програмне забезпечення для маршрутизації транспортних засобів впроваджено в операційні процеси провідних світових компаній, зокрема гігантів харчової та напойної індустрії – Coca-Cola Enterprises та Anheuser-Busch Inbev.

Унікальність та складність задача транспортних перевезень полягає в надзвичайній чутливості алгоритмів до найменших змін вхідних параметрів. Додавання навіть одного обмеження може кардинально трансформувати стратегію розв'язання. Під час практичної реалізації постійно виникає потреба в реінжинірингу наявних підходів.

Велика кількість публікацій на тему задач транспортних перевезень зумовлена їх різноманітністю. Головна спільна риса у різних задач транспортних перевезень – зосередженість у розгляді одного або декількох обмежень (характеристик) математичної моделі.

У роботі [27] виділено наступні основні характеристики задач транспортних перевезень:

а) Кількість пунктів постачання:

1) один пункт постачання (наприклад, постачання або обслуговування різних клієнтів зі складу);

2) декілька пунктів постачання (наприклад, постачання вантажів від декількох виробників).

б) Кількість пунктів споживання:

1) один пункт споживання (наприклад, продукція з різних місць доставляється на склад або в пункт сертифікації);

2) декілька пунктів споживання.

в) Кількість критеріїв:

1) однокритеріальні (при оцінці оптимальності маршрутів враховується тільки один критерій - або відстань, або час, або інша характеристика);

2) багатокритеріальні (використовується кілька, як правило, конфліктуючих критеріїв);

г) Параметри доріг:

1) дорога характеризується одним параметром;

2) дорога характеризується кількома параметрами (відстань, пропускна здатність, габарити, мито чи інша фіксована плата, обмеження по швидкості і ін.);

д) Кількість вантажу:

1) вантаж відсутній (наприклад, виконання сервісних робіт);

2) кількість вантажу характеризується дійсним числом (безперервна задача):

– одним;

– декількома;

3) кількість вантажу характеризується цілим числом (дискретна задача):

– одним;

– декількома;

е) Види вантажу:

1) однотипний вантаж;

2) багатономенклатурний вантаж:

– всі вантажі дозволені;

– вантажі заборонені до перевезення у тих чи інших ТЗ;

– для кожного ТЗ є обмеження по різним видам вантажів, що перевозяться;

– існують заборони на спільні перевезення вантажів деяких видів одним ТЗ;

ж) Кількість транспортних підприємств:

1) одне (автопарк зосереджений в одному місці);

2) кілька (автопарк територіально розподілений);

3) збігаються з пунктами постачання;

з) Кількість ТЗ:

1) одне ТЗ;

2) фіксована кількість доступних ТЗ;

3) необмежена кількість доступних ТЗ;

і) Однорідність парку ТЗ:

1) всі ТЗ однакові;

2) різні типи ТЗ мають відмінні характеристики:

– відрізняються по одній характеристиці (наприклад, місткістю);

– відрізняються за багатьма характеристиками (вантажопідйомність, вартість використання, швидкість та ін.);

к) Обмеження на місткість ТЗ:

1) без обмежень (кількістю вантажу можна знехтувати);

2) передбачені обмеження тільки по одному параметру;

3) передбачені обмеження за кількома параметрами;

л) Вимоги до перевезення:

1) при перевезенні вантажу з кожного пункту постачання в кожен пункт споживання може використовуватися один ТЗ незалежно від вантажу, що перевозиться;

2) при перевезенні вантажу з кожного пункту постачання один ТЗ може розвозити вантажі в різні пункти споживання;

3) в кожен пункт споживання вантажі з різних пунктів постачання доставляє один ТЗ;

4) ТЗ можуть збирати вантаж в різних пунктах виробництва і перевозити в різні пункти споживання;

м) Додаткові умови:

1) кожен вид вантажу повинен бути доставлений з деякого пункту виробництва в певний пункт споживання (наприклад, перевезення пасажирів);

2) не допускається порожній пробіг (крім початкового і кінцевого відрізків маршруту);

3) кожне ТЗ може зробити тільки одну поїздку;

4) деякі пункти споживання є також пунктами постачання:

– вивіз з пунктів споживання здійснюється паралельно доставці;

– вивіз з пунктів споживання здійснюється після доставки;

н) Обмеження за часом:

1) максимальна тривалість маршрутів перевезень обмежена;

2) час безперервного перебування ТЗ в дорозі обмежена;

3) часові вікна:

– доставка в пункти споживання здійснюється в зазначений інтервал часу;

– вивіз з пунктів виробництва здійснюється в зазначений інтервал часу;

4) крос-докінг;

о) Обмеження по відстані:

1) загальна довжина всіх маршрутів обмежена;

2) максимальна пройдена ТЗ відстань обмежена;

п) Обмеження по пунктам виробництва і споживання:

1) деякі ТЗ не можуть відвідувати певні пункти;

2) пункти розподілені між ТЗ. р) Обмеження збалансування:

1) збалансування тривалості маршрутів;

2) збалансування довжин маршрутів;

3) збалансування кількості обслуговуваних пунктів;

4) збалансування кількості вантажу, що доставляється;

с) Послідовність перевезень:

1) задана відповідність пунктів виробництва до пунктів споживання;

2) поділ фаз доставки і вивезення;

3) обмеження на послідовність завантаження-вивантаження вантажу – стековий принцип (LIFO);

4) задані інші вимоги до послідовності перевезень;

т) Періодичність:

1) планування маршрутів для одноразового виконання;

2) планування здійснюється на тривалий період;

3) планування регулярних маршрутів;

у) Фактори, що визначають вартість перевезення:

1) залежність вартості перевезення тільки від самого шляху;

2) залежність вартості перевезення від шляху і завантаження ТЗ:

– пропорційність залежність;

– складна функціональна залежність;

ф) Умови повернення ТЗ:

1) ТЗ повинні повертатися до вихідного депо;

2) ТЗ повинні завершувати маршрут у якому-небудь депо;

3) ТЗ можуть завершувати маршрут в будь-якому місці;

х) Топологія:

1) симетрична задача (характеристики шляху не залежать від вибору напрямку):

2) метрична (відстань описується евклідовою метрикою);

3) неметрична (відстань не описується евклідовою метрикою);

4) асиметрична задача (характеристики шляху залежать від вибору напрямку);

5) складна топологія;

ц) Стохастичність:

1) детерміновані дані;

2) випадкові дані (компоненти задачі мають випадкове поводження):

– випадкові параметри доріг;

– випадкові запити;

– випадкові умови (обмеження);

– випадкові характеристики ТЗ;

ч) Визначеність:

1) статична задача, тобто замовлення в процесі доставки не змінюються;

2) динамічна задача, тобто замовлення можуть додаватися або скасовуватися.

Класифікація пов'язана, головним чином, з автомобільним транспортом, але основна маса представлених характеристик справедлива також для інших

видів. Наведене сімейство властивостей дозволяє сформувати множину задач транспортної логістики.

Зважаючи на таку різноманітність характеристик і обмежень, задачі транспортної логістики стають надзвичайно складними та багатогранними. Кожна з наведених особливостей може суттєво вплинути на вибір методів моделювання та алгоритмів розв'язання. Це зумовлює необхідність ретельного аналізу конкретних умов задачі перед вибором оптимального підходу.

Поєднання кількох обмежень одночасно значно ускладнює математичну модель і підвищує вимоги до обчислювальних ресурсів. Наприклад, врахування часових вікон доставки в поєднанні з обмеженнями на вантажопідйомність транспортних засобів та необхідністю дотримання послідовності завантаження може перетворити задачу в комбінаційно перевантажену. У таких випадках класичні методи можуть бути неефективними, і на допомогу приходять евристичні та метаевристичні алгоритми [28].

Сучасні підходи до розв'язання задач транспортних перевезень часто базуються на використанні генетичних алгоритмів, алгоритмів мурашиних колоній, табу-пошуку та інших метаевристик [29]. Ці методи дозволяють знаходити близькі до оптимальних рішення в прийнятні часові рамки, що особливо важливо для великих реальних задач з сотнями та тисячами клієнтів.

Крім того, розвиток інформаційних технологій та обчислювальної техніки відкриває нові можливості для моделювання та оптимізації логістичних систем. Використання систем підтримки прийняття рішень, геоінформаційних систем та хмарних технологій дозволяє обробляти великі масиви даних, враховувати динамічні зміни в реальному часі та покращувати точність прогнозування [30].

Необхідність адаптації до швидко змінюваних умов ринку та вимог клієнтів спонукає до розробки гнучких та масштабованих рішень. Інтеграція систем управління транспортом з іншими корпоративними системами, такими як ERP та

CRM, сприяє підвищенню ефективності логістичних процесів та забезпечує цілісність інформаційних потоків [31].

Врахування екологічних аспектів та стійкості також стає важливим фактором при плануванні транспортних перевезень. Оптимізація маршрутів з метою зменшення викидів CO_2 та споживання палива не лише знижує витрати, але й покращує екологічний імідж компанії та відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку [32].

Таким чином, комплексність та багатогранність задач транспортної логістики вимагає системного підходу та використання передових методів оптимізації. Розуміння специфіки кожного обмеження та їх взаємодії є ключем до успішного розв'язання задач та підвищення ефективності логістичних операцій.

2.2 Огляд математичних моделей та методів розв’язання задач транспортних перевезень

Задача транспортних перевезень є складною задачею комбінаторної оптимізації, характерною особливістю якої є експоненційне зростання кількості потенційних маршрутів зі збільшенням числа клієнтів. Ця проблема належить до класу NP-складних завдань, що унеможливлює застосування класичних точних методів для великих масивів даних.

Традиційні підходи розв'язання, такі як метод гілок та меж, динамічне програмування або метод гілок та відсікань, представляють цілеспрямовану версію повного перебору з інтелектуальним механізмом відсіювання неперспективних підмножин. Проте, навіть ці методи демонструють критичне зростання часу обчислень, що робить їх практично непридатними для задач з розмірністю понад 14.

У реальних прикладних сценаріях дослідники та практики звертаються до наближених алгоритмів [33], серед яких домінують евристичні та метаевристичні методи. Ці підходи забезпечують баланс між якістю отриманого рішення та обчислювальною ефективністю. Основні переваги метаевристик полягають у:

– прискоренні процесу розв'язання складних оптимізаційних задач;

– здатності опрацьовувати значно більшу кількість варіантів;

– забезпеченні надійності алгоритмічних рішень.

Процес розв'язання, як правило, складається з двох ключових етапів:

– формування initial-рішення – розпочинається з порожнього розв'язку, який поступово наповнюється компонентами за допомогою жадібних алгоритмів. Характерною особливістю є використання різноманітних евристичних функцій для прийняття локальних рішень;

– оптимізація отриманого рішення – передбачає послідовну модифікацію initial-розв'язку з метою наближення до оптимального варіанту. Обмежується або досягненням бажаного результату, або вичерпанням виділеного часу на обчислення.

Ключовим концептуальним інструментом є поняття «множини розв'язків» – сукупності потенційних станів, досяжних з поточної позиції. Метаевристичні алгоритми здійснюють навігацію в цьому просторі станів через локальний пошук, застосовуючи трансформаційні операції до одного або декількох маршрутів з метою отримання більш ефективного рішення.

Локальні операції слугують механізмом безперервного покращення, дозволяючи алгоритму еволюційно наближатися до оптимального розв'язку складної задачі маршрутизації.

Оптимізаційні методи в контексті розв'язання складних комбінаторних завдань представляють собою складну наукову парадигму з різними стратегіями пошуку ефективних рішень. Точні алгоритми [34], незважаючи на теоретичну

гарантованість знаходження оптимального результату, мають суттєві обмеження при практичному застосуванні.

Математичні підходи до розв'язання комбінаторних задач характеризуються принциповою залежністю часу обчислень від розмірності завдання. Зі збільшенням кількості змінних та умов експоненційно зростають часові витрати, що робить класичні методи повного перебору неефективними для масштабних задач.

Розглянемо основні стратегії точних методів:

– *метод гілок та границь (Branch-and-Bound)* – інноваційність цього підходу полягає в інтелектуальному розподілі простору можливих розв'язків. Алгоритм формує розгалужену структуру, де кожен вузол представляє потенційне рішення. Принципова відмінність від класичного перебору - здатність відсіювати неперспективні гілки через попередню оцінку їхнього потенціалу. Це дозволяє уникнути марних обчислень та суттєво скоротити час пошуку;

– *метод гілок та відсікань (Branch-and-Cut)* – еволюційна модифікація попереднього методу, яка додатково звужує простір пошуку через введення додаткових обмежень. Алгоритм послідовно доповнює математичну модель новимиConstrains, що дозволяє більш ефективно елімінувати неоптимальні траєкторії [35];

– *динамічне програмування (Dynamic Programming)* – стратегія декомпозиції складного завдання на взаємопов'язані підзадачі. Принципова особливість - послідовне прийняття рішень з урахуванням поточного стану системи. Виділяють два базових підходи [36]:

– top-down стратегія: передбачає мемоізацію проміжних результатів для уникнення redundant обчислень;

– bottom-up підхід: реалізує послідовне агрегування простих обчислювальних кроків у складніші структури;

Ключова відмінність динамічного програмування – здатність розв'язувати багатоетапні задачі, де кожен наступний крок залежить виключно від поточного стану системи.

Практична цінність точних методів обмежується задачами малої та середньої розмірності. Для реальних оптимізаційних проблем, що характеризуються високою розмірністю та невизначеністю, більш доцільним є застосування наближених алгоритмів та метаевристичних технік.

Точні методи демонструють потужний теоретичний інструментарій математичної оптимізації, проте мають суттєві обмеження при розв'язанні практичних завдань з великою кількістю змінних та складними взаємозв'язками.

Евристичні методи для розв'язання складних оптимізаційних задач представляють собою інтелектуальний підхід до обмеженого пошуку розв'язків у величезному просторі можливих варіантів. Ці методи виступають альтернативою класичним формальним алгоритмам, пропонуючи стратегію подолання обчислювальної складності.

Принципова особливість евристичних підходів полягає в інтелектуальному обмеженні пошукового простору з метою знаходження прийнятного розв'язку за обмежений час. Незважаючи на те, що отриманий результат може значно відрізнятися від абсолютного оптимуму, евристики демонструють високу ефективність при розв'язанні надскладних NP-повних задач [37].

Класифікація евристичних алгоритмів включає три фундаментальні категорії:

– *конструктивні алгоритми* – характеризуються послідовною побудовою розв'язку з безперервним моніторингом зростання його вартості. Особливістю є відсутність етапу подальшої оптимізації. Прикладами таких алгоритмів є: Nearest Neighbour, Greedy, Savings, Insertion. Принцип дії полягає у поступовому

формуванні маршруту або розв’язку з урахуванням локальних критеріїв ефективності;

– *двофазні (кластерні) алгоритми* – особливість підходу полягає в декомпозиції загальної задачі на два взаємопов'язаних етапи:

– групування вершин для формування майбутніх маршрутів (кластеризація);

– розв'язання класичної задачі комівояжера для кожного сформованого кластеру.

