

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Факультет інформаційних технологій
(факультет)

Кафедра системного аналізу та управління
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

Студента Могилевського Олександра Євгеновича
академічної групи 124-20-1
спеціальності 124 Системний аналіз

на тему: « Розробка математичної моделі прискореного планування перевезень
вантажів при виконанні волонтерських задач »

| Керівники | Прізвище, ініціали | Оцінка за шкалою | | Підпис |
|--------------------------|--|------------------|---------------|--------|
| | | рейтинговою | інституційною | |
| Кваліфікаційної роботи | <i>доц. Одновол М. М.</i> | | | |
| розділів: | <i>доц. Одновол М. М.</i> | | | |
| Інформаційно-аналітичний | <i>доц. Одновол М. М.</i> | | | |
| Спеціальний | <i>доц. Одновол М. М.</i> | | | |
| Рецензент | <i>проф. Алексєєв М. О.</i> | | | |
| Нормоконтролер | <i>к.ф.-м.н., доц. Хомяк Т. В.</i> | | | |

Дніпро
2024

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри

Системного аналізу та управління

(повна назва)

к.т.н., доц. Желдак Т. А.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 20 ____ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня бакалавра

студенту Могилевському О. Є. академічної групи 124-20-1

спеціальності: 124 Системний аналіз

на тему « Розробка математичної моделі прискореного планування перевезень
вантажів при виконанні волонтерських задач »

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка»

від 23.05.2024 р. №469-с

| Розділ | Зміст | Терміни виконання |
|------------------------------------|---|-------------------------------|
| 1. Інформаційно-аналітичний розділ | <i>Системний аналіз об'єкта. Постановка задачі.</i> | 11.09.2023 – 04.03.2024 |
| 2. Спеціальний розділ | <i>Розробка математичної моделі прискореного планування перевезення вантажів.</i> | 11.03.2024 – 20.06.2024 |

Завдання видано _____

(підпис)

доц. Одновол М. М.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі: 11.09.2023 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії: 25.06.2024 р.

Прийнято до виконання _____

(підпис студента)

Могилевський О. Є.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 104 сторінки, 7 малюнки, 58 таблиць, 4 додатки, 20 джерел.

Об'єкт досліджень: волонтерська організація НІ (Humanity & Inclusion).

Предмет досліджень: процес планування перевезення медикаментів волонтерською організацією НІ (Humanity & Inclusion).

Мета досліджень: підвищення ефективності перевезень вантажів при виконанні волонтерських задач.

Економічна ефективність: скорочення витрат часу на перевезення шляхом оптимізації маршрутів.

В *інформаційно-аналітичному розділі* розглянуто структуру системи логістичного планування, аналіз існуючих методів перевезення вантажів та визначення ключових параметрів, що впливають на ефективність перевезень.

В *спеціальному розділі* розроблено математичну модель прискореного планування перевезень, що враховує технічні та технологічні обмеження для оптимізації маршрутів і мінімізації витрат часу. Модель протестована у реальних умовах.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості мінімізації витрат часу на перевезення вантажів та адаптації розробленої моделі до умов конкретної організації.

Ключові слова: ЛОГІСТИКА, ЧАС, ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, МАРШРУТИ, ВОЛОНТЕРСЬКІ ЗАДАЧІ.

ABSTRACT

Explanatory note 104 pages, 7 figures, 58 tables, 4 appendices, 20 sources.

Object of research: the volunteer organization HI (Humanity & Inclusion).

Subject of research: the process of planning the transportation of medicines by the volunteer organization HI (Humanity & Inclusion).

Purpose of research: to improve the efficiency of transportation of cargo in the performance of volunteer tasks.

Economic efficiency: reduction of transportation time costs through route optimization.

The informational-analytical section describes the structure of the logistics planning system, analysis of existing freight transportation methods, and identification of key parameters affecting transportation efficiency.

In the special section, a mathematical model for accelerated transportation planning is developed, considering technical and technological constraints to optimize routes and minimize time costs. The model has been tested in real conditions.

The practical value of the obtained results lies in the possibility of minimizing transportation time costs and adapting the developed model to the conditions of a specific organization.

Keywords: LOGISTICS, TIME, TRANSPORTATION PLANNING, MATHEMATICAL MODEL, OPTIMIZATION, ROUTES, VOLUNTEER TASKS.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 6 |
| 1. РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ..... | 8 |
| 1.1 Системний аналіз об'єкту дослідження | 8 |
| 1.2 Сучасні виклики та тенденції при виконанні логістичних операцій у гуманітарній сфері | 14 |
| 1.3 Аналіз транспортної системи організації | 15 |
| 1.4 Сучасний стан вирішення проблем оптимізації логістичних процесів..... | 20 |
| 1.5 Методи вирішення логістичних задач | 23 |
| 1.6 Постановка задачі | 27 |
| Висновки до розділу | 28 |
| 2. РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛЬНИЙ | 30 |
| 2.1 Дослідження об'єкта з ціллю отримання вихідної інформації для моделювання..... | 30 |
| 2.2 Розробка математичної моделі транспортування гуманітарної допомоги | 37 |
| 2.3 Розрахунок параметрів математичної моделі з використанням прискореного алгоритму планування перевезень вантажів | 45 |
| 2.4 Порівняльний аналіз показників існуючої та запропонованої схеми транспортування..... | 83 |
| 2.5 Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимального шляху..... | 85 |
| Висновки до розділу | 87 |
| ВИСНОВОК..... | 89 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 90 |
| ДОДАТКИ..... | 92 |

ВСТУП

Успіх будь-якої організації в значній мірі залежить від ефективної взаємодії всіх її підсистем, включаючи логістику. Введення карантинних заходів через пандемію змусило економіку перейти на інший режим роботи. Окрім того, воєнний стан у країні значно вплинув на логістику, що створило додаткові виклики для забезпечення ефективного постачання товарів та послуг.