Прикладами таких алгоритмів є: алгоритм Фішера і Джайкумара, Sweep Algorithm (алгоритм замітання), Petal Algorithm (алгоритм пелюсток), алгоритм Османа. Додаткова гнучкість досягається через можливість зворотного зв'язку між етапами розв'язку, що дозволяє адаптивно корегувати проміжні результати;

– *покращуючи алгоритми* – багатоступенева стратегія оптимізації, що включає: первинний пошук initial-розв'язку, подальшу трансформацію через обмін вершинами або ребрами. Механізми локальної оптимізації: Inner route (внутрішньо-маршрутні перетворення), Intra route (між-маршрутні перетворення), k-opt варіації, 2-opt та 3-opt модифікації.

Евристичні методи демонструють баланс між обчислювальною ефективністю та якістю отриманого рішення. Їх цінність особливо проявляється при розв'язанні практичних задач з високою комбінаторною складністю, де класичні точні методи стають неспроможними.

Принципова перевага евристичних методів – здатність знаходити прийнятні розв'язки за розумний проміжок часу, що робить евристики незамінним інструментом в багатьох прикладних галузях: логістиці, плануванні, транспортній оптимізації тощо.

Концепція метаевристичних алгоритмів виникла з поєднання грецьких слів "мета" (що означає "вищий рівень") та "евристика" (від "евріскеін" - "знаходити").

Першим цей термін запропонував дослідник Фред Гловер у 1986 році [23], описуючи високорівневі алгоритмічні структури для дослідження складних оптимізаційних просторів.

Метаевристичні підходи становлять ключовий напрямок у галузі стохастичної оптимізації – широкої категорії методів, які використовують елементи випадковості для пошуку оптимальних або близьких до оптимальних розв’язків складних задач [35]. Ці методи відрізняються особливою потужністю та універсальністю, дозволяючи розв'язувати різноманітні оптимізаційні проблеми.

Також особливість метаевристичних методів полягає у їхній здатності знаходити рішення без повного розуміння простору пошуку. Вони зосереджуються на ретельному дослідженні найбільш перспективних областей простору розв’язків, демонструючи кращі результати порівняно з традиційними евристичними підходами.

Характерною особливістю метаевристичних алгоритмів є відсутність чіткого алгоритмічного припису - натомість вони потребують налаштування контрольних параметрів для конкретної задачі. По суті, метаевристика представляє собою спосіб розв'язання обчислювальних завдань через поєднання відомих процедур з відкритим інтерфейсом та закритою реалізацією для досягнення максимальної ефективності.

Такі методи особливо доречні у випадках, коли специфічний алгоритм розв'язання задачі відсутній або його реалізація недоцільна. Найчастіше метаевристики застосовуються до задач комбінаторної оптимізації, хоча їх можна адаптувати до будь-якої проблеми, що зводиться до розв'язання логічних рівнянь.

Визначальні характеристики метаевристичних методів включають [38]:

– стратегічне керування процесом пошуку;

– спрямованість на ефективне дослідження простору рішень;

– гнучкість методології – від простого локального пошуку до складних навчальних процесів;

– апроксимаційний та недетермінований характер;

– механізми уникнення локальних оптимумів;

– можливість абстрактного опису базових принципів;

– використання специфічних для задачі евристик;

– застосування накопиченого досвіду пошуку через механізми пам'яті.

Хоча більшість досліджень метаевристичних методів базується на експериментальних результатах та комп'ютерному моделюванні, існують також теоретичні обґрунтування їхньої здатності знаходити глобальні оптимуми. Примітно, що переважна більшість метаевристичних алгоритмів була розроблена шляхом спостереження та імітації природних процесів, як біологічних, так і фізичних.

Алгоритм імітаційного відпалу (Simulated annealing). Процес оптимізації, відомий як метод симуляції відпалу (SA), представляє метаевристичний підхід до розв'язання складних оптимізаційних завдань. Цей метод розширює класичний алгоритм висхідного пошуку, додаючи механізм подолання локальних екстремумів у просторі рішень. Попри високу ефективність знаходження оптимальних рішень, його головним недоліком є значно більша обчислювальна складність порівняно зі стандартним методом градієнтного підйому.

Назва методу походить від металургійного процесу термічної обробки металів, під час якого відбувається впорядкування кристалічної структури матеріалу. При цьому система прагне до стану з мінімальною енергією через поступове зниження температури до моменту стабілізації атомної структури. Під час охолодження атоми перерозподіляються, формуючи впорядковану кристалічну решітку з оптимальною щільністю та енергетичним станом. Вірогідність переміщення атома між позиціями зменшується пропорційно до

зниження температури. Температурний режим та швидкість охолодження формують так званий температурний профіль процесу.

При застосуванні SA до задач комбінаторної оптимізації процес починається з деякого допустимого початкового розв'язку. Оптимізація відбувається за принципом, аналогічним фізичному відпалу. Генерується модифікований розв'язок за визначеним правилом, після чого обчислюється цільова функція на ньому. Якщо новий розв'язок покращує поточний результат, він приймається безумовно. У протилежному випадку існує ймовірність його прийняття, що визначається формулою $exp(-\Delta/T)$, де Δ відображає різницю цільових функцій, а T – поточну температуру системи. Таким чином, ймовірність прийняття гірших рішень (розв'язків) експоненційно спадає.

Ключовою перевагою SA над простим градієнтним підйомом є менша схильність до «застрягання» в локальних оптимумах завдяки можливості прийняття тимчасово гірших рішень. На початковому етапі встановлюється висока температура, що забезпечує високу ймовірність прийняття майже будь-яких модифікацій. З поступовим охолодженням системи ймовірність прийняття неоптимальних рішень знижується, і алгоритм наближається до поведінки класичного градієнтного методу. Високі температури сприяють широкому дослідженню простору рішень, тоді як низькі дозволяють точне налаштування знайденого оптимуму.

Процес триває до досягнення температурою значень, близьких до нуля, або до моменту, коли подальша оптимізація стає неможливою. Це нагадує процес кристалізації атомів у твердому тілі при досягненні рівноважного стану.

Практична реалізація SA потребує налаштування як загальних параметрів алгоритму, так і специфічних для конкретної задачі компонентів. Ключові параметри включають: стартову температуру T, функцію зміни температури в часі, кількість ітерацій $N(t)$ на кожному температурному рівні та критерій

завершення роботи алгоритму. Правильний вибір цих параметрів критично впливає на ефективність методу.

Еволюційні обчислювальні методи, відомі як генетичні алгоритми (ГА), привертають значну увагу наукової спільноти як потужний різновид метаевристичних підходів. Ці алгоритми наслідують принципи природної еволюції та генетичної спадковості для розв'язання оптимізаційних задач.

Основою функціонування ГА є розвиток сукупності потенційних розв'язків, закодованих у вигляді хромосом. Процес оптимізації відбувається через послідовне формування нових поколінь до досягнення визначених умов зупинки. Такими умовами можуть виступати: вичерпання встановленої кількості ітерацій, досягнення популяцією однорідності, або знаходження оптимального розв'язку. Фінальним етапом є декодування найефективнішої хромосоми для отримання кінцевого результату.

Ключовою відмінністю ГА від інших методів є паралельна робота з множиною розв'язків-кандидатів, що забезпечує всебічне дослідження простору пошуку. Кожен елемент популяції представляє собою можливий розв'язок поставленої задачі.

Формування нового покоління відбувається через три послідовні стадії.

Селекція – випадковий відбір батьківських особин для схрещування. Імовірність вибору корелює з показником пристосованості особини, що дозволяє зберігати баланс між якістю генетичного матеріалу та різноманітністю популяції. Пристосованість визначається як міра ефективності розв'язку відносно цільової функції оптимізації.

Схрещування – комбінування генетичного матеріалу обраних батьків для створення нащадків, які формуватимуть наступну генерацію популяції.

Мутація – внесення випадкових змін у генетичний код окремих особин. Цей процес, що відбувається з невеликою ймовірністю, сприяє дослідженню нових областей простору розв'язків та підтримці генетичного різноманіття.

Нова популяція формується шляхом циклічного повторення цих трьох операцій до повного оновлення складу популяції. Ефективність алгоритму значною мірою залежить від підтримання оптимального балансу між збереженням найкращих знайдених розв'язків та забезпеченням достатньої різноманітності генетичного матеріалу в популяції. CopyRetry

Серед еволюційних алгоритмів виділяються меметичні алгоритми (MA), які можна розглядати як розширену версію генетичних алгоритмів завдяки впровадженню локальної оптимізації для кожного створеного нащадка. Обидва підходи належать до більш широкої категорії еволюційних методів оптимізації.

Особливе місце серед оптимізаційних методів займає алгоритм табу-пошуку (TS), який вирізняється своєю здатністю продовжувати дослідження простору рішень навіть після знаходження локального оптимуму. Цей метод систематично досліджує простір рішень, послідовно переходячи до найперспективнішого варіанту серед доступних сусідніх станів.

Принципова відмінність табу-пошуку від класичних градієнтних методів полягає в можливості тимчасового погіршення цільової функції під час переходу між ітераціями. Для запобігання зациклюванню алгоритму впроваджується механізм заборони – певні характеристики нещодавно розглянутих рішень тимчасово позначаються як табу. Період дії такої заборони, що має назву табу-термін, може динамічно змінюватися протягом роботи алгоритму.

Важливим елементом методу є критерій прагнення – набір умов, за яких статус табу може бути скасований. Наприклад, якщо заборонене рішення перевершує всі раніше знайдені варіанти, табу-статус може бути знятий. Така гнучкість механізму заборон може як сприяти, так і перешкоджати процесу пошуку.

На відміну від методів, що використовують випадковий вибір напрямку пошуку, табу-пошук керується принципом уникнення вже досліджених областей. Це забезпечує систематичне вивчення нових регіонів простору рішень, допомагає уникати локальних оптимумів та сприяє знаходженню глобально оптимального рішення.

Процес оптимізації зазвичай починається з побудови початкового рішення за допомогою простої евристики мінімальної вартості. Подальше покращення отриманого рішення здійснюється через механізми локального пошуку, які можуть використовувати одну або декілька структур околів, застосовуючи стратегію вибору найкращого доступного варіанту.

Метод оптимізації колективною поведінкою мурах (ACO) належить до біоінспірованих метаевристичних алгоритмів, що базується на спостереженнях за природними мурашиними колоніями. У контексті розв'язання комбінаторних оптимізаційних задач, процес пошуку можна представити як знаходження оптимального маршруту в зваженому графі.

Віртуальні мурахи-агенти діють спільно для виявлення найефективнішого шляху, поступово формуючи рішення через послідовний вибір вершин графа. На кожному кроці додавання нової вершини до часткового рішення відбувається за ймовірнісним принципом, де ключовим фактором виступає концентрація віртуального феромону на відповідних вершинах та ребрах графа.

Феромонні сліди оновлюються агентами після кожної ітерації, що забезпечує колективну взаємодію у процесі пошуку оптимальних рішень. Важливою особливістю є поступове зменшення інтенсивності феромонних слідів з часом, імітуючи природне випаровування. Це дозволяє автоматично виключати неефективні рішення з подальшого розгляду в процесі оптимізації.

Привабливість ACO для розв'язання складних комбінаторних задач зумовлена його адаптивністю та стійкістю. Методологія дозволяє вирішувати

широкий спектр задач при мінімальній модифікації базового алгоритму.

Сучасні дослідження демонструють високу ефективність ACO, особливо при інтеграції зі спеціалізованими процедурами локального пошуку. Алгоритм успішно застосовується для розв'язання:

– симетричних та асиметричних задач комівояжера;

– задач послідовного впорядкування;

– квадратичних та біквадратичних задач про призначення.

Особливо варто відзначити модифікацію під назвою Система Мурашиних Колоній (ACS), що відрізняється вдосконаленим механізмом оновлення феромонних слідів, який концентрує пошук навколо найперспективніших рішень.

Сучасні тенденції розвитку оптимізаційних методів спрямовані на створення гібридних алгоритмів, що поєднують різні метаевристики для досягнення кращих результатів, особливо при розв'язанні задач транспортних перевезень. Такий підхід дозволяє максимально використати переваги кожного методу.

2.3 Опис існуючого програмного забезпечення для розв’язання задач транспортних перевезень

Задачі транспортних перевезень займають ключове місце в сучасній логістиці та управлінні ланцюгами поставок. Оптимізація маршрутів, ефективне використання транспортних засобів та зниження витрат на перевезення є критично важливими для успішного функціонування підприємств. Сьогодні існує ряд програмних продуктів, які спрямовані на розв’язання цих задач, забезпечуючи інструменти для планування, аналізу та оптимізації транспортних операцій.

Одним із провідних рішень у цій галузі є *Sterling Transportation Management System від компанії IBM* [39]. Це комплексна система управління транспортом, яка оптимізує ланцюги поставок шляхом інтегрованого планування та аналізу вхідних і вихідних процесів транспортування. Система дозволяє компаніям ефективно координувати свої транспортні мережі, знижуючи витрати та підвищуючи рівень обслуговування клієнтів за рахунок точного планування та відстеження перевезень.

IBM Sterling TMS інтегрує в собі передові технології для планування, виконання та контролю транспортних перевезень. Система надає можливість підприємствам координувати всі аспекти транспортної логістики, починаючи від вибору перевізника та планування маршрутів до відстеження вантажів у режимі реального часу та управління витратами.

Однією з ключових особливостей Sterling TMS є її здатність до автоматизованого планування маршрутів з урахуванням різноманітних факторів, таких як об'єми вантажів, часові вікна доставки, доступність транспортних засобів та дорожні умови. Система використовує алгоритми оптимізації, які дозволяють мінімізувати час доставки та витрати на транспортування, забезпечуючи при цьому високий рівень обслуговування клієнтів.

Sterling TMS також пропонує розширені функції для управління взаємовідносинами з перевізниками. Вона підтримує процеси вибору та оцінки перевізників, управління контрактами та тарифами, а також обробку рахунків та платежів. Це сприяє прозорості та ефективності у співпраці з партнерами по транспортуванню.

Система забезпечує повну видимість транспортних операцій завдяки можливостям відстеження вантажів у режимі реального часу. Користувачі можуть отримувати актуальну інформацію про місцезнаходження вантажів, статус доставки та можливі затримки. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни

та приймати обґрунтовані рішення для підтримання безперебійного функціонування ланцюга поставок.

Інтеграція з іншими системами управління підприємством є ще однією перевагою Sterling TMS. Програмне забезпечення може бути з'єднане з ERP-системами, WMS (Warehouse Management Systems) та іншими рішеннями, що забезпечує узгодженість даних та процесів по всій організації. Це сприяє покращенню координації між різними відділами та підвищує загальну ефективність операцій.