Керування логістичними операціями складне через відсутність універсальних методів обробки логістичних процесів, особливо транспортних. Це вимагає подальших досліджень і розвитку в цій сфері з метою поліпшення логістичних операцій.

Дослідження спрямоване на управління логістикою в міжнародних гуманітарних організаціях. Це дослідження має на меті зрозуміти ключові аспекти логістичних процесів та шляхи підвищення їх ефективності та адаптивності до змін.

Досліджуються як теоретичні, так і практичні аспекти управління логістикою в гуманітарних організаціях з фокусом на розробку методів оптимізації логістичних процесів та використання конкретних технологій для планування та контролю операцій. Це дослідження має на меті показати, як теоретичні концепції можуть бути застосовані на практиці для покращення управління логістикою в гуманітарних організаціях.

Метою цієї роботи є перегляд теоретичних принципів та розробка практичних рекомендацій по удосконаленню логістичного процесу для підвищення ефективності роботи гуманітарної організації. Використано різноманітні загальні та конкретні методи: прискорений алгоритм планування роботи вантажного транспорту, метод Фогеля та метод гілок та меж, для

підвищення ефективності роботи логістичної системи. Аналітична інформація була зібрана за допомогою статистичних звітів організації, матеріалів від практикуючих фахівців логістів.

Ідентифіковані основні проблеми в системі управління логістикою організації дозволили визначити та обґрунтувати заходи щодо покращення логістичних операцій. Запропоновані рекомендації, включаючи розроблений програмне забезпечення для розрахунку оптимальних маршрутів перевезень, були впроваджені на об'єкті дослідження, що дає можливість підвищити ефективність функціонування організації.

1. РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ

1.1 Системний аналіз об'єкту дослідження

НІ (Humanity & Inclusion) складається з Федерації, створеної в 2009 році, та восьми національних асоціацій, заснованих між 1982 та 2006 роками у Бельгії, Канаді, Франції, Німеччині, Люксембурзі, Швейцарії, Великій Британії та Сполучених Штатах. Логотип організації складається з малюнку руки та назви організації (Рис. 1.1).



Рис. 1.1. Логотип організації НІ (Humanity & Inclusion)

Федерація відповідає за реалізацію соціальних місій мережі в приблизно шістдесяти країнах. Вона діє під назвами "Humanity & Inclusion" або "Handicap International", залежно від країни.

Національні асоціації відомі як "Handicap International" у континентальній Європі (Бельгія, Франція, Німеччина, Люксембург та Швейцарія) та як "Humanity & Inclusion" у Канаді, Великій Британії, Сполучених Штатах та Україні. У кожній асоціації є власна рада директорів.

Федерація та національні асоціації співпрацюють для реалізації гуманітарних програм, які включають допомогу людям з інвалідністю, захист прав людини та надання невідкладної допомоги в кризових ситуаціях. Кожна асоціація відповідає за збір коштів, комунікацію та адвокацію у своїй країні, тоді як Федерація фокусується на координації та реалізації проектів на міжнародному рівні.

Організація активно діє на території України, маючи п'ять баз, стратегічно розташованих у важливих містах: Дніпрі, Харкові, Полтаві, Львові та Миколаєві. Ці бази дозволяють організації охоплювати значну частину країни та забезпечувати оперативну підтримку різним регіонам. Центральний операційний центр НІ розташований у Києві, що сприяє ефективному управлінню всіма аспектами діяльності та координації роботи різних підрозділів. Важливу роль у логістичному ланцюжку відіграють три основні склади, розміщені у Дніпрі, Харкові та Полтаві. Вони слугують ключовими пунктами зберігання і розподілу ресурсів, що дозволяє організації швидко реагувати на потреби та запити з усіх куточків країни.

Організація має складну структуру з кількох ключових відділів, кожен з яких виконує важливі функції для забезпечення спрямованості та ефективності всієї системи. Ця структура (Рис. 1.2) включає в себе два основних типи підрозділів: "Відділи підтримки" та "Відділи операцій".

"Відділи підтримки" забезпечують надійну базу для функціонування організації, надаючи всі необхідні ресурси та послуги для підтримки щоденної діяльності. Ці підрозділи працюють у тісній взаємодії, щоб забезпечити злагодженість і безперебійність процесів, створюючи сприятливі умови для виконання завдань. "Відділи операцій" зосереджені на досягненні основних цілей організації через реалізацію ключових процесів і проектів. Їхня робота є критично важливою для досягнення високих показників ефективності та результативності,

сприяючи загальному успіху організації. Обидва типи підрозділів взаємодіють між собою, формуючи єдину, добре злагоджену систему, що дозволяє організації динамічно розвиватися та адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі.