Безпека даних є критичним аспектом у сучасних бізнес-процесах, і Sterling TMS відповідає найвищим стандартам у цій сфері. Система використовує передові технології для захисту інформації та забезпечує відповідність нормативним вимогам щодо конфіденційності та безпеки даних.

Впровадження IBM Sterling Transportation Management System дозволяє підприємствам отримати ряд стратегічних переваг. Серед них:

– зниження витрат на транспортування: оптимізація маршрутів та ефективне управління перевізниками сприяють мінімізації витрат;

– підвищення рівня обслуговування клієнтів: точне дотримання графіків доставки та прозорість операцій покращують задоволеність клієнтів;

– покращення операційної ефективності: автоматизація процесів та інтеграція з іншими системами зменшують кількість ручної роботи та помилок.

Для розв’язання задач транспортних перевезень Sterling TMS надає інструментарій для комплексного управління та оптимізації всіх аспектів транспортної логістики. Вона дозволяє вирішувати складні задачі маршрутизації, управління ресурсами та забезпечення відповідності нормативним вимогам.

ArcLogistics – це спеціалізоване програмне забезпечення, розроблене компанією Esri [40], яке призначене для планування та оптимізації роботи парку транспортних засобів. Воно допомагає підприємствам ефективно керувати

своїми логістичними операціями, знижувати витрати на транспортування та покращувати рівень обслуговування клієнтів за рахунок оптимального планування маршрутів і розподілу ресурсів.

ArcLogistics використовує передові геоінформаційні технології для створення детальних та точних маршрутів. Програма інтегрує в себе можливості ГІС (геоінформаційних систем), що дозволяє враховувати реальні дорожні умови, включаючи дорожню мережу, обмеження руху, швидкісні ліміти та іншу актуальну інформацію про дороги. Це забезпечує більш точне та ефективне планування маршрутів, зменшуючи час у дорозі та витрати на паливо.

Однією з ключових функцій ArcLogistics є можливість імпорту замовлень з різних джерел даних, таких як бази даних, електронні таблиці або системи управління замовленнями. Після імпорту програма автоматично розраховує оптимальні маршрути для доставки, враховуючи такі параметри, як час доставки, пріоритетність замовлень, вантажопідйомність транспортних засобів, робочий час водіїв та інші обмеження. Це дозволяє ефективно розподілити замовлення між транспортними засобами та забезпечити своєчасну доставку клієнтам.

ArcLogistics також надає можливість створення маршрутних листів для водіїв, які містять детальну інформацію про маршрут, включаючи адреси зупинок, послідовність доставки та спеціальні інструкції. Це полегшує роботу водіїв та зменшує ймовірність помилок під час доставки. Крім того, програма підтримує функції відстеження виконання маршрутів та моніторингу ефективності роботи транспортного парку.

Програмне забезпечення дозволяє генерувати різноманітні звіти та аналізувати ключові показники ефективності, такі як загальний пробіг, час у дорозі, використання палива та продуктивність водіїв. Ця інформація є цінною для менеджерів, оскільки дозволяє ідентифікувати області для покращення та приймати обґрунтовані рішення для оптимізації логістичних процесів.

ArcLogistics інтегрується з іншими продуктами Esri, що розширює його функціональні можливості. Зокрема, інтеграція з ArcGIS дозволяє використовувати додаткові картографічні дані та інструменти аналізу, що підвищує точність планування та дозволяє враховувати специфічні географічні особливості регіонів доставки.

Програма також враховує реальні "вікна доставки" – часові проміжки, у які клієнт може прийняти доставку. Це особливо важливо для підприємств, що обслуговують роздрібні мережі, ресторани або інші установи з чітко визначеними графіками роботи. Врахування цих обмежень дозволяє підвищити рівень обслуговування та задоволеність клієнтів.

ArcLogistics забезпечує масштабованість та гнучкість, що дозволяє використовувати його як невеликим підприємствам з обмеженим парком транспортних засобів, так і великим логістичним компаніям з розгалуженою мережею доставки. Програма може бути налаштована відповідно до специфічних потреб бізнесу, враховуючи особливості галузі та регіону діяльності.

Використання ArcLogistics сприяє зниженню операційних витрат за рахунок оптимізації маршрутів та зменшення непотрібних пробігів. Це не лише економить кошти, але й позитивно впливає на екологію, зменшуючи викиди CO_2 та інших шкідливих речовин в атмосферу. Крім того, програма допомагає покращити управління ресурсами, забезпечуючи більш ефективне використання транспортних засобів та робочого часу водіїв. Це дозволяє підвищити продуктивність та конкурентоспроможність підприємства на ринку.

Іншим важливим інструментом є *SAP Transportation Management (SAP TM)*, [41] яке є інтегрованим програмним рішенням, розробленим компанією SAP, яке призначене для комплексного управління транспортними операціями в ланцюгах постачання. Це потужний інструмент, що допомагає підприємствам планувати,

виконувати та контролювати всі аспекти транспортної логістики, забезпечуючи ефективність, прозорість та зниження витрат на перевезення.

SAP TM об'єднує функціональність для управління різними видами транспорту – автомобільним, залізничним, морським та авіаційним. Система підтримує процеси від стратегічного планування та моделювання мережі транспортування до оперативного управління перевезеннями та моніторингу виконання замовлень у режимі реального часу.

Однією з ключових можливостей SAP TM є планування та оптимізація маршрутів. Система використовує передові алгоритми для розробки оптимальних планів транспортування, враховуючи такі фактори, як обсяги вантажів, обмеження вантажопідйомності, часові вікна доставки, тарифи перевізників та специфічні вимоги клієнтів. Це дозволяє мінімізувати витрати на перевезення, скоротити час доставки та підвищити рівень обслуговування клієнтів.

SAP TM забезпечує ефективне управління замовленнями на перевезення. Система інтегрується з іншими модулями SAP, такими як SAP ERP та SAP Extended Warehouse Management, що дозволяє автоматизувати процеси створення, підтвердження та виконання транспортних замовлень. Це забезпечує безперервність інформаційних потоків та узгодженість даних по всій організації.

Управління перевізниками є ще однією важливою функцією SAP TM. Система підтримує процеси вибору та акредитації перевізників, управління контрактами та тарифами, а також оцінку продуктивності перевізників на основі ключових показників ефективності. Це сприяє побудові надійних партнерських відносин та забезпечує конкурентні тарифи на перевезення.

SAP TM надає можливість моніторингу та відстеження перевезень у режимі реального часу. Користувачі можуть отримувати актуальну інформацію про статус замовлень, місцезнаходження вантажів та можливі відхилення від

плану. Система підтримує функції оповіщення про події, що дозволяє оперативно реагувати на зміни та приймати коригувальні дії для забезпечення своєчасної доставки.

Управління витратами на транспортування є критичним аспектом для багатьох підприємств. SAP TM забезпечує детальний облік витрат, автоматизацію процесів розрахунку та перевірки рахунків від перевізників, а також підтримує функції виставлення рахунків клієнтам за транспортні послуги. Це допомагає знизити фінансові ризики, покращити грошові потоки та забезпечити точність фінансової звітності.

Система також пропонує розширені аналітичні можливості. За допомогою інструментів бізнес-аналітики користувачі можуть проводити глибокий аналіз транспортних операцій, виявляти тенденції та закономірності, оцінювати ефективність перевізників та внутрішніх процесів. Це сприяє прийняттю обґрунтованих рішень для покращення логістичних операцій та стратегічного планування.

SAP TM підтримує комплаєнс та дотримання нормативних вимог, включаючи міжнародні стандарти та регуляції в сфері транспортування небезпечних вантажів, митного оформлення та торговельних обмежень. Це забезпечує законність операцій та знижує ризики штрафів та санкцій.

Мобільні рішення є невід'ємною частиною сучасних транспортних систем. SAP TM пропонує мобільні додатки для водіїв та менеджерів, що дозволяють отримувати доступ до необхідної інформації з будь-якого місця та в будь-який час. Це підвищує оперативність та гнучкість управління транспортними операціями.

Інтеграція SAP TM з хмарними сервісами та підтримка інтернету речей (IoT) відкривають нові можливості для автоматизації та цифровізації транспортної логістики. Це включає використання датчиків для моніторингу

стану вантажів, транспортних засобів та інфраструктури, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності операцій.

Використання SAP Transportation Management приносить підприємствам ряд значних переваг:

– оптимізація транспортних витрат: завдяки ефективному плануванню та управлінню перевезеннями;

– підвищення прозорості та контрольованості процесів: через інтегровані інформаційні потоки та моніторинг у режимі реального часу;

– покращення обслуговування клієнтів: шляхом забезпечення точних та своєчасних поставок, а також швидкого реагування на їхні потреби;

– підвищення операційної ефективності: за рахунок автоматизації процесів та скорочення ручної праці;

– масштабованість та адаптивність: система може бути налаштована під специфічні потреби та масштаби бізнесу.

У сучасному динамічному бізнес-середовищі, де логістика відіграє стратегічну роль, SAP Transportation Management є потужним інструментом для підприємств, що прагнуть залишатися конкурентоспроможними. Система допомагає адаптуватися до мінливих умов ринку, впроваджувати інновації та підвищувати ефективність логістичних операцій.

З огляду на зростаючу складність ланцюгів постачання та вимоги клієнтів до швидкості та надійності доставки, SAP TM стає невід'ємною частиною технологічного арсеналу провідних компаній у різних галузях, включаючи виробництво, роздрібну торгівлю, дистрибуцію та логістику.

Oracle Transportation Management (OTM) [16] є комплексним програмним рішенням, розробленим компанією Oracle, яке призначене для управління всіма аспектами транспортних операцій у ланцюгах постачання. Це потужний інструмент, який допомагає підприємствам оптимізувати процеси

транспортування, знизити витрати та підвищити ефективність логістичних операцій.

OTM поєднує в собі функціональність для планування, виконання та моніторингу перевезень. Система підтримує різні види транспорту — автомобільний, залізничний, морський та авіаційний, що дозволяє підприємствам управляти мультимодальними перевезеннями в єдиному середовищі.

Однією з ключових особливостей Oracle Transportation Management є можливість здійснювати оптимізацію маршрутів та планування перевезень з урахуванням численних факторів. Система враховує обсяги вантажів, часові обмеження, тарифи перевізників, обмеження вантажопідйомності та інші параметри для розробки оптимальних планів транспортування. Це дозволяє мінімізувати витрати на перевезення, скоротити час доставки та підвищити рівень обслуговування клієнтів.

OTM забезпечує ефективне управління відносинами з перевізниками. Система підтримує процеси вибору та акредитації перевізників, управління контрактами та тарифами, а також автоматизує обробку рахунків та платежів. Це сприяє прозорості у взаємовідносинах з партнерами та забезпечує конкурентні тарифи на перевезення.

Система надає можливості моніторингу та відстеження перевезень у режимі реального часу. Користувачі можуть отримувати актуальну інформацію про статус замовлень, місцезнаходження вантажів та можливі відхилення від плану. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни та приймати коригувальні дії для забезпечення своєчасної доставки.

Oracle Transportation Management інтегрується з іншими системами управління підприємством, включаючи ERP-системи, WMS (Warehouse Management Systems) та CRM (Customer Relationship Management). Це забезпечує

узгодженість даних та процесів по всій організації, покращує координацію між різними відділами та підвищує загальну ефективність операцій.

OTM підтримує управління витратами на транспортування. Система автоматизує процеси розрахунку та перевірки рахунків від перевізників, забезпечує точний облік витрат та підтримує функції виставлення рахунків клієнтам за транспортні послуги. Це допомагає знизити фінансові ризики та покращити управління грошовими потоками.

Система пропонує розширені аналітичні можливості. За допомогою вбудованих інструментів бізнес-аналітики користувачі можуть проводити детальний аналіз транспортних операцій, оцінювати ефективність перевізників, виявляти тенденції та закономірності. Це сприяє прийняттю обґрунтованих рішень для покращення логістичних процесів та стратегічного планування.

Oracle Transportation Management забезпечує комплаєнс та дотримання нормативних вимог. Система враховує міжнародні стандарти та регуляції у сфері транспортування, включаючи вимоги щодо безпеки перевезення небезпечних вантажів, митного оформлення та торговельних обмежень. Це знижує ризики штрафів та санкцій, забезпечує законність операцій.

Однією з переваг OTM є можливість налаштування та масштабування системи відповідно до потреб підприємства. Система може бути адаптована до специфічних вимог бізнесу, галузі та регіону діяльності. Це дозволяє використовувати OTM як невеликим компаніям, так і великим корпораціям з розгалуженою мережею логістики.

OTM підтримує сучасні технології, включаючи мобільні рішення та інтернет речей (IoT). Мобільні додатки дозволяють водіям та менеджерам отримувати доступ до необхідної інформації з будь-якого місця, підвищуючи оперативність управління. Інтеграція з IoT забезпечує можливість використання

датчиків та інших пристроїв для моніторингу стану вантажів, транспортних засобів та інфраструктури.

Використання Oracle Transportation Management приносить підприємствам значні переваги. Оптимізація маршрутів та ефективне управління перевезеннями сприяють зниженню витрат на транспортування. Підвищення прозорості та контрольованості процесів покращує обслуговування клієнтів та підвищує їхню задоволеність. Автоматизація процесів та інтеграція з іншими системами зменшують кількість ручної роботи та помилок, підвищують продуктивність та ефективність операцій.

Для підприємств, які шукають більш гнучкі та масштабовані рішення, Route4Me [43] пропонує хмарну платформу для оптимізації маршрутів. Route4Me – це інноваційна хмарна платформа, призначена для оптимізації маршрутів та управління логістичними операціями. Вона пропонує підприємствам різного масштабу інструменти для ефективного планування маршрутів, що допомагає знизити витрати на транспортування, підвищити продуктивність та покращити рівень обслуговування клієнтів.

Однією з головних переваг Route4Me є її доступність як сервісу на основі хмарних технологій. Це означає, що користувачам не потрібно встановлювати додаткове програмне забезпечення або інвестувати в потужне обладнання. Усі функції платформи доступні через веб-інтерфейс або мобільні додатки, що забезпечує гнучкість та зручність використання з будь-якого місця та пристрою з доступом до інтернету.

Route4Me спеціалізується на швидкому та точному розрахунку оптимальних маршрутів для доставки, сервісних виїздів або інших мобільних операцій. Платформа здатна обробляти великі обсяги даних, включаючи тисячі адрес, і генерувати оптимальні маршрути за лічені секунди. Це особливо корисно

для компаній з великим парком транспортних засобів або широкою географією обслуговування.

Платформа враховує безліч факторів під час планування маршрутів. Серед них – час доставки, пріоритетність замовлень, обмеження по вантажопідйомності транспортних засобів, робочий час водіїв, дорожні умови та трафік у реальному часі. Це дозволяє створювати маршрути, які не лише мінімізують пробіг та час у дорозі, але й відповідають специфічним вимогам бізнесу та клієнтів.