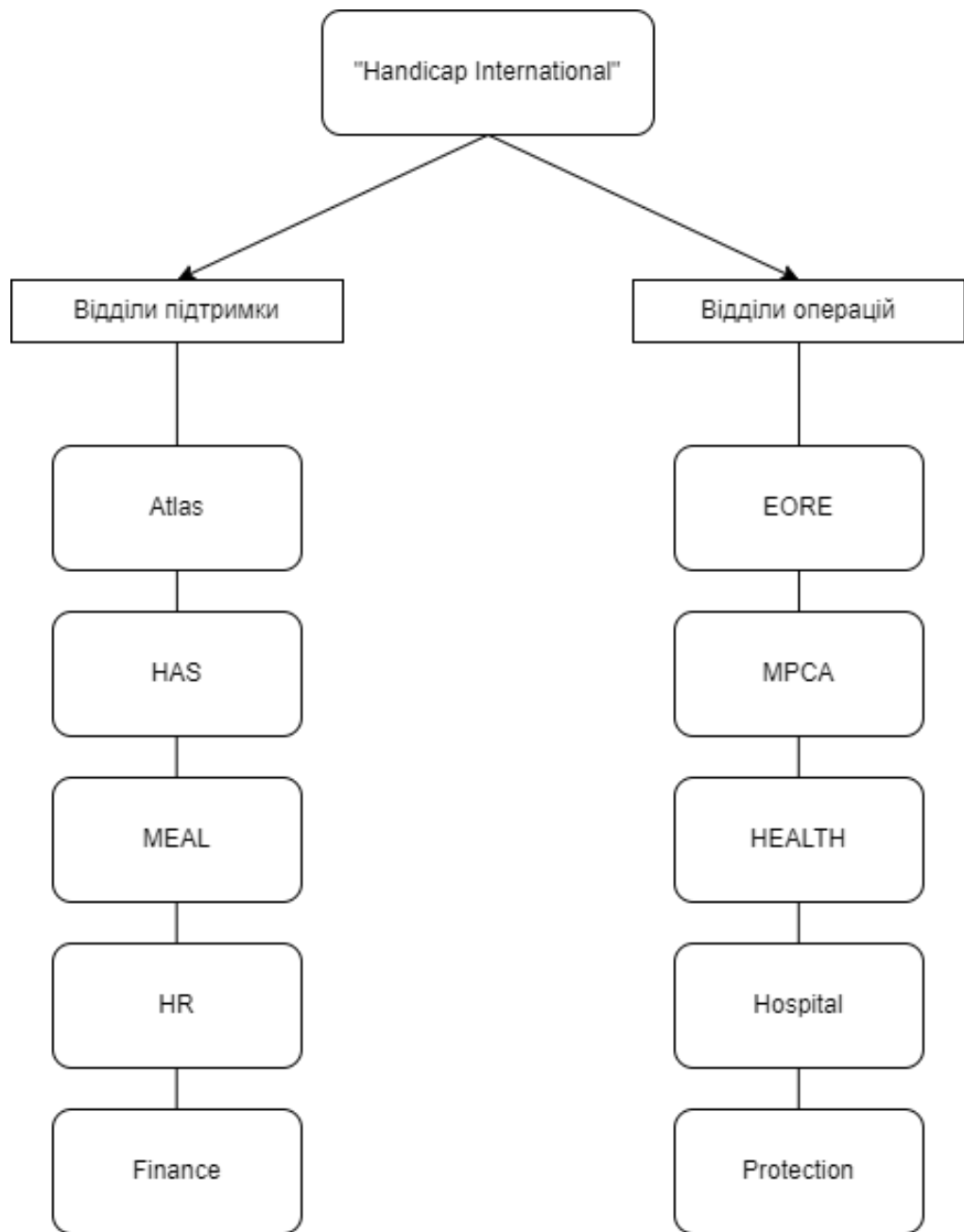


Рис. 1.2. Схема відділів HI (Humanity & Inclusion)

Відділи підтримки:

Atlas - організація переміщує ресурси та матеріальні цінності для гуманітарних операцій завдяки відділу Atlas. Це включає в себе планування та організацію доставки, складський облік та координацію транспорту.

HAS - основною метою відділу є забезпечення безпеки персоналу та бенефіціарів. Це включає розробку політик та процедур безпеки, проведення тренінгів.

MEAL - відділ відслідковує та оцінює результативність гуманітарних дій. Вони аналізують дані, щоб забезпечити ефективність програм та поліпшити надання допомоги.

HR - відділ кадрів відповідає за управління людськими ресурсами. Це включає найм, розвиток та оцінку персоналу, а також розв'язання конфліктів та підтримку розвитку корпоративної культури.

Finance - відділ фінансів відповідає за фінансове управління та забезпечення фінансової стабільності організації. Це включає бюджетування, фінансовий звіт та контроль витрат.

Відділи операцій:

EORE - відділ проводить навчання з протимінної діяльності для персоналу та громад, а також інформує про ризики пов'язані з небезпечними предметами.

MPCA - відділ надає фінансову допомогу бенефіціарам в умовах гуманітарних криз або під час відновлення.

HEALTH - ввідділ забезпечує навчання та підтримку медичного персоналу, включаючи проведення тренінгів та семінарів.

Hospital - операційний відділ забезпечує реабілітацію бенефіціарів та постачання необхідних медичних засобів.

Protection - відділ займається пошуком нових бенефіціарів та їх направленням до відповідних підрозділів.

Однією з ключових ланок у роботі "Handicap International" є логістика. Власний парк автомобілів дозволяє організації оперативно та гнучко реагувати на змінювані умови та потреби різних регіонів. Ці транспортні засоби забезпечують доставку медикаментів, гуманітарної допомоги та іншого необхідного обладнання в будь-які точки України, незалежно від складності маршруту та умов. Ефективна логістична система дозволяє НІ підтримувати високий рівень оперативності та надійності, що особливо важливо в умовах кризових ситуацій та надзвичайних обставин. Логістика відіграє ключову роль у забезпеченні стійкості та безперервності роботи НІ, що робить можливим досягнення основних цілей і завдань організації на всій території України.

Основним критерієм ухвалення рішень, пов'язаних із логістикою, у комерційних підприємствах є отримання прибутку. Для них важливо оптимізувати витрати, максимізувати дохід та забезпечити ефективне управління ресурсами. Вони використовують різні стратегії та методики для зменшення витрат на транспортування та зберігання, а також для підвищення рентабельності своїх операцій. Основна мета таких підприємств — забезпечити максимальну вигоду для акціонерів і власників бізнесу, тому їхні логістичні рішення завжди орієнтовані на економічну ефективність і фінансовий результат.

Проте для гуманітарних організацій, таких як "Handicap International", пріоритети інші. Вони не орієнтовані на отримання прибутку, тому основним критерієм ухвалення логістичних рішень для них є мінімізація часу. Гуманітарні організації працюють в умовах, коли кожна хвилина може мати вирішальне значення для порятунку людських життів. Швидка доставка медикаментів, продуктів харчування, води та інших життєво необхідних ресурсів може запобігти трагедіям і врятувати безліч людей. Час є ключовим фактором у роботі таких організацій, оскільки затримка в доставці може призвести до непоправних наслідків[8]. В умовах кризи та надзвичайних ситуацій, швидкість реагування стає головним пріоритетом, і всі логістичні операції спрямовані на забезпечення максимальної оперативності.

Тому для НІ та інших гуманітарних організацій, логістика має особливе значення. Їхні логістичні стратегії мають бути розроблені таким чином, щоб мінімізувати час доставки і забезпечити швидке реагування на будь-які надзвичайні ситуації. Це вимагає високого рівня координації, гнучкості та готовності до дій у будь-який момент. Організація повинна мати налагоджену систему комунікацій, ефективну транспортну інфраструктуру та добре підготовлений персонал, здатний швидко приймати рішення та діяти в умовах обмеженого часу.

У межах НІ, відділ "Hospital" надає медичні послуги та пожертвування різних предметів. Цей відділ відіграє важливу роль у наданні медичної допомоги в регіонах, які постраждали від криз, та постачанні необхідних ресурсів для підтримки постраждалих популяцій.

Відділ "Atlas" відповідає за транспортну логістику, контролюючи транспортування пожертвованих предметів з трьох складів до різних міст. "Atlas"

забезпечує транспортування та розподіл гуманітарного вантажу, що є критично важливим для своєчасної доставки допомоги.

У зв'язку зі змінними зовнішніми факторами та воєнним станом пропонується покращити процес знаходження оптимального транспортного маршруту. Це підвищить ефективність логістичних операцій, забезпечуючи швидшу та безпечнішу доставку гуманітарної допомоги до зон, які потребують допомоги.

1.2 Сучасні виклики та тенденції при виконанні логістичних операцій у гуманітарній сфері

Україна, подібно багатьом країнам, стикається з серйозними гуманітарними викликами у періоди військових конфліктів. Логістика в гуманітарній сфері в цих умовах є критично важливою для забезпечення доставки допомоги тим, хто її найбільше потребує. У контексті воєнного стану в Україні, ця проблематика набуває особливого значення, вимагаючи уваги та аналізу[17].

Воєнна обстановка створює серйозні перешкоди для безпечної та ефективної доставки гуманітарної допомоги. Обмеженість доступу через контрольовані пункти пропуску та ризики на шляху до зони конфлікту ускладнюють процес логістики.

Умови воєнного конфлікту потребують максимальної координації між гуманітарними організаціями, урядовими структурами та військовими підрозділами. Лише взаємодія та співпраця можуть забезпечити ефективне розподілення допомоги.

В умовах непередбачуваності важливо мати точну інформацію про потреби населення та ефективно управляти запасами гуманітарної допомоги. Це дозволить забезпечити достатню кількість ресурсів для тих, хто потребує допомоги.

Логістика в гуманітарній сфері в умовах воєнного конфлікту є складним завданням, але застосування правильних стратегій та інноваційних підходів може значно полегшити процес забезпечення допомоги. Ключовими аспектами успіху є безпека, співпраця, ефективне управління запасами та використання сучасних технологій.

1.3 Аналіз транспортної системи організації

Транспортна система НІ відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної та своєчасної доставки гуманітарної допомоги до різних населених пунктів України. Відділ "Atlas" відповідає за транспортування та розподіл гуманітарного вантажу.

"Atlas" керує всіма аспектами транспортної логістики, пов'язаними з доставкою допомоги. Вони планують, організують та здійснюють відправки з трьох основних складів до різних міст і регіонів. Основні завдання включають:

Планування маршрутів - вибір оптимальних маршрутів для доставки вантажів, враховуючи дорожні умови, безпеку та інші фактори.

Транспортування вантажу - доставка гуманітарних товарів до місць призначення.

Координація логістики - управління завантаженням, розвантаженням та розподілом гуманітарного вантажу.

Моніторинг та контроль - відстеження місцезнаходження транспортних засобів та вантажу в реальному часі для забезпечення безпечної та своєчасної доставки.

Основні компоненти транспортної системи:

Транспортні засоби - організація використовує різноманітні транспортні засоби, включаючи вантажівки, медичні автомобілі, гуманітарні конвої та інші спеціалізовані транспортні засоби, адаптовані для різних типів вантажів у різних умовах.

Склади - три основних склади, служать основними пунктами для завантаження та розвантаження гуманітарного вантажу. Склади обладнані сучасними засобами для зберігання та обробки великих обсягів товарів[11].

Інформаційні системи - використання географічних інформаційних систем (ГІС) та спеціалізованого програмного забезпечення для планування та оптимізації маршрутів. Системи моніторингу в реальному часі відстежують рух транспортних засобів та вантажу, що дозволяє ефективно керувати логістичними процесами.

Персонал - кваліфіковані водії, планувальники логістики та інший персонал забезпечують безперервну роботу транспортної системи. Регулярне навчання та курси допомагають покращити їхні навички та адаптуватися до змінних умов праці.

Ефективність транспортної системи НІ забезпечується через взаємодію відділу та "Atlas" з іншими структурними підрозділами організації та зовнішніми партнерами. Основні аспекти взаємодії включають:

- Координація з місцевими органами влади: Співпраця з місцевими органами влади для отримання актуальної інформації про стан доріг, безпечні маршрути та інші важливі фактори.

- Партнерство з іншими гуманітарними організаціями: Обмін ресурсами та інформацією з іншими організаціями для підвищення ефективності гуманітарної допомоги.

- Комунікація з міжнародними та національними асоціаціями: Постійний обмін інформацією та координація дій з національними асоціаціями НІ для узгодження логістичних операцій та забезпечення своєчасної доставки допомоги.