Route4Me пропонує інтерактивний інтерфейс для візуалізації маршрутів на карті. Користувачі можуть легко переглядати та редагувати маршрути, додавати або видаляти зупинки, змінювати послідовність відвідування адрес. Це надає можливість оперативно реагувати на зміни, наприклад, додавання нових замовлень або скасування існуючих.

Мобільні додатки Route4Me для iOS та Android забезпечують безпосередню взаємодію з водіями. Водії отримують свої маршрути на смартфонах або планшетах, можуть переглядати деталі кожної зупинки, використовувати навігацію до наступного пункту призначення. Додатки також підтримують функції збору підписів, фотографій та інших доказів доставки, що полегшує документування виконаних завдань.

Платформа підтримує відстеження місцезнаходження транспортних засобів у режимі реального часу. Це дозволяє менеджерам контролювати виконання маршрутів, бачити поточне положення водіїв на карті, оцінювати відхилення від плану та приймати необхідні коригувальні дії. Така прозорість сприяє підвищенню ефективності операцій та забезпеченню високого рівня обслуговування клієнтів.

Route4Me інтегрується з різними системами та джерелами даних. Вона може імпортувати замовлення з файлів CSV, Excel, баз даних або через API. Це спрощує процес завантаження даних та забезпечує узгодженість інформації між

різними системами підприємства. Крім того, платформа може взаємодіяти з CRM-системами, ERP та іншими бізнес-додатками, що підвищує загальну ефективність управління бізнес-процесами.

Аналітичні можливості Route4Me дозволяють підприємствам оцінювати ефективність своїх логістичних операцій. Платформа надає звіти та статистику щодо пробігу, витрат палива, часу доставки, продуктивності водіїв та інших ключових показників. Це допомагає ідентифікувати області для покращення, оптимізувати ресурси та приймати обґрунтовані рішення для стратегічного розвитку.

Однією з важливих особливостей Route4Me є її масштабованість та гнучкість. Платформа підходить для різних галузей та розмірів бізнесу — від невеликих місцевих служб доставки до великих міжнародних логістичних компаній. Користувачі можуть налаштовувати параметри відповідно до своїх потреб, додавати необмежену кількість транспортних засобів та адрес, використовувати різні алгоритми оптимізації.

Безпека та конфіденційність даних є пріоритетом для Route4Me. Платформа використовує сучасні технології захисту інформації, включаючи шифрування даних, автентифікацію користувачів та регулярне резервне копіювання. Це забезпечує надійний захист бізнес-даних та відповідність нормативним вимогам щодо конфіденційності.

Використання Route4Me приносить підприємствам ряд значних переваг. Оптимізація маршрутів дозволяє знизити витрати на паливо та обслуговування транспортних засобів, зменшити пробіг та час у дорозі. Підвищення продуктивності водіїв та ефективності операцій сприяє збільшенню кількості виконаних замовлень без додаткових ресурсів. Покращення рівня обслуговування клієнтів за рахунок точного дотримання графіків доставки та

швидкого реагування на зміни підвищує лояльність клієнтів та конкурентоспроможність бізнесу.

PTV Map&Guide – це спеціалізоване програмне забезпечення, розроблене компанією PTV Group [44], яке призначене для професійного планування маршрутів та розрахунку витрат на транспортування. Цей інструмент орієнтований на підприємства транспортної та логістичної галузі, допомагаючи оптимізувати маршрути вантажних автомобілів з урахуванням багатьох факторів, що впливають на ефективність перевезень.

Однією з головних переваг PTV Map&Guide є його здатність враховувати специфічні вимоги та обмеження для вантажного транспорту. Програма використовує актуальні картографічні дані та інформацію про дорожню мережу, включаючи обмеження за вагою, габаритами, екологічними зонами та заборонами руху для певних типів транспортних засобів. Це дозволяє планувати маршрути, які відповідають нормативним вимогам та уникають штрафів за порушення правил дорожнього руху.

PTV Map&Guide також враховує витрати на платні дороги та тунелі, що є важливим аспектом для точного розрахунку вартості перевезення. Програма містить актуальну інформацію про тарифи на платні дороги в різних країнах Європи, що дозволяє вибирати маршрути з оптимальним співвідношенням між часом у дорозі та витратами на оплату доріг. Це допомагає підприємствам знизити операційні витрати та підвищити рентабельність перевезень.

Програмне забезпечення підтримує розрахунок часу у дорозі з урахуванням законодавчих вимог щодо робочого часу водіїв та періодів відпочинку. PTV Map&Guide автоматично розраховує оптимальні точки та часи зупинок, забезпечуючи відповідність вимогам щодо безпеки руху та трудового законодавства. Це сприяє підвищенню безпеки перевезень та уникненню штрафів за порушення режиму роботи водіїв.

Інтерфейс PTV Map&Guide є інтуїтивно зрозумілим та зручним у використанні. Користувачі можуть легко вводити адреси або точки маршруту, налаштовувати параметри транспортних засобів та отримувати детальні маршрути з інструкціями. Програма надає можливість візуалізації маршрутів на карті, що допомагає краще розуміти запланований шлях та вносити необхідні корективи.

PTV Map&Guide також пропонує розширені функції для управління витратами на транспортування. Користувачі можуть вводити власні тарифні моделі, враховувати витрати на паливо, зарплату водіїв, амортизацію транспортних засобів та інші змінні. Це дозволяє отримувати точні розрахунки загальної вартості перевезення та аналізувати рентабельність маршрутів.

Програма підтримує багатомовність та враховує особливості різних країн, що є важливим для міжнародних перевезень. PTV Map&Guide містить актуальні дані про дорожню мережу та законодавчі обмеження в багатьох країнах Європи, що забезпечує коректне планування маршрутів на міжнародному рівні.

Інтеграція з іншими системами управління підприємством є ще однією перевагою PTV Map&Guide. Програма може бути з'єднана з ERP-системами, TMS (Transportation Management Systems) та іншими рішеннями, що дозволяє автоматизувати обмін даними та підвищити ефективність логістичних процесів.

PTV Map&Guide також враховує екологічні аспекти перевезень. Програма дозволяє розраховувати викиди CO_2 та інших шкідливих речовин для кожного маршруту, що допомагає підприємствам оцінювати екологічний вплив своєї діяльності та впроваджувати заходи для його зменшення. Це особливо актуально в контексті зростаючих екологічних вимог та регуляцій.

Крім того, PTV Map&Guide надає можливості для аналізу та оптимізації логістичних процесів. Користувачі можуть порівнювати різні варіанти маршрутів, оцінювати їх ефективність та вибирати найкращі рішення. Це сприяє

зниженню операційних витрат, підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності підприємства.

Використання PTV Map&Guide приносить підприємствам ряд значних переваг:

– зниження витрат на транспортування: оптимізація маршрутів та врахування всіх витрат дозволяє мінімізувати загальні витрати на перевезення;

– підвищення безпеки перевезень: врахування обмежень для вантажних автомобілів та законодавчих вимог щодо робочого часу водіїв знижує ризики аварій та штрафів;

– покращення планування: точні розрахунки часу та витрат сприяють більш ефективному плануванню ресурсів та дотриманню графіків доставки;

– відповідність екологічним стандартам: можливість оцінки викидів сприяє екологічно відповідальному веденню бізнесу.

Кожне з цих програмних рішень спрямоване на вирішення специфічних аспектів задач транспортних перевезень. Вони використовують різні алгоритми та підходи для оптимізації маршрутів, управління транспортними ресурсами та покращення сервісу доставки. Проте, незважаючи на широкий спектр доступних інструментів, задач транспортних перевезень залишається складною та актуальною проблемою.

Сучасні тенденції вказують на необхідність розвитку нових підходів до розв’язання задач транспортних перевезень, які б поєднували переваги існуючих алгоритмів та враховували сучасні вимоги ринку [45]. Це може включати інтеграцію методів штучного інтелекту, машинного навчання та інших інноваційних технологій [46]. Такий підхід дозволить створити більш адаптивні та ефективні системи, здатні швидко реагувати на зміни умов та забезпечувати оптимальні рішення в реальному часі.

Існуюче програмне забезпечення надає потужні інструменти для розв’язання задач транспортних перевезень, проте розвиток технологій та зростання вимог бізнесу стимулюють подальший пошук та впровадження нових рішень [47]. Комбінація вже відомих алгоритмів та їх модифікацій з використанням сучасних технологій може стати ключем до підвищення ефективності логістичних процесів та конкурентоспроможності компаній на глобальному ринку.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОСТАВЛЕННЯ ВАНТАЖІВ В УМОВАХ ТРАНСПОРТНИХ ОБМЕЖЕНЬ

3.1 Змістовні постановки та математичні моделі транспортної задачі з урахуванням додаткових обмежень

Класична постановка транспортної задачі та варіанти додаткових обмежень.

Є n пунктів виробництва, у кожному у тому числі виробляється a_i, i=1,2,…,n одиниць однотипного товару, і m пунктів споживання, у кожному у тому числі споживається b_j, j=1,2,…,m одиниць тієї ж товару . Пункти пов'язані між собою мережею доріг. Вартість перевезення одиниці товару з пункту виробництва i до пункту споживання j – величина c_{ij}. Передбачається виконаним умова замкнутості задачі: $\sum_{i=1}^{n} a_i = \sum_{j=1}^{m} b_j$.

Оптимізаційна задача полягає в тому, щоб знайти такий план перевезень, при якому сумарна вартість перевезення товарів буде мінімальною (рис. 3.1).

Формально розв'язок задачі описується матрицею $(x_{ij})_{i=1\,j=1}^{n\;\;m}$, в якій кожен елемент x_{ij} означає обсяг товару, що перевозиться із пункту виробництва з номером i, в пункт споживання з номером j. У прийнятих позначеннях задача набуває вигляду:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \to \min ,$$

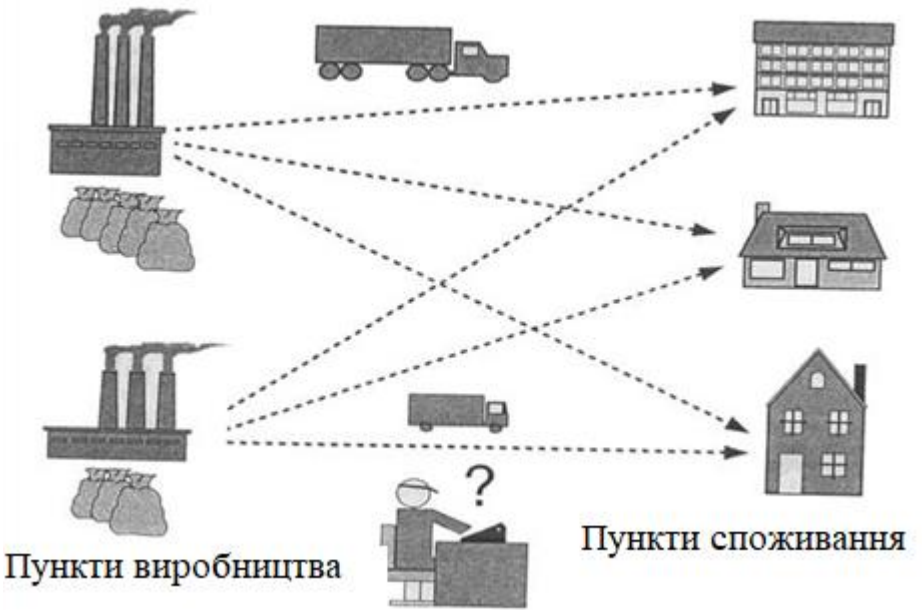


Рисунок 3.1 – Схема перевезень в класичній транспортній задачі

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = a_i, \quad i = 1,2,...,n,$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = b_j, \quad j = 1,2,...,m,$$

$$x_{ij} \geq 0.$$

Класична транспортна задача та методи її розв’язання розглядаються у численних роботах [48]. Відомо безліч варіантів точних та наближених алгоритмів пошуку оптимального розв'язку цієї задачі. Проте запровадження додаткових обмежень в умови задачі робить її набагато складнішою.

Розглянемо деякі з таких обмежень.

Нехай вивезення товару з кожного пункту виробництва i здійснюється машиною, вантажопідйомність якої обмежена величиною w_i. Нехай c_{ij} – вартість пробігу однієї машини на відповідному маршруті.

Таким чином, у постановці задачі з'являються нові цілі величини

$$y_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{w_i} \right\rceil, \quad i = 1,2,...,n; \quad j = 1,2,...,m,$$

які означають кількість машин на маршруті (i, j).

Цільова функція задачі набуває вигляду

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} c_{ij} y_{ij} \to \min .$$

Інший тип обмежень – обмеження пропускної спроможності маршруту (i,j). У цьому випадку до обмежень задачі додаються нерівності

$$x_{ij} \le \mu_{ij}, \quad i = 1,2,...,n; \quad j = 1,2,...,m .$$

Транспортні задачі такого типу розглядалися в роботах [49].

Розглянемо докладніше ще один тип транспортної задачі з обмеженнями на кількість можливих постачальників.

Доставка з одним постачальником.

Припускатимемо, що запаси в точках виробництва необмежені. У найпростішому випадку постачання точку споживання може здійснюватися лише одним постачальником.

Вартість перевезення необхідного обсягу товару із пункту виробництва i до пункту споживання j – величина c_{ij}. Допустимий розв'язок задачі в цьому випадку описуватиметься матрицею $(x_{ij})_{i=1\,j=1}^{n\ \ m}$, в якій кожен елемент

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо товар передається від постачальника } i \text{ до споживача } j; \\ 0 \text{ в іншому випадку.} \end{cases}$$

Цільова функція задачі у цьому випадку має вигляд

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \to \min$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad j = 1,2,\ldots,m,$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}.$$

Ця задача може розглядатися як задача на повному дводольному графі $G = K_{n,m}$. Кожному ребру (i,j) цього графа приписано вагу c_{ij} . Допустимим розв'язком задачі є вершинне покриття графа G зірками таким чином, щоб центри зірок збігалися з вершинами, які відповідають пунктам виробництва, а висячі вершини на кінцях променів збігалися з вершинами, відповідними пунктам споживання. Допустимий розв'язок будемо називати Star_1-покриттям (рис.3.2).

Вагою зірки називатимемо суму ваг її ребер, а вагою Star_1-покриття – суму ваг зірок, які входять до цього покриття. Тоді задача полягає у відшуканні такого покриття графа G зірками, вага якого мінімальна.

Покажемо тепер, що задача може бути зведена до задачі безумовної оптимізації на множині перестановок S_{mn} з mn елементів.

Побудуємо алгоритм, який по перестановці з mn елементів будує допустимий розв'язок задачі та визначає значення цільової функції.

На початковому кроці перенумеруємо ребра графа G числами 1,2,…, mn. Обираємо перестановку $s \in S_{mn}$. Проглядаємо послідовно елементи тієї перестановки.