Транспортна система організації НІ (Рис. 1.3) є життєво важливою для виконання її гуманітарної місії. Постійний моніторинг, аналіз та вдосконалення логістичних процесів дозволяють забезпечувати своєчасну та ефективну доставку допомоги до тих, хто її потребує найбільше.

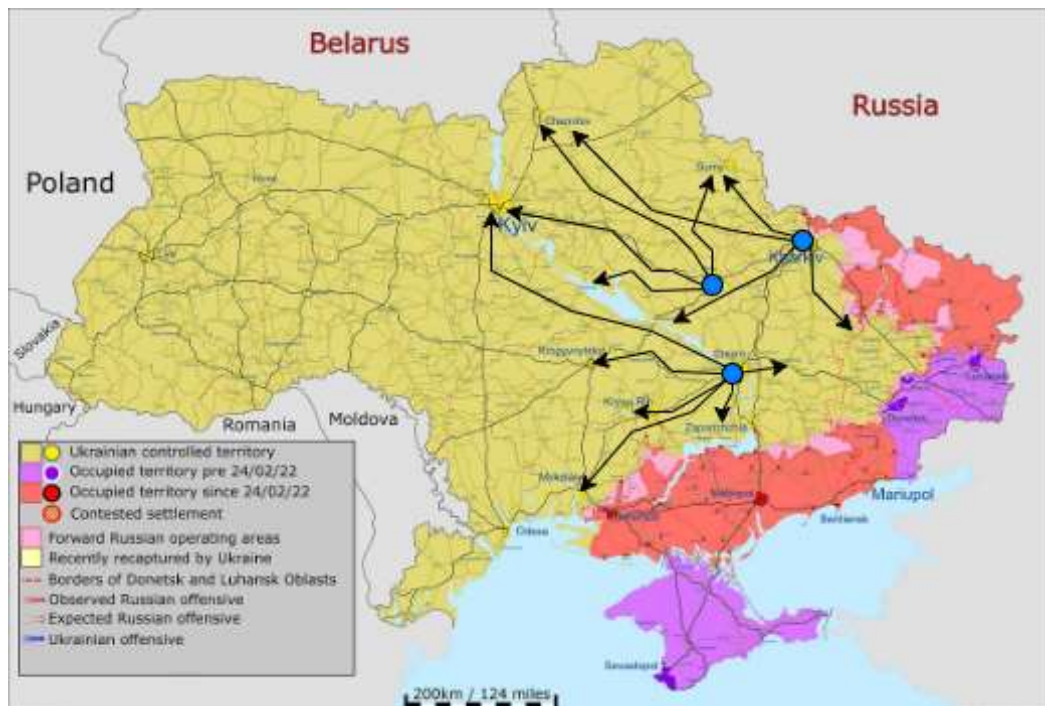


Рис. 1.3. Карта складів та схема перевезень HI (Humanity & Inclusion)

Під час проведення аналізу затраченого часу на початку 2023 року та на початку 2024 року було виявлено, що час на перевезення по тим самим містам збільшився на 28%. Крім того, збільшилась відстань, пройдена транспортними засобами, що свідчить про неправильно визначені оптимальні маршрути перевезення.

Було проведено аналіз. Основними цілями аналізу були:

1. Оцінка ефективності транспортних операцій: Визначити середній час перевезень та середню відстань, пройдену транспортними засобами, на початку 2023 та 2024 років.

2. Виявлення основних проблем: Ідентифікувати ключові фактори, що впливають на збільшення часу та відстані перевезень.

Для досягнення поставлених цілей було використано декілька методів дослідження:

1. Збір даних: Було зібрано дані про час та відстань перевезень на початку 2023 та 2024 років.

2. Аналіз даних: Проведено порівняльний аналіз середнього часу перевезень та середньої відстані, пройденої транспортними засобами.

3. Опитування персоналу: Проведено опитування водіїв та працівників логістичного департаменту для виявлення основних проблем та перешкод у їхній роботі.

Дані збиралися протягом 2023-2024 років кожні три місяці для порівняння в однакових умовах. Використовувалися дані з моніторингу транспорту та звіти логістичного департаменту. Показники включали середній час та відстань

перевезень. У 2024 році середній час збільшився на 28%, а середня відстань - на 12% порівняно з 2023 роком.

На основі опитувань було виявлено наступні ключові проблеми:

- Збільшення кількості перевірок на дорогах через воєнний стан: Це призводить до затримок у транспортуванні, що негативно впливає на своєчасність доставки гуманітарної допомоги.

- Ускладнення проїзду через зруйновані дороги та мости: Пошкоджена інфраструктура ускладнює планування маршрутів та змушує транспортні засоби об'їжджати, що збільшує відстань і час у дорозі.

- Відсутність актуальної інформації про стан доріг і наявність безпечних маршрутів: Недостатня інформація ускладнює оптимальне планування перевезень, що може призводити до затримок і небезпечних ситуацій для водіїв.

- Недостатня кількість транспортних засобів та водіїв для виконання всіх перевезень: Це призводить до перенавантаження наявних ресурсів, що негативно впливає на ефективність логістичних операцій.

На основі проведеного аналізу та виявлених проблем пропонується використання прискореного алгоритму планування перевезення вантажів для оптимізації транспортних перевезень. Цей алгоритм дозволить більш ефективно розподіляти маршрути та ресурси, враховуючи різноманітні фактори, такі як стан доріг, час доби, погодні умови та обмеження вантажопідйомності. В результаті застосування прискореного алгоритму очікується скорочення середнього часу та середньої відстані, затрачених на перевезення, що призведе до зменшення загальних витрат на перевезення для організації НІ.

1.4 Сучасний стан вирішення проблем оптимізації логістичних процесів

Перш ніж розглядати розробку нової системи, корисно проаналізувати наявні аналоги. Ретельний огляд аналогічних задач дозволить краще зрозуміти можливості та обмеження існуючих систем і визначити потреби для розробки нового рішення.

Сучасні методи вирішення проблем оптимізації логістичних процесів включають різні інноваційні підходи, такі як використання метаевристичних алгоритмів, штучного інтелекту та машинного навчання. Ці методи дозволяють ефективно вирішувати задачі, пов'язані з витратами та прибутками, проте їх застосування у контексті гуманітарних місій під час воєнного стану може бути обмеженим через специфічні вимоги до швидкості доставки.

Одним з поширених методів для вирішення задач оптимізації при транспортуванні вантажів є метод гілок та меж. Його основна ідея полягає в систематичному дослідженні всіх можливих варіантів рішення задачі з поступовим відсіюванням (прорізанням) неперспективних гілок дерева рішень. Цей метод часто використовується в задачах цілочислового програмування, таких як розподіл ресурсів, планування та логістика.

У одній з задач з планування логістики компанія "StudySmarter" прагнула мінімізувати загальні витрати на розподіл завдань між працівниками. В [4] приведено задачу планування логістики такої, яка базується на мінімізації загальних витрат та розподіл завдань між працівниками. Використовуючи метод гілок та меж, вони розділили початкову задачу на підзадачі (гілки) та оцінювали їх (межі), відкидаючи ті, які не могли дати кращий результат. У результаті, вони

з змогли знайти оптимальне рішення для задачі розподілу завдань з мінімальними витратами.

Генетичні алгоритми є метаевристичним методом, який імітує природний процес відбору для вирішення складних задач. Одним із прикладів їх застосування є оптимізація складських операцій, зокрема розміщення товарів та маршрутів збору замовлень. В дослідженні, опублікованому в журналі Applied Sciences, представлено повністю автоматизоване рішення на основі ГА для оптимізації цих процесів[5].

Основною метою дослідження було зниження загального часу збору замовлень у складі шляхом оптимізації розміщення товарів та маршрутів їх збору. Відповідно до проведених експериментів, використання ГА дозволило досягти значних результатів.

Використовуючи генетичні алгоритми з багатобатьківським кросовером, вдалося знизити час збору замовлень до 54% у порівнянні з випадковим розміщенням товарів.

Використовуючи генетичні алгоритми для оптимізації розміщення товарів, вдалося знизити час збору до 21% при застосуванні вдосконалених методів, таких як багатократний перезапуск і багатобатьківський кросовер.

Генетичні алгоритми показали високу ефективність у задачах оптимізації складських операцій. Вони дозволяють значно знизити час виконання замовлень і витрати на операційні процеси. Однак, цей метод може бути недостатньо швидким для задач, де необхідно швидке реагування, наприклад, в умовах воєнного стану. Тому для таких задач можуть знадобитися більш швидкі та адаптивні методи.

Лінійне програмування широко використовується у логістиці для вирішення різноманітних оптимізаційних задач. Одним з прикладів є оптимізація управління складом, що було досліджено у статті "Implementation of Linear Programming and Decision-Making Model for the Improvement of Warehouse Utilization"[6].

У даному дослідженні лінійне програмування було використано для покращення використання простору складу. Завданням було визначити оптимальну кількість продуктів, які можуть бути збережені на складі, виходячи з різних сценаріїв. Зокрема, модель ЛП допомагала приймати рішення щодо найкращого розміщення палет на відповідних стелажах та виявляла місця, де потрібні покращення в управлінні складом.

Застосування ЛП для пошуку оптимального маршруту може також застосовуватися так як наша задача полягає в оптимізації пошуку оптимального маршруту для гуманітарної організації в умовах воєнного стану, де основним критерієм є час, а не прибуток. Метод лінійного програмування не є найкращим вибором через наступні причини:

Часові обмеження: ЛП, як правило, краще підходить для задач, де обмеження та цільові функції можна легко лінійно формалізувати. У нашій задачі час є критичним фактором, і його важко врахувати у простій лінійній моделі.

Умови воєнного стану можуть швидко змінюватися, і рішення повинні бути адаптивними. ЛП моделі менш гнучкі в умовах, де обмеження та цілі можуть часто змінюватися.

Таким чином, хоча лінійне програмування часто застосовується для вирішення логістичних задач, для задачі оптимізації маршруту в умовах воєнного стану для оперативного визначення управлінських рішень необхідно

застосовувати методи, які враховують гнучкість та адаптивність до умов, які швидко змінюються.

1.5 Методи вирішення логістичних задач

Ефективне вирішення логістичних задач є ключовим фактором успіху сучасних підприємств. Використання різноманітних методів дозволяє знайти оптимальні рішення для різних типів задач. Для планування оптимальних маршрутів доставки вантажів широко використовуються метод гілок та меж.

Метод гілок та меж є алгоритмічним методом для точного розв'язання оптимізаційних задач. Він використовується для пошуку оптимального розв'язку в просторі можливих варіантів шляхом розбиття задачі на менші підзадачі та поступового перебору усіх можливих варіантів[1].

Суть методу:

Розгалуження: Починаємо з початкового розв'язку задачі та розгалужуємося на менші підзадачі, використовуючи стратегію поділу і завоювання.

Оцінка границь: Для кожної підзадачі обчислюємо нижню та верхню границі значень цільової функції.

Обмеження та елімінація гілок: Проводимо обмеження кількості варіантів, викидаючи ті, що гарантовано не приведуть до оптимального розв'язку.

Звуження простору пошуку: Після обмеження кількості варіантів здійснюється пошук у більш обмеженому просторі.

Застосування в транспортних задачах: Метод гілок та меж може бути застосований для пошуку оптимального маршруту транспортування вантажу, розгалужуючи задачу на менші підзадачі, такі як вибір маршруту для кожного окремого вантажу.