Нехай на черговому кроці елементу перестановки відповідає ребро (*i*,*j*) графа *G*. Якщо пункт споживання з номером *j* ще не має постачальника, то

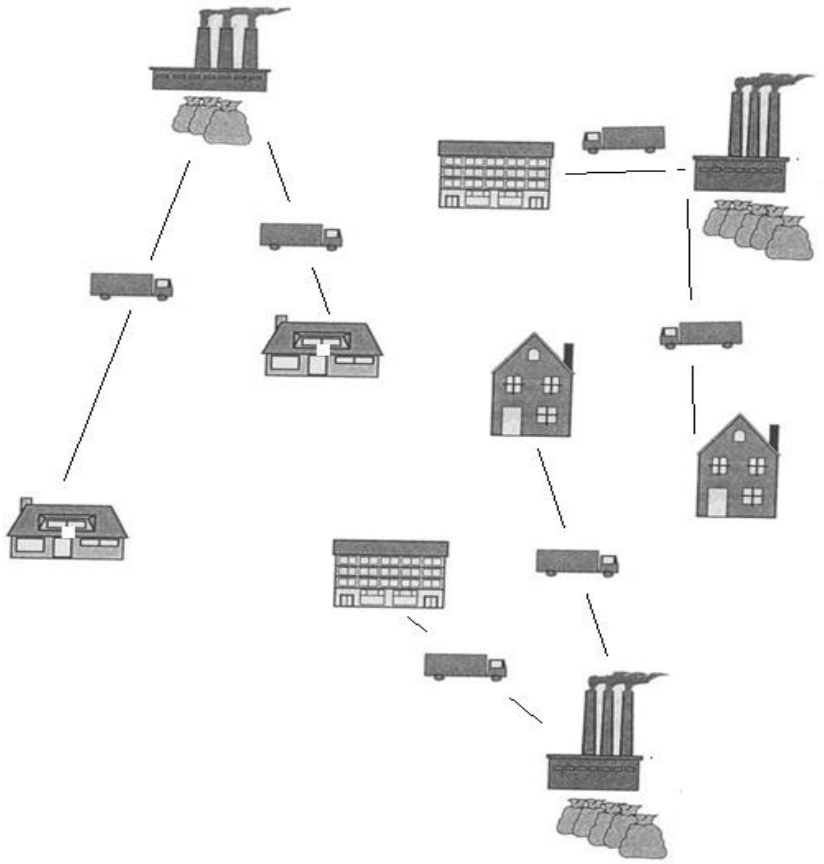


Рисунок 3.2 – Схема перевезень у $Star_1$-покритті

призначаємо для нього постачальника з номером *i* та приєднуємо ребро (*i*,*j*) до промінів зірки з центром в точці *i*. В іншому випадку переходимо до наступного кроку.

Алгоритм завершує роботу або коли всі елементи перестановки *s* будуть проглянути, або коли кількість обраних ребер буде дорівнювати *m*. Результатом роботи алгоритму буде покриття графу *G* зірками, яке є допустимим покриттям в задачі, що розглядається. Вага цього покриття – є значення цільової функції задачі. Алгоритм будемо називати *$Star_1$-алгоритмом*. Таким чином завдяки побудованому алгоритму визначено функцію, яка відображає множину

перестановок S_{mn} з mn елементів в множину допустимих розв'язків задачі, що розглядається.

Покажемо тепер, що будь який допустимий розв'язок задачі може бути побудований алгоритмом, що описаний вище.

Перенумеруємо ребра графа G числами 1,2,…, mn. Нехай маємо допустимий розв'язок задачі, який складається із послідовності ребер, що мають номери $k_1, k_2, ..., k_m$. Беремо будь-яку перестановку з S_{mn}, яка починається з чисел $k_1, k_2, ..., k_m$. Тоді на перших m кроках Star_1-алгоритму буде побудовано потрібний допустимий розв'язок.

Як наслідок цього, і оптимальний розв'язок задачі може бути отримано за рахунок відповідного вибору перестановки Star_1-алгоритмом.

Доставка з фіксованим числом постачальників.

В умовах попередньої задачі в якості додаткового обмеження додаємо обмеження на фіксоване число постачальників товарів. Економічний сенс такої постановки задачі передбачає резервування шляхів доставки продукції. Формально задача ставиться таким чином: знайти набір змінних $(x_{ij})_{i=1\,j=1}^{n\;\;m}$, для якого досягається мінімум цільової функції

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \to \min$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = q, \quad j = 1,2,...,m,$$

$$x_{ij} \in \{0,1\},$$

де q – задане ціле додатне число.

Ця задача також може розглядатися як задача на повному зваженому дводольному графі $G = K_{n,m}$. Допустимим розв'язком задачі є такий набір зірок з центрами, які відповідають пунктам виробництва, що висячі вершини на кінцях променів збігалися з вершинами, відповідними пунктам споживання, причому кожний пункт споживання є інцидентним рівно q промінням цих зірок. Допустимий розв'язок цієї задачі будемо називати *Star$_q$-покриттям* (рис. 3.3).

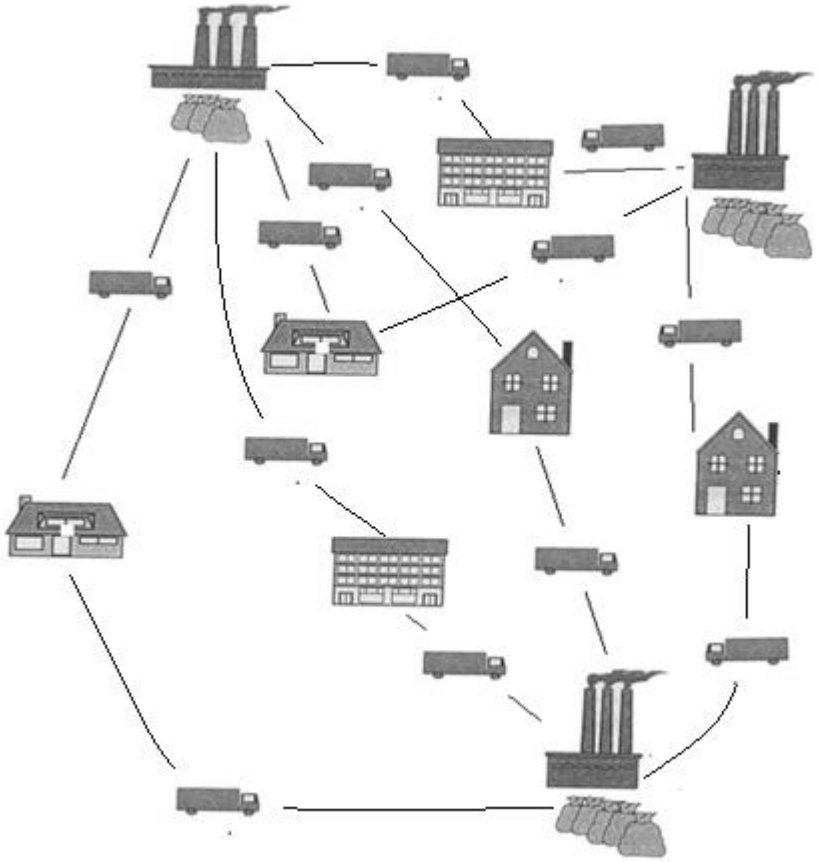


Рисунок 3.3 – Схема перевезень у Star$_q$-покритті

Тоді задача полягає у знаходженні такого допустимого покриття графа G, вага якого мінімальна.

Задача пошуку оптимального Star$_q$-покриття також може бути зведена до задачі безумовної оптимізації на множині перестановок S_{mn} з mn елементів.

Алгоритм, що будує по заданій перестановці $s \in S_{mn}$ допустимий розв'язок задачі у вигляді Star_q-покриття будемо називати Star_q-алгоритмом.

Цей алгоритм практично співпадає зі Star_1-алгоритмом. Побудуємо цей алгоритм.

На початковому кроці перенумеруємо ребра графа G числами 1,2,…,mn. Обираємо перестановку $s \in S_{mn}$. Проглядаємо послідовно елементи тієї перестановки.

Нехай на черговому кроці елементу перестановки відповідає ребро (i,j) графа G. Якщо пункт споживання з номером j ще не має постачальника або кількість постачальників менше за q і серед постачальників немає постачальника з номером i, то призначаємо для нього постачальника з номером i та приєднуємо ребро (i,j) до промінів зірки з центром в точці i. В іншому випадку переходимо до наступного кроку. Алгоритм завершує роботу або коли всі елементи перестановки s будуть проглянути, або коли кількість обраних ребер буде дорівнювати qm.

За аналогією з попередньою задачею можна показати, що будь-яке Star_q-покриття може бути отримано з деякої перестановки $s \in S_{mn}$ шляхом використання Star_q-алгоритма.

Таким чином показано, що задача доставки товарів з одним або з фіксованим числом постачальників може бути зведена до безумовної задачі пошуку оптимальної перестановки.

Звичайно, оптимальна перестановка на множині S_{mn} може бути знайдена за рахунок повного перебору всіх перестановок. Але алгоритм перебору є «важким» в обчислювальному сенсі. Тому для пошуку перестановок, близьких до оптимальної, можна використовувати різні варіанти метаевристик на множині перестановок S_{mn}. Деякі з таких метаевристик будуть розглянуті нижче.

3.2 Побудова модифікацій метаевристик на множині перестановок для розв’язання задачі доставки вантажів

Для трьох відомих [50, 51] алгоритмів побудуємо модифікації, які призначені для пошуку оптимальних перестановок.

Алгоритм випадкового локального пошуку на перестановках.

Для будь-яких двох перестановок $x=(x_1,x_2,...,x_{mn}), y=(y_1,y_2,...,y_{mn})\in S_{mn}$ *відстанню Кендала* між ними називається число, що дорівнює мінімальної кількості транспозицій сусідніх елементів, які необхідно виконати, щоб перевести одну перестановку в іншу. Позначимо відстань Кендала між перестановками $x=(x_1,x_2,...,x_{mn}), y=(y_1,y_2,...,y_{mn})\in S_{mn}$, як $\rho_{Кенд}(x,y)$.

Означення 3.1. r-околом перестановки $x_0=(x_{01},x_{02},...,x_{0mn})\in S_{mn}$ називається множина точок $O_r(x)=\{y\in S_{mn}:\ \rho_{Кенд}(x,y)\le r\}$.

Розглянемо задачу оптимізації:

$$F(x)\xrightarrow[x\in S_{mn}]{}\min$$

на множині перестановок S_{mn}

Алгоритм складається з $N\ge 1$ циклів розрахунку.

На початковому етапі кожного циклу випадково обирається точка $x_0=(x_{01},x_{02},...,x_{0mn})\in S_{mn}$. Після цього починається пошук найкращого розв’язку задачі в r-околі точки x_0. Число r обирається невеликим. Як правило, розглядаються 1-околи або 2-околи. Кількість точок K для перевірки в 1-околі перестановки обирається в межах проміжку $[1,n(n-1)/2]$, або задається у відсотках від максимальної кількості $n(n-1)/2$.

Кожний крок на черговому циклі алгоритму полягає в наступному: випадково обираються два різних цілих числа із проміжку $a,b\in[1,n]$ і виконуються транспозиція в перестановці x_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.

Цикл закінчується, якщо серед змінених точок не існує точки, для якої значення цільової функції краще ніж для початкової точки. Остання знайдена точка запам'ятовується як найкраща точка циклу.

Після вичерпання циклу вибирається найкраща по значенню цільової функції точка серед найкращих точок циклів. Ця точка і є субоптимальним розв'язком задачі.

Для пошуку випадкової точки в просторі перестановок S_{mn} використовується генератор випадкових перестановок, який реалізує алгоритм Фішера-Йетса. Пропонуємо цей алгоритм у такому вигляді.

На початку формуємо массив $a = [1, 2, ..., mn]$. Далі виконується цикл

for i = 1..mn: sw(a,i, rnd(1,i)).

Функція rnd(i,j) – дає випадкове число в діапазоні [i,j].

Функція sw(a,i,j) – змінює місцями елементи на місцях i,j в масиві a.

Кінцеве значення масиву a і є шуканою перестановкою.

Еволюційний алгоритм на перестановках

Еволюційний алгоритм на множині перестановок шукає наближений розв'язок оптимізаційної задачі $F(s) \to \min,\ s \in S_n$.

На початковому кроці алгоритму задаються наступні параметри:

K – число поколінь в еволюції;

N- розмір (число особин) у популяції;

M – число пар, що обираються на схрещування;

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

Формується початкова популяція P_0 шляхом вибору N її елементів випадковим чином за алгоритмом Фішера-Йетса. Покладемо k=0 і початкова популяція стає поточною популяцією. Для кожного елемента популяції знаходимо значення цільової функції на цьому елементі.

Покладемо k=k+1. На кроці з номером k в поточній популяції P_{k-1} обираємо випадковим чином M пар елементів для наступного схрещування. Для вибору цих елементів як правило використовуються турнірний метод при якому ймовірність вибору елемента тім більше чим більше значення цільової функції на цьому елементі.

Для обраних пар елементів застосовується оператор кросоверу

$$Cross : S_n \times S_n \to S_n,$$

який кожній парі перестановок з множини S_n ставить у відповідність перестановку з цієї ж множини. Оператор кросоверу в різних варіантах еволюційного алгоритму можуть бути визначений різними способами. Наприклад можна взяти просто добуток двох перестановок.

До кожної перестановки, що отримана в результаті дії оператору кросовера, з ймовірністю α застосовується оператор мутації

$$Mut : S_n \to S_n .$$

Одним із варіантів оператору мутації може бути оператор, що робить одну або декілька транспозицій двох елементів у перестановці.

Отримані в результаті дії операторів кросоверу та мутації перестановки додаються до поточній популяції P_{k-1} та утворюють разом з нею проміжну

популяцію. Для всіх нових перестановок розраховуються значення цільової функції.

N елементів проміжної популяції з меншим значенням цільової функції утворюють нову поточну популяцію P_k і процес повторюється.

Алгоритм закінчує роботу коли число кроків k стане дорівнювати числу K – кількості поколінь в еволюції.

Алгоритм імітації відпалу на перестановках.

У роботі [52] запропоновано метаевристику, що заснована на фізичному процесі, який нагадує процес відпалу, що застосовується в металургії. У цьому процесі метал або справ нагрівається до високої температури і охолоджується за деяким законом до кімнатної температури. Ймовірність зміни положення атома в кристалічній решітці p пов'язана з потенційною енергією решітки E і температурою T згідно із законом Максвелла-Больцмана. З цієї причини, при охолодженні металу загальна потенційна енергія решітки значно зменшується, що покращує характеристики металу.

Для пошуку розв’язку оптимізаційної задачі “знаходження точки максимуму функції $F(x)$ на множині довільної природи” метод відпалу може бути описаний таким чином:

На кожному кроці алгоритму за відповідним правилом генерації формується новий розв’язок $x \in X$. Новий розв’язок x порівнюється з поточним(найкращим) розв’язком $x^* \in X$. У тому випадку, коли розв’язок x «краще» поточного $F(x) > F(x^*)$, він вибирається в якості поточного розв’язку для наступного кроку алгоритму. У тому випадку коли цей розв’язок гірше за поточний ($F(x) < F(x^*)$), то він вибирається як поточний розв’язок з ймовірністю

$$p = \frac{1}{1 + \exp(\Delta E / T)}.$$

Параметр T – додатній параметр, який є аналогом температури, а різниця $\Delta E = F(x) - F(x^*)$ може розглядатися як зміна потенційної енергії розплаву.