Генетичні алгоритми моделюють процеси природного відбору та еволюції для пошуку оптимального рішення. Вони використовуються для пошуку рішення в просторі можливих рішень, які представлені у вигляді популяції[2].

Суть методу:

Початкова популяція: Створюємо випадкову початкову популяцію рішень.

Оцінка пристосованості: Обчислюємо функцію пристосованості для кожного розв'язку.

Схрещування та мутація: Пари розв'язків схрещуються та мутуються для створення нової популяції.

Відбір: Вибираємо найкращі розв'язки для включення в нову популяцію.

Застосування в транспортних задачах: Генетичні алгоритми можуть бути застосовані для пошуку оптимального розташування складів або оптимізації маршрутів транспортування вантажу.

Метод симуляції отжигу моделює процес теплової обробки металу для пошуку оптимального рішення в просторі можливих рішень. Він дозволяє вирішувати задачі оптимізації навіть у випадку, коли функція цілі не має структури гладкої поверхні[18].

Суть методу:

Початкове становище: Розпочинаємо з початкового розв'язку.

Генерація нового становища: Генеруємо новий розв'язок шляхом деяких випадкових змін.

Оцінка різниці: Розраховуємо різницю між новим та поточним розв'язком.

Прийняття нового розв'язку: Приймаємо новий розв'язок з ймовірністю, що залежить від різниці та температури.

Зменшення температури: Поступово зменшуємо температуру, що зменшує ймовірність прийняття гіршого розв'язку.

Застосування в транспортних задачах: Метод симуляції отжигу може бути застосований для пошуку оптимального розташування складів або оптимізації маршрутів транспортування вантажу.

Лінійне програмування використовується для оптимізації лінійних функцій за допомогою лінійних обмежень. Цей метод часто застосовується в транспортних задачах для мінімізації витрат або максимізації прибутку[19].

Суть методу:

Постановка задачі: Формулюємо задачу оптимізації у вигляді лінійної функції цілі та лінійних обмежень.

Розв'язок: Використовуємо лінійний програмний пакет для знаходження оптимального розв'язку.

Перевірка оптимальності: Перевіряємо отриманий розв'язок на оптимальність та виконання обмежень.

Застосування в транспортних задачах: Лінійне програмування може бути застосоване для оптимізації маршрутів транспортування вантажу, мінімізації витрат на транспортування та розташування складів[3].

Метод імітації, також відомий як метод Монте-Карло, використовує випадкову генерацію даних для оцінки оптимального розв'язку. Він широко використовується для апроксимації великих обсягів даних та розв'язання задач, для яких немає аналітичного рішення[20].

Суть методу:

Генерація даних: Генеруємо випадковий набір даних, який відповідає вхідним параметрам задачі.

Оцінка: Розраховуємо значення цільової функції для кожного набору даних.

Вибір оптимального розв'язку: Вибираємо розв'язок з найкращим значенням цільової функції.

Застосування в транспортних задачах: Метод імітації може бути застосований для пошуку оптимальних маршрутів транспортування вантажу за допомогою генерації випадкових маршрутів та оцінки їх ефективності.

Для розв'язання оптимізаційних задач шляхом розбиття їх на менші підзадачі та збереження результатів для подальшого використання використовується метод динамічного програмування[9].

Суть методу:

Розбиття задачі: Розбиваємо задачу на менші підзадачі, які можна розв'язати окремо.

Збереження результатів: Зберігаємо результати розв'язку кожної підзадачі для подальшого використання.

Об'єднання підзадач: Об'єднуємо результати підзадач для отримання оптимального розв'язку всієї задачі.

Застосування в транспортних задачах: Метод динамічного програмування може бути застосований для пошуку оптимальних маршрутів транспортування вантажу та мінімізації витрат на транспортування.

Ці методи можуть бути використані для оптимізації логістичних операцій в реальних умовах.

1.6 Постановка задачі

В Україні є 11 міст, де знаходяться лікарні, що формують заклади на медикаменти до організації НІ. Організація призначила кожному з цих міст один із трьох складів, через які здійснюється постачання медикаментів. Кожне місто отримує поставки від одного з трьох складів, що гарантує вчасне забезпечення лікарень необхідними ліками та обладнанням.

Проте з урахуванням збільшення потреб у гуманітарній допомозі та медичних постачаннях постає питання оптимізації перевезень, щоб скоротити час доставки та покращити логістичні процеси. Потрібно покращити існуючий план перевезення гуманітарної допомоги зі складів у Дніпрі, Харкові та Полтаві до міст України відповідно до потреб кожної лікарні. Це передбачає врахування відстаней між містами, часу на транспортування та конкретних вимог лікарень щодо

медикаментів і обладнання. Слід зазначити, що обладнання перевозиться дуже рідко, тому ми зосередимося на оптимізації перевезень медикаментів.

Оптимізація перевезень дозволить значно зменшити час доставки, що є вкрай важливим для надання швидкої та ефективної медичної допомоги.

Таким чином, оптимізація процесу доставки гуманітарної допомоги сприятиме своєчасному забезпеченню лікарень необхідними ресурсами, зменшенню витрат на логістику та підвищенню загальної ефективності системи медичного постачання в Україні.

Висновки до розділу

Розглянуті методи вирішення логістичних задач мають різноманітні застосування і ефективність залежно від конкретних умов та вимог задачі. Метод гілок та меж, генетичні алгоритми, метод симуляції відпалу, лінійне програмування та метод імітації відрізняються за своїми підходами і результатами, які вони можуть забезпечити.

Була проведена детальна аналіз транспортної системи з метою оцінки її ефективності та можливостей оптимізації. Дослідження включало в себе оцінку існуючих маршрутів та їх використання, ефективність у виконанні поставок, а також проблеми, пов'язані з погрузкою та використанням транспортних засобів. Виявлені в ході аналізу фактори визначили необхідність подальшого удосконалення системи для забезпечення більш ефективного та економічного використання ресурсів.