Більш часто використовується наближена формула для ймовірності

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) = \exp\left(\frac{F(x) - F(x^*)}{T}\right).$$

За умови $\Delta E < 0$ величина p знаходиться у проміжку (0,1). Можливість вибору на деяких кроках алгоритму розв'язку, для якого значення цільової функції погіршується пов'язана з необхідністю уникнути передчасної збіжності до локального оптимуму. На початку роботи алгоритму імітації відпалу величина T відносно велика, що означає порівняно високу ймовірність вибрати рішення з відносно меншим значенням цільової функції. В процесі пошуку величина T зменшується за певним правилом, і через декілька ітерацій ймовірність вибрати "менш оптимальне" рішення стає значно меншою. Функцію зменшення величини $T = T_k$, як функцію від номера ітерації k, називають «функцією зменшення температури», або «функцією охолодження», за аналогією з фізичним процесом відпалу. Різні варіанти цієї функції визначають різні алгоритми імітації відпалу. Найбільш простий варіант функції охолодження - лінійна функція виду $T_{k+1} = \beta T_k$, де β - коефіцієнт охолодження. Звичайно, $0 < \beta < 1$. Іншими прикладами функції зменшення температури і правил генерації можуть бути такі:

а) Больцманівський відпал [53]: $T_k = \frac{T_0}{\ln(1+k)}$, k>0, правило генерації задається нормальним розподілом з математичним очікуванням x^* і дисперсією T_k. Тобто щільність розподілу для задачі в багатовимірному евклідовому просторі задається формулою

$$\varphi_k(x) = (2\pi T_k)^{-D/2} \exp(-|x - x^*|^2 / 2T_k),$$

де D – розмірність евклідового простору, $|x - x^*|$ - відстань між відповідними точками.. Для больцманівського відпалу доведено, що при досить великому значенні параметра T_0 і досить великій кількості кроків правило генерації гарантує знаходження глобального максимуму з будь-яким заданим ступенем точності. Недоліком алгоритму больцманівського відпалу є то, що температура зменшується дуже повільно;

б) Відпал Коші (швидкий відпал) [54]: тут $T_k = \frac{T_0}{k}$, k>0, а правило генерації задається нормованим розподілом Коші:

$$\varphi_k(x) = \frac{T_k}{\left(|x - x^*|^2 + T^2\right)^{(D+1)/2}}.$$

Існує низка інших варіантів алгоритму імітації відпалу, які, як правило, визначені на неперервному багатовимірному просторі пошуку.

Розглянемо задачу оптимізації на множині перестановок S_n. Кожній перестановці відповідає шлях комівояжера з початком в точці 0 у повному графі K_{n+1} з n+1 вершинами. Перенумеруємо вершини графа числами 0,1,2, ..., n. Кожній перестановці $s \in S_n$ відповідає значення функції $F(s)$, яке знаходиться по відповідному правилу.

Побудуємо алгоритм методу відпалу для цієї задачі, який буде складатися з наступних кроків:

Крок 0. На цьому кроці задається коефіцієнт охолодження $\beta \in (0,1)$, величина максимальної температури $T_0 > 0$ і максимальне число кроків K

алгоритму. Вибирається випадковим чином початкова перестановка вершин, яка задає маршрут $x^* = (i_1, i_2, ..., i_n)$ і обчислюється значення цільової функції $F(s)$ на цій перестановці.

Крок k $(1 \le k \le K)$. Випадковим чином обираються дві позиції s і t в поточній перестановці $x^* = (i_1, i_2, ..., i_n)$ такі, що $1 \le s < t \le n$. Будуємо нову перестановку $x^k = (i_1, i_2, ..i_{s-1}, i_t, i_{t-1} ... i_s, i_{t+1}, ..., i_n')$, в якій вершини $i_s, i_{s+1}, ..., i_{t-1}, i_t$ переставляються в зворотному порядку. Обчислюється значення цільової функції $F(x^k)$ на перестановці x^k. Обчислюється нове значення температури $T_k = \beta T_{k-1}$. Якщо $F(x^k) \le F(x^*)$, то вважаємо $x^* = x^k$ і переходимо до чергового кроку алгоритму. Якщо $\rho(x^k) > \rho(x^*)$, то обчислюємо ймовірність $p_k = \exp\left(\frac{\rho(x^*) - \rho(x)}{T_{k-1}}\right)$. Якщо $p_k > rand()$, де $rand()$ - функція, яка повертає рівномірно розподілене випадкове число в діапазоні [0,1], то вважаємо $x^* = x^k$ і переходимо до чергового кроку. В іншому випадку просто переходимо до кроку з номером $k + 1$.

Алгоритм завершує роботу, коли виконано наперед задана кількість кроків K. Поточна перестановка x^*, яка визначена на останньому кроці, і розглядається як оптимальний розв'язок задачі.

У модифікаціях цього алгоритму можуть бути змінені: формула для функції зменшення температури та спосіб генерації розв'язку на черговому кроці.

Зауважимо, що описаний вище алгоритм розв'язує задачу відшукання оптимальної перестановки з n елементів на множині всіх таких перестановок з цільовою функцією $F(x)$, яка задана на множині перестановок. Цей алгоритм може бути узагальнено на широкий клас дискретних оптимізаційних задач, у тому числі на варіант транспортної задачі, що розглянуто вище.

3.3 Розробка методу пошуку наближеного розв’язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників та його програмна реалізація

На основі застосування запропонованих (модифікованих) алгоритмів на перестановках побудуємо метод пошуку наближеного розв’язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників. Цей метод складається із наступних етапів.

Етап 0. Визначаються умови задачі, серед яких присутні такі складові:

– опис пунктів постачання, які задаються своїми координатами

$$(X_i^{пост}, Y_i^{пост}), \quad i = 1, 2, ..., m;$$

– опис пунктів отримання, які задаються своїми координатами

$$(X_j^{отр}, Y_j^{отр}), \quad j = 1, 2, ..., n;$$

– окремо можуть бути задані вартості перевезень w_{ij} з кожного пункту постачання до кожного пункту отримання товару;

– кількість постачальників K (однакова для всіх пунктів отримання);

– кожний допустимий розв’язок задачі задається набором пар

$$A = \{(i, j)\} \subseteq \{1, 2, ..., m\} \times \{1, 2, ..., n\};$$

– значення цільової функції визначається формулою

$$W(A) = \sum_{(i,j) \in A} w_{ij}.$$

Етап 1. Переходимо до простору перестановок S_{mn}, кожна з яких визначає допустимий розв'язок задачі по алгоритму, що було описано вище. Визначаємо метаевристику на перестановках, яка буде використовуватися для пошуку наближеного розв'язку транспортної задачі.

Етап 2. Використовуючи обрану метаевристику знаходимо субоптимальну перестановку $s \in S_{mn}$.

Етап 3. Якщо метаевристика не співпадала з алгоритмом локального пошуку, проводимо покращення перестановки за рахунок використання алгоритму локального пошуку на перестановці *s*.

Етап 4. По перестановці *s* знаходимо розв'язок транспортної задачі.

Перейдемо до *Програмної реалізації методу.*

Для реалізації методу пошуку наближеного розв'язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників на базі застосування Visual Basic for Application та СУБД MS ACCESS розроблено комп'ютерну програму «Метаеврістики. Задачі маршрутизації» (фрагменти тексту програми наведено в Додатку А). Головне вікно програми наведено на рис. 3.4.

Основні вимоги до обладнання та програмного середовища наступні:

Процессор с частотою не нижче 2 Мгц.

Об'єм оперативної пам'яти не менше 512 Мб

Об'єм дисковой пам'яти не менше 50 Мб

Операційна система: WINDOWS 7/10/11

Наявність СУБД: ACCESS 2007-2016

Запуск системи здійснюється подвійним натисканням лівої кнопки миші на файлі TR1.mdb. Для початку роботи системи потрібно натиснути кнопку «Старт».

Для закінчення роботи використовується кнопка виходу або закриття вікна.

На рис. 3.5 наведено робоче вікно програми.

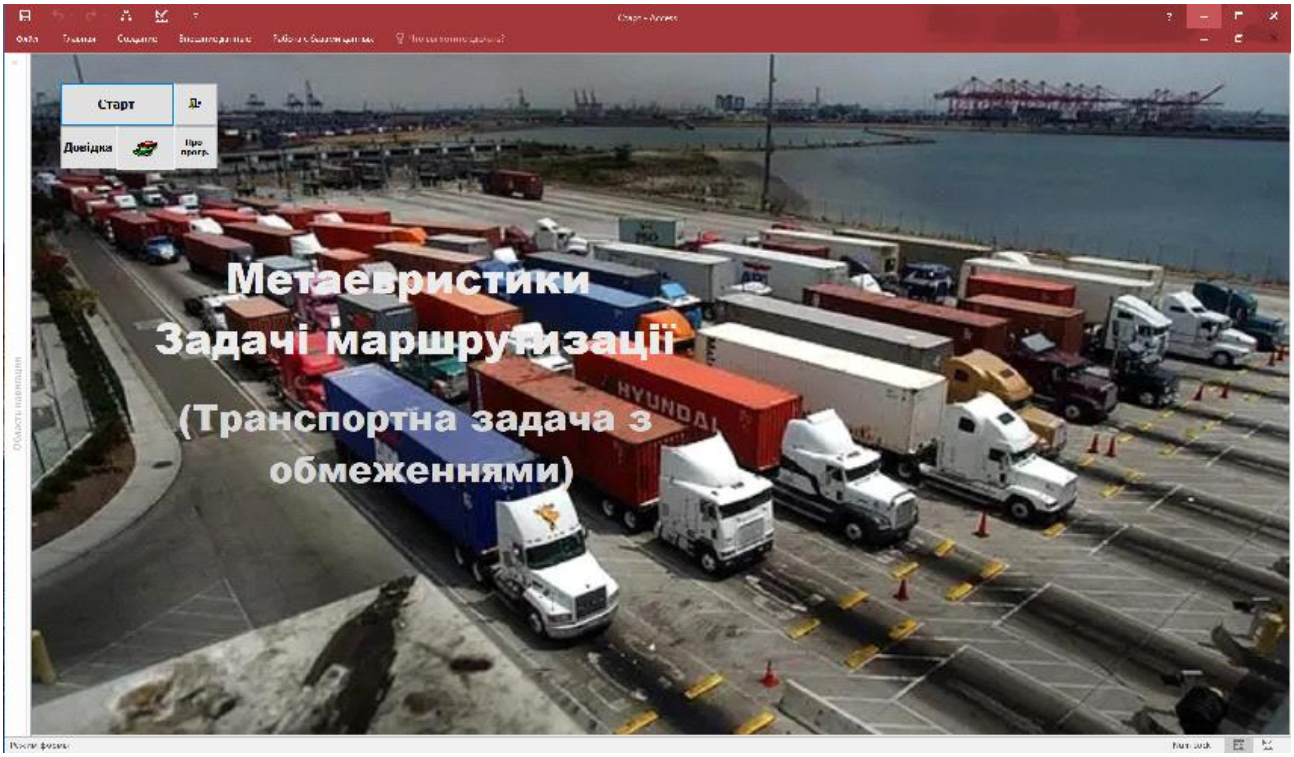


Рисунок 3.4 – Головне вікно програми «Метаеврістики. Задачі маршрутизації»

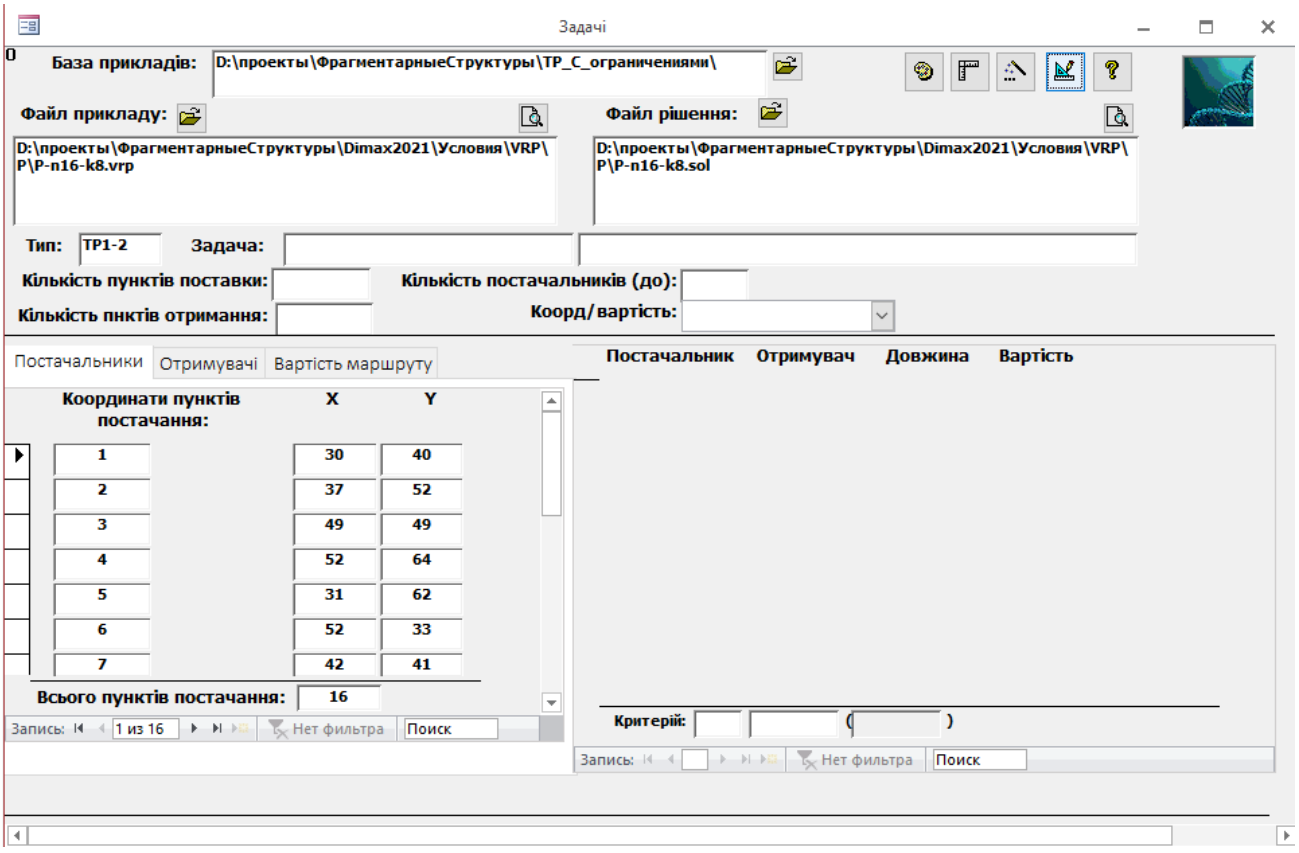


Рисунок 3.5 – Робоче вікно програми «Метаеврістики. Задачі маршрутизації»

У цьому вікні можна обрати умови задачі з тих, що раніше були збережені у текстових файлах. Приклад структури файлів вхідних та вихідних даних задачі транспортних перевезень наведено у Додатку Б.