Раніше описані методи та стандарти для вирішення логістичних задач не ідеально підходять у сучасних умовах воєнного конфлікту. Тому важливо вдосконалити існуючий підхід для забезпечення більшої ефективності і оперативності в управлінні логістичними процесами у цих умовах.

На основі виявлених недоліків існуючої системи виникла необхідність в оптимізації вищезгаданого комплексу завдань.

2. РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛЬНИЙ

2.1 Дослідження об'єкта з ціллю отримання вихідної інформації для моделювання

Дослідження об'єкта з ціллю отримання вихідної інформації для моделювання є ключовим етапом у процесі створення ефективної системи розподілу медикаментів для лікарень. Збір точних даних про відстані між місцями, потреби лікарень у медикаментах, щомісячні поставки на склади та види медикаментів, що постачаються як гуманітарна допомога, дозволяє створити модель, яка максимально відповідає реальним умовам. Це, у свою чергу, забезпечує ефективне управління ресурсами та покращення якості медичного обслуговування.

Для проведення дослідження та оптимізації процесу транспортування вантажів було здійснено збирання та обробку різноманітних даних, які дозволяють всебічно оцінити логістичні процеси. Нижче наведені деталі про кожен з видів зібраних даних і їх значення для оптимізації.

По-перше, були зібрані адреси складів та занесені до таблиці 2.1, які є ключовою інформацією для планування маршрутів. Ці дані визначають точки відправлення вантажів. Відомості про місцезнаходження складів дозволили створити базу даних для аналізу географічного розподілу пунктів відправлення, визначити найближчі транспортні шляхи та інфраструктуру, що забезпечує склади, а також враховувати географічні особливості, які можуть впливати на час

та вартість транспортування, такі як близькість до основних магістралей або зон з важкими погодними умовами.

Таблиця 2.1

Адреси складів гуманітарної організації

| № | Населений пункт | Адреса |
|---|-----------------|--------------------------|
| 1 | Дніпро | вулиця Журналістів, 17 |
| 2 | Харків | вулиця Достоєвського, 13 |
| 3 | Полтава | вулиця Заводська, 5 |

Для спрощення моделювання та аналізу логістичних процесів, пов'язаних з постачанням медикаментів, було прийнято рішення розглядати всі медикаменти як однорідну масу. Це означає, що всі різноманітні типи медикаментів, незалежно від їх властивостей, форм і упаковок, будуть уніфіковані і представлені в тонах. Такий підхід дозволяє значно спростити обчислення і забезпечує зручність у плануванні та оптимізації маршрутів доставки[10]. Кожен склад отримує 4 тони різноманітних медикаментів на місяць, які будуть розглянуті як однорідна маса.

По-друге, були зібрані адреси госпіталів та занесені до таблиці 2.2, які є кінцевими пунктами доставки вантажів. Ці дані дозволили оцінити розподіл пунктів призначення вантажів на території, що обслуговується, визначити можливі маршрути та обрати найбільш ефективні, а також враховувати специфічні вимоги госпіталів щодо часу доставки та умов транспортування.

Адреси місць прийняття вантажів гуманітарної допомоги

| № | Населений пункт | Адреса |
|----|-----------------|----------------------------|
| 1 | Запоріжжя | вулиця Оптимістична, 1 |
| 2 | Кривий Ріг | вулиця Вишнева, 1 |
| 3 | Миколаїв | вулиця 2-а Екіпажна, 4 |
| 4 | Кропивницький | вулиця Ганни Дмитрян, 1 |
| 5 | Суми | вулиця Металургів, 38 |
| 6 | Ахтирка | вулиця Петропавлівська, 25 |
| 7 | Лозова | вулиця Лозовського, 10 |
| 8 | Чугуїв | вулиця Гвардійська, 52Б |
| 9 | Київ | Лабораторний провулок, 20 |
| 10 | Черкаси | вулиця Кавказька, 229 |
| 11 | Кременчук | вулиця Павлова, 16 |

Крім того, було зібрано докладну інформацію про обсяги вантажів, що відправляються з кожного складу і приймаються кожним госпіталем, а також про відстані між цими пунктами. Це дозволило нам ефективно оптимізувати розподіл вантажів між транспортними засобами з метою максимізації їхньої ефективності. Такий підхід сприяє зниженню витрат на паливо та інші логістичні витрати, а також дозволяє точно розрахувати час доставки. Це надзвичайно важливо для забезпечення своєчасної доставки вантажів, особливо в надзвичайних ситуаціях. На основі отриманих даних ми створили таблицю 2.3, яка ілюструє всі важливі параметри і показники, необхідні для управління логістичними процесами та оптимізації вантажних перевезень.

Сформована система взаємовідносин

| Грузовідправник | Грузоотримувач | Середній об'єм перевезення, т | Відстань, км |
|-----------------|----------------|-------------------------------|--------------|
| Дніпро | Запоріжжя | 1,1 | 91,1 |
| | Кривий Ріг | 1,5 | 157 |
| | Миколаїв | 0,7 | 319,8 |
| | Кропивницький | 0,5 | 245,3 |
| Харків | Суми | 1 | 191,7 |
| | Ахтирка | 0,6 | 115,4 |
| | Лозова | 0,8 | 141,2 |
| | Чугуїв | 0,7 | 41 |
| Полтава | Київ | 1,3 | 337,2 |
| | Черкаси | 1,1 | 259 |
| | Кременчук | 0,9 | 133,4 |

На основі зібраних даних була створена карта (Рис. 2.1), яка візуалізує всі склади та госпіталі. Така карта допомогла наочно представити географічний розподіл пунктів відправлення та призначення, виявити зони з високою концентрацією складів або госпіталів, що може вплинути на планування