У робочому вікні можна виконати такі операції:

а) згенерувати (а потім зберегти) умови задачі за допомогою генератору випадкових задач;

б) обрати метаевристику для пошуку оптимальної перестановки;

в) запустити метод розв’язку задачі;

г) вивести у графічному вигляді результати розрахунку (приклад виводу наведено у Додатку В).

Генератор випадкових задач

В програмну систему вбудовано генератор випадкових задач, за допомогою якого можна генерувати низку задач різного розміру для перевірки можливостей системи. Для запуску генератора потрібно в робочому вікні системи натиснути кнопку .

Після цього буде відкрито вікно генератора, в якому потрібно задати параметри генерації. А саме: потрібно указати діапазони, в яких випадково обирається кількість пунктів постачання та кількість пунктів отримання в транспортній задачі. Вводяться діапазони, в яких обираються декартові координати пунктів постачання та отримання. Потрібно також вказати кількість постачальників для кожного пункту отримання рис. 3.6.

Після натискання кнопки  генеруються умови задачі, що обираються випадковим чином в заданих діапазонах. Кількість постачальників потрібно указати, як ціле позитивне число (безумовно, кількість постачальників не повинна перевищувати кількість пунктів постачання).

Умови задачі можна зберегти у текстовому файлі з розширенням tsk шляхом натиснення кнопки .

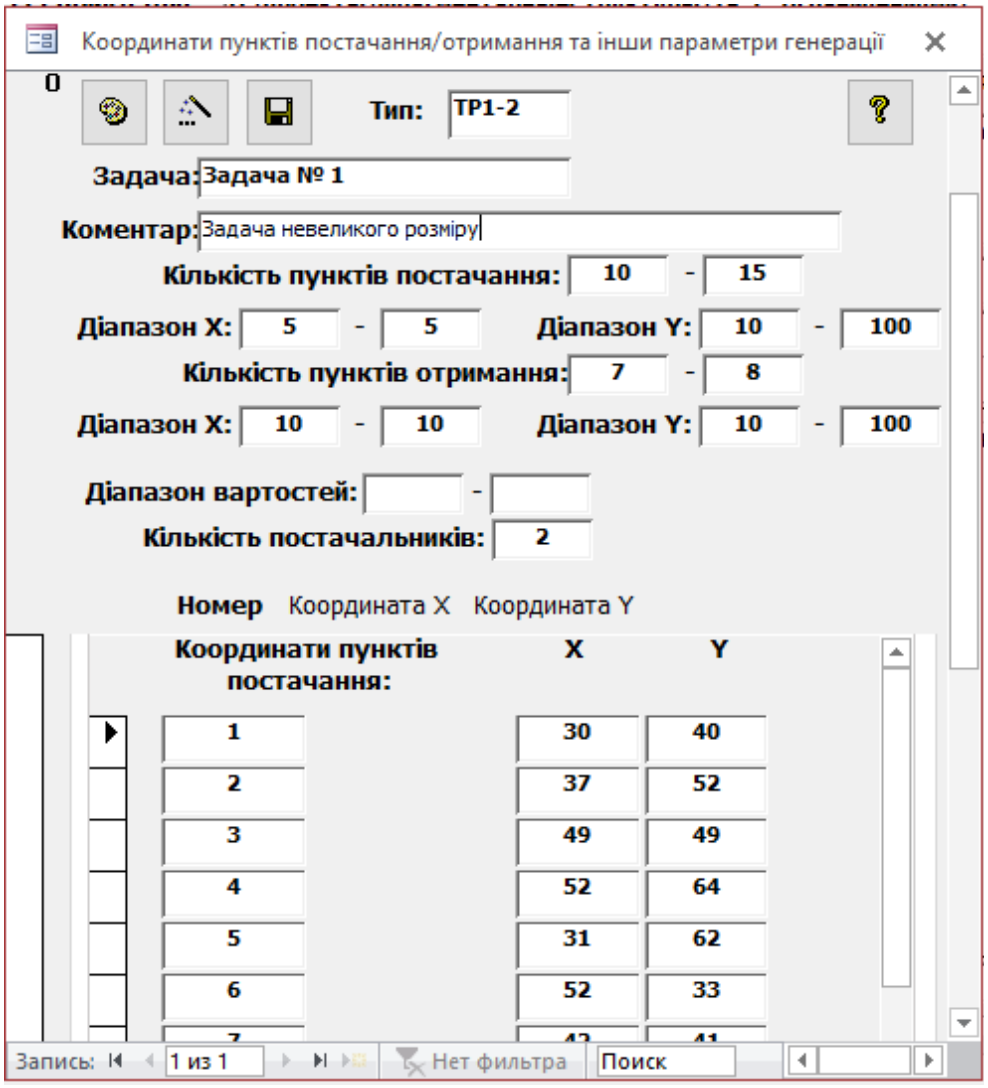


Рисунок 3.6 – Вікно генератора випадкових задач

Розроблена комп’ютерна програма «Метаевристики. Задачі маршрутизації» може бути використана в існуючих системах підтримки прийняття рішень в галузі транспортних перевезень.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено значення, особливості та тенденції розвитку транспортних перевезень в економіці України та світу. Виявлено, що ключем до успіху в транспортному бізнесі є забезпечення рентабельності, гнучкості та ефективності наданих послуг. Саме тому компанії повинні впроваджувати сучасні стратегії та тенденції в цій галузі, щоб конкурувати з іншими учасниками ринку. У роботі проаналізовано основні тренди у транспортної галузі 2024 р., а також розглянуто узагальнену класифікацію задач транспортних перевезень. Виявлено, що головна спільна риса у різних задач транспортних перевезень – зосередженість у розгляді одного або декількох обмежень (характеристик), що повинно бути відображено у відповідній математичній моделі.

Огляд математичних моделей та методів розв’язання задач транспортних перевезень дав змогу проаналізувати класифікацію найпоширеніших алгоритмів, серед яких виділено точні, наближені, евристичні, метаевристичні. Аналіз останніх досліджень свідчить, що існує тенденція до розвитку методів, які мають гібридний характер, є наближеними та поєднують використання різних метаевристик для досягнення кращих результатів, особливо при розв'язанні задач транспортних перевезень. Такий підхід дозволяє максимально використати переваги кожного методу.

Аналіз існуючих систем управління транспортними перевезеннями дав змогу зробити висновок, що на сьогодні існують ряд програмних продуктів, які спрямовані на розв’язання цих задач, забезпечуючи інструменти для планування, аналізу та оптимізації транспортних операцій. Існуюче програмне забезпечення надає потужні інструменти для розв’язання задач транспортних перевезень, проте розвиток технологій та зростання вимог бізнесу стимулюють подальший пошук та впровадження нових рішень. Комбінація вже відомих алгоритмів та їх модифікацій з використанням сучасних технологій може стати ключем до

підвищення ефективності логістичних процесів та конкурентоспроможності компаній на глобальному ринку.

У результаті в роботі розглянуто змістовні постановки та математичні моделі транспортної задачі з урахуванням додаткових обмежень, доведено, що задача доставки товарів з одним або з фіксованим числом постачальників може бути зведена до безумовної задачі пошуку оптимальної перестановки на множині перестановок. Для розробки методу розв'язання такої задачі удосконалено три відомих алгоритми (евристики) – випадкового локального пошуку, імітації відпалу та еволюційного алгоритму – для пошуку оптимальних перестановок.

На основі використання модифікацій цих алгоритмів побудовано метод пошуку наближеного розв'язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників.

Розроблений метод пошуку наближеного розв'язку транспортної задачі з обмеженнями на кількість постачальників реалізовано в програмному середовищі Visual Basic for Application та СУБД MS ACCESS – розроблено комп'ютерну програму «Метаевристики. Задачі маршрутизації».

Програмна реалізація розробленого методу може бути використана в існуючих системах підтримки прийняття рішень в галузі транспортних перевезень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ

1. Stanković M. The economic importance of transportation sector. *Knowledge International Journal*. 2021. 47(1). P. 143–146.

2. Transport and the economy: The relationship between transport and the economy. Greener Vision. URL: https://greener-vision.com/guidance-tool/relationship-between-transport-economy/ (дата звернення 25.09.2024).

3. Jean-Paul Rodrigue. The Geography of Transport Systems. 6th ed. New York: Routledge, 2024, 402 p. URL: https://transportgeography.org/contents/chapter3/transportation-and-economic-development/.

4. Буковський А. «Європейський зелений курс» та залізниця: як зробити ринок вантажних перевезень України більш «зеленим». *BRDO-Офіс ефективного регулювання*. URL: https://brdo.com.ua/analytics/21368/# (дата звернення 27.09.2024).

5. Shramenko N., Shramenko V., Solarov O. Analysis of the freight transportation market of Ukraine. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. № 1 (16). С. 30 -35.

6. Транспорт України : статистичний збірник. Київ: Державна служба статистики України, 2022. 114 с. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/10/zb_Transpot.pdf.

7. Ринок вантажних перевезень у 2022 році. TradeMasterGroup, 23 січня 2023. URL: https://trademaster.ua/articles/313620 (дата звернення 20.09.2024)..

8. Калініченко О.П. Застосування цифрових технологій при міжнародних перевезеннях вантажів. *Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здоб. вищої освіти і молод. учен*. ХНАДУ (Харків, 10 листопада). Харків, 2021. С. 179–183.

9. Прокудін Г.С., Чупайленко О. А., Дудник О.С., Прокудін О.Г. Шляхи

вирішення проблем управління вантажопотоками в транспортних системах України. *Вісник Східно-українського національного університету імені Володимира Даля*. 2020. № 5 (261). С. 33–39.

10. Деркач Е. М. Правові питання лібералізації міжнародних перевезень вантажів автомобільним транспортом. *Київський часопис права*. 2022. № 1. 73–79.

11. Мокряков А. Ринок вантажних перевезень в Україні: результати останніх досліджень та прогнози. 07.12.2022 URL: https://logist.fm/publications/rinok-vantazhnih-perevezen-v-ukrayini-rezultati-ostannih-doslidzhen-ta-prognozi.

12. Кукуруза Г. Як вантажівки «вивозять» логістику у війну. URL: https://www.epravda.com.ua/olumns/2023/02/8/696834 (дата звернення 12.09.2024).

13. Лучникова Т. Міжнародні вантажні перевезення територією України в умовах війни. *Товари і ринки*. 2022. № 3. С. 37–46.

14. Бєлашов Є. Роль наземного транспорту у стійкості міжнародних перевезень вантажів в умовах війни з РФ. *Національний інститут стратегічних досліджень*. URL: https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/rol-nazemnoho-transportu-u-stiykosti-mizhnarodnykh-perevezen-vantazhiv-v (дата звернення 15.09.2024).

15. Ринок вантажних перевезень в Україні – огляд від Pro-Consulting. URL: https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-gruzovyh-perevozok-v-ukraine-obzor-ot-pro-consulting (дата звернення 10.09.2024).

16. Вантажні залізничні перевезення: підсумки 2023 та плани на 2024 рік. URL: https://cfts.org.ua/infographics/vantazhni_zaliznichni_perevezennya_pidsumki_2023_ta_plani_na_2024_rik (дата звернення 12.09.2024).

17. Україна і ЄС на рік продовжили «транспортний безвіз». *Європейська правда*. URL: https://www.eurointegration.com.ua/news/2023/03/16/7158122/.

18. Росія вийшла із «зернової угоди». Що це означає для України та світу. *BBC News Україна*. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c72ve44j72qo.

19. Дмитрів Д., Дмитрів О., Репак О. Аналіз ринку міжнародних

вантажних автоперевезень в Україні в умовах воєнного стану. *Соціально-економічні проблеми і держава*. 2023. Вип. 2 (29). С. 48-60. URL: http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2023/23ddvuvs.pdf.

20. Топ 9 трендів транспортної галузі у 2024. URL: https://stfalcon.com/en/blog/post/transportation-industry-trends (дата звернення 12.10.2024.

21. Dantzig G.B., Ramser J.H. The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 1959. 6(1). 80-91. URL : https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80

22. Clarke G., Wright J.W. Scheduling of wehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research.* 1964. Vol. 12, No. 4 pp. 568–581.

23. Glover F., Laguna M. Tabu Search—Part I. ORSA *Journal on Computing*, 1989. 1(3):190-206. URL : https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190

24. Solomon M.M., Desrosiers J. Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems. 1988. pp. 1–13.

25. Solomon M.M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints . *Operations Research*. 1987. Vol. 35, No. 2. pp. 254–265.

26. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics*. 1996. Vol. 26, No. 1. pp. 29–41.

27. Toth P., Vigo D. (Eds.). The Vehicle Routing Problem. Philadelphia: SIAM, 2002. 367 p.

28. Pisinger D., Ropke S. A General Heuristic for Vehicle Routing Problems. *Computers & Operations Research*. 2007. Vol. 34, No. 8. pp. 2403–2435.

29. Gendreau M., Potvin J.-Y. (Eds.). Handbook of Metaheuristics. 2nd ed. New York: Springer, 2010. 604 p.

30. Gendreau M., Potvin J.-Y. Metaheuristics in Combinatorial Optimization. *Annals of Operations Research*. 2005. Vol. 140, No. 1. pp. 189–213.

31. Montoya-Torres J.R. et al. A Literature Review on the Vehicle Routing Problem with Multiple Depots. *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Vol. 79. pp. 115–129.

32. Sbihi A., Eglese R.W. Combinatorial Optimization and Green Logistics. *Annals of Operations Research*. 2010. Vol. 175, No. 1. pp. 159–175.

33. Sebastian, R., & Andreas, B. Heuristics for vehicle routing problems with backhauls, time windows, and 3D loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 2018. 266, 3, 877–894.

34. Baozhen Yao & Bin Yu & Ping Hu & Junjie Gao & Mingheng Zhang. An improved particle swarm optimization for carton heterogeneous vehicle routing problem with a collection depot. *Annals of Operations Research.* 2016. vol. 242(2), pp. 303-320.

35. El-Sherbeny N.A. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*. 2010, Jul. vol. 22. no. 3. pp. 123–131.

36. Lijun W., Zhenzhen Z. Defu Zh. & Andrew L. A variable neighborhood search for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*. 2015. vol. 243(3), pp. 798-814.

37. Zachariadis E. E., Tarantilis C. D., Kiranoudis C. T. The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries and Two-Dimensional Loading Constraints. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 251, Issue 2, pp. 369-386.

38. Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Koç E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. The Bees Algorithm — A Novel Tool for Complex Optimisation Problems, Editor(s): D.T. Pham, E.E. Eldukhri, A.J. Soroka, *Intelligent Production Machines and Systems*, Elsevier Science Ltd, 2006, pp. 454-459. URL : https://doi.org/10.1016/B978-008045157-2/50081-X

39. IBM. IBM Sterling Transportation Management System URL: https://www.ibm.com/products/sterling-transportation-management.

40. Esri. ArcLogistics URL: https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-roadroutes.

41. SAP. SAP Transportation Management URL: https://www.sap.com/products/transportation-management.html.

42. Oracle. Oracle Transportation Management URL: https://www.oracle.com/industries/transportation/.

43. Route4Me. Route4Me Route Planner URL: https://route4me.com.

44. PTV Group. PTV Map&Guide URL: https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-mapandguide.

45. Toth P., Vigo D. (Eds.). Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. 2nd ed. Philadelphia: SIAM, 2014. 463 p.

46. Gendreau M., Potvin J.-Y. Metaheuristics in Combinatorial Optimization // Annals of Operations Research. 2005. Vol. 140, No. 1. pp. 189–213.

47. Sbihi A., Eglese R.W. Combinatorial Optimization and Green Logistics // Annals of Operations Research. 2010. Vol. 175, No. 1. pp. 159–175.

48. Максишко Н.К. Негрей М.В. Оптимізаційні методи та моделі: навч. посіб. Київ: КОМПРИНТ, 2015. 336 с.

49. Малярець Л. М., Лебедєва І. Л., Норік Л. О. Дослідження операцій та методи оптимізації : практикум : у 2-х ч. Частина 1. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2017. 169 с.

50. Sean Luke. Essentials of Metaheuristics, Lulu, second edition, 2013. URL : https://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf

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

52. Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes. Chapter 10.12 Simulated Annealing Methods. *Art of Scientific Computing*. W.H. Press, 2011. c. 549 -555.

53. Laarhoven P.J.M., Aarts E.H.L. Simulated Annealing: Theory and Applications. Dordrecht:Springer, 1987. 187 p. URL : https://doi.org/10.1007/978-94-015-7744-1

54. Szu H. H., Hartley R. L. Fast Simulated Annealing. Physical Letters A. 122. 1987. P. 157-162. URL : https://doi.org/10.1016/0375-9601(87)90796-155.

ДОДАТОК А

Фрагмент тексту комп’ютерної програми «Метаеврістики. Задачі маршрутизації»

Алгоритм локального пошуку

```
Function ItLocalPoisk(Nit0 As Long, OkrLoc0 As Integer, PoiskLoc0 As Double, _
        CondLoc0 As Integer, TypeLoc0 As Integer, vis As Boolean) As String
Dim arva As Variant, arv0 As Variant, Prb() As Long, arrPrb0() As Variant
Dim i As Long, j As Long, k As Long, mrem1 As String
Dim i0 As Long, j0 As Long, k0 As Long, mlg0 As Boolean, mlg As Boolean
Dim cr1 As Variant, Cr0 As Variant, stopC As Boolean, flp As Boolean
Dim strcrit0 As String, strCrit1 As String, Nrev As Long
'ÊÎÍ-ÂÎ ØÀÃÎÂ
stopC = False
flp = False
Select Case OutOkrloc
Case 0
 Nrev = OutNfrag
Case 1, 2
 Nrev = OutNfrag * (OutNfrag - 1) / 2
Case 3
 Nrev = OutNfrag * (OutNfrag - 1) * (OutNfrag - 2) / 6
End Select
If PoiskLoc0 > 0 Then
 If PoiskLoc0 <= 100 Then
  Nrev = Vmax(0, Int(PoiskLoc0 * Nrev / 100 + 0.99))
 End If
End If
Select Case OkrLoc0
Case 0
 ReDim Prb(OutNfrag)
 ReDim arrPrb0(OutNfrag)
 For i = 1 To OutNfrag
  arrPrb0(i) = i
 Next i
Case 1, 2
 ReDim Prb(OutNfrag * (OutNfrag - 1) / 2)
 ReDim arrPrb0(OutNfrag * (OutNfrag - 1) / 2, 2)
 k = 0
 For i = 1 To OutNfrag
  For j = i + 1 To OutNfrag
   k = k + 1
   arrPrb0(k, 1) = i
   arrPrb0(k, 2) = j
  Next j
```

```
 Next i
Case 3
 ReDim Prb(OutNfrag * (OutNfrag - 1) * (OutNfrag - 2) / 6)
End Select
strcrit0 = crithrom(OutFragments)
Cr0 = Crits0
i = 1
.....
.....
Sub Trans0(i As Long, j As Long, ByRef arv As Variant)
Dim v As Long
If i <> j Then
 v = arv(i, 1)
 arv(i, 1) = arv(j, 1)
 arv(j, 1) = v
 arv(arv(i, 1), 2) = i
 arv(arv(j, 1), 2) = j
End If
End Sub


Sub Trans4opt(i As Long, j As Long, k As Long, ByRef arv As Variant)
Dim i0 As Long, j0 As Long, k0 As Long, t0 As Long, s As Long
Dim v() As Long
If i <> j And j <> k And k <> i Then
 ReDim v(OutNfrag)
 i0 = Vmin(i, Vmin(j, k))
 k0 = Vmax(i, Vmax(j, k))
 j0 = IIf(i0 < i And i < k0, i, IIf(i0 < j And j < k0, j, k))
 For s = 1 To OutNfrag
  v(s) = arv(s, 1)
 Next s
 t0 = i0 + (OutNfrag - k0)
 For s = i0 To t0
  arv(s, 1) = v(k0 + s - i0)
  arv(arv(s, 1), 2) = s
 Next s
 For s = t0 + 1 To t0 + k0 - j0
  arv(s, 1) = v(j0 + s - t0 - 1)
  arv(arv(s, 1), 2) = s
 Next s
 For s = i0 + OutNfrag - j0 + 1 To OutNfrag
  arv(s, 1) = v(s - OutNfrag + j0 - 1)
  arv(arv(s, 1), 2) = s
 Next s
End If
End Sub
```

```
Function adrIJ(k As Long, n As Long) As Variant
Dim arr0(2) As Long
arr0(1) = Int(k / n - 0.0001) + 1
arr0(2) = k - n * (arr0(1) - 1)
adrIJ = arr0
End Function

Function adrIJK(k As Long, n As Long) As Variant
Dim arr0(3) As Long
arr0(1) = Int(k / n / n - 0.0001) + 1
arr0(2) = Int((k - n * n * (arr0(1) - 1)) / n - 0.001) + 1
arr0(3) = k - n * n * (arr0(1) - 1) - n * (arr0(2) - 1)
adrIJK = arr0
End Function
```

Еволюційний алгоритм

```
Option Compare Database
Option Explicit


'Public outNumbEvolution As Integer  'Номер поточної еволюції
'Public outLastRecPop As Long  'остання рекордна популяція
'Public outFirstRecPop As Long  'перша рекордна популяція


'Описание ЭВФ-алгоритму
Private Hroms() As Variant, IndHroms() As Integer
'Hroms() - масив популяції
'Hroms(.,1) - перестановка+індекси перестановки
'Hroms(.,2) - значення критеріїв
'Hroms(.,3) – розв'язок
'Hroms(0,i) - розмірності відповідних масивів
'IndHhroms() - індексний масив
'Область видимості масивів - модуль
Private Lider As Variant, Lider_Crits As Variant
Private Prob() As Double
' Prob() – розподіл ймовірностей при відборі елементів для кроссовера

' out_Solution() As Variant, out_Crits As Variant
'Function EVFFrogAlg(Nk As Integer, Np As Integer, Nalg As Integer, btm As Long, nh As Long, _
        Ahrom As Long, AhromD As Long, Apair As Long, Agen As Long, TpCross As Integer, TpMut As Integer, nMut As Integer, pMut As Double, _
        ProbH As Double, ProbS As Double, FlagElite As Integer, sStabExit As Boolean) As String
Function EVFFrogAlg(btm As Long, nh As Long, _
```

```
                sVstep As Long, sNgroupsF As Integer, sDimGroupF As Integer, Vord As Integer,
sNdop As Long, sBestF As Integer, _
                sVfam0 As Long, sTypeMut As Integer, sNmut0 As Integer, sProb0 As Double, _
                ProbH As Double, Probs As Double, _
                sTypeCrossF As Integer, sStabExit As Boolean, _
                sBalance As Double, sBalance1 As Double, LevStab As Double) As String
.....
.....
```

```
Private Sub Jump0(s As Variant, h As Variant, n As Long)
Dim i0 As Long, j0 As Long, i As Long, j As Long, k As Long
Dim j1 As Long, j2 As Long, k0 As Long
i = 1 + Round0(Rnd() * (n - 1), 0)
j = 1 + Round0(Rnd() * (n - 1), 0)
i0 = Vmin(i, j)
j0 = Vmax(i, j)
For i = 1 To n
 If i < i0 Or i > j0 Then
  s(i, 1) = h(i, 1)
 Else
  s(i, 1) = h(j0 - i + i0, 1)
 End If
 s(s(i, 1), 2) = i
Next i
End Sub
```

ДОДАТОК Б

Приклад структури файлів вхідних та вихідних даних задачі транспортних перевезень

Приклад структури файлу умов задачі

```
NAME:P-n16-k8
COMMENT:(Augerat et al, No of trucks: 8, Optimal value: 450)
TYPE:CVRP
DIM_SUPPLIERS:5
COORD_SUPPLIERS_SECTION
1 1 4
2 14 3
3 8 13
4 10 3
5 1 5
DIM_RECIPIENT:5
COORD_RECIPIENT_SECTION
1 3 17
2 9 12
3 9 10
4 8 2
5 14 7
NUMBER_SUPPLIERS:2
PROC_EDGES:70
NUMBER_ROUTES:21
COSTS_SECTION
1 1 22
1 2 15
1 3 43
1 4 14
1 5 35
2 1 3
2 2 38
2 3 7
2 4 33
2 5 31
3 1 20
3 2 30
3 3 34
3 4 6
3 5 40
```

4 1 36
4 4 17
5 1 18
5 2 26
5 4 20
5 5 28
COORD-COST:1
EOF

Приклад структури файлу розв’язку

NAME:P-n16-k8
1 1 4
2 2 1
3 1 2
4 3 4
5 5 1
6 2 3
7 5 5
8 3 3
9 2 5
10 5 2
Cost: 182
EOF

ДОДАТОК В

Приклад графічного зображення розв’язку задачі

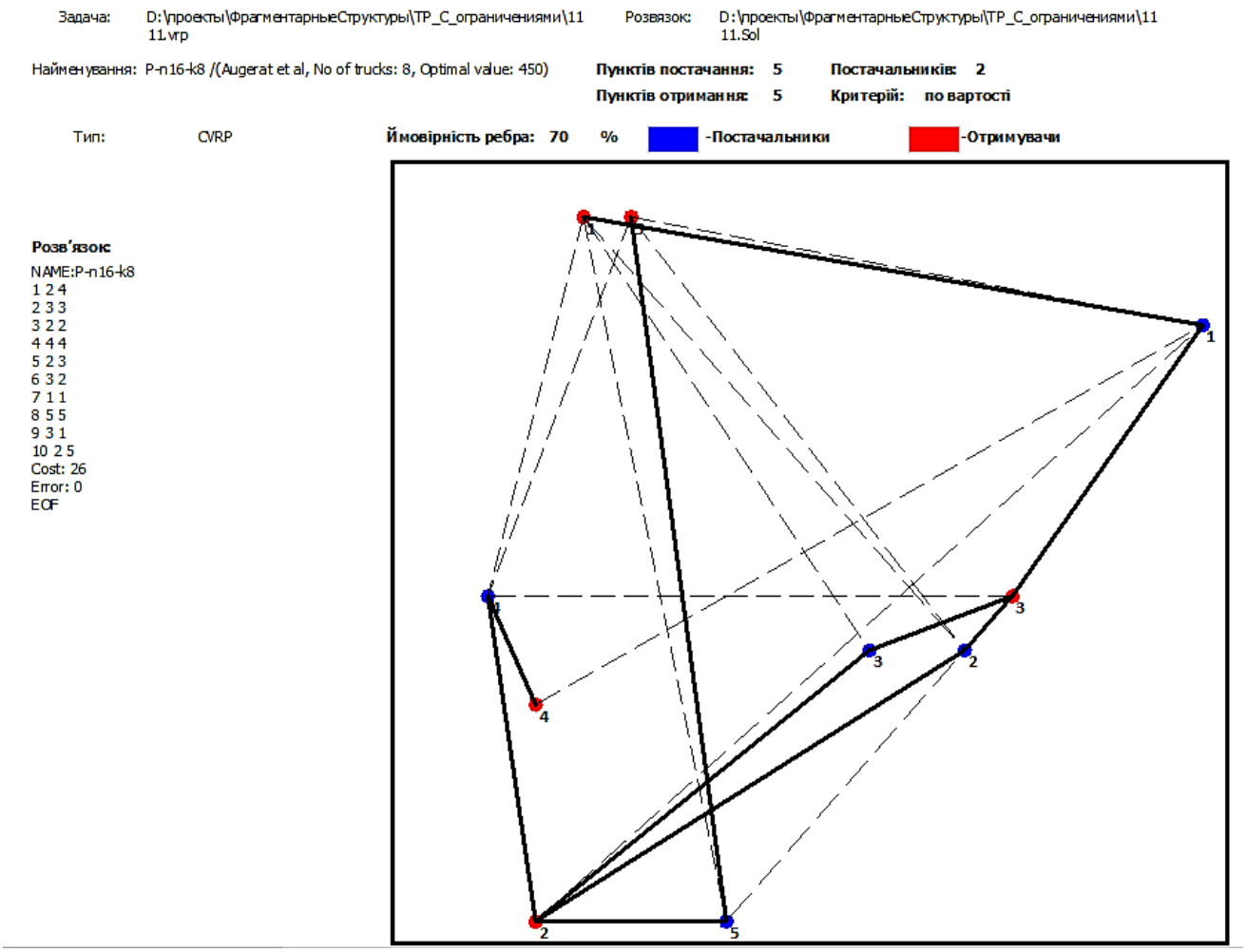


Рисунок В.1 – Приклад графічного зображення розв’язку задачі

Декларація академічної доброчесності

здобувача вищої освіти ЗНУ

Я___ *Тихий Данило Сергійович*, студент_ *другого* _курсу,
форми навчання __*денна*_ _, факультету___ *економічного* ____,
спеціальності_ *051 Економіка*, адреса електронної пошти tihij6322@gmail.com

- підтверджую, що написана мною кваліфікаційна робота на тему *«Моделювання процесу доставлення вантажів автомобільним транспортом в умовах обмежень»*
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;
- згоден/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) _____*Тихий Д. С*.

Дата_____ Підпис_____ ПІБ (наук. керівник) *Максишко Н.К*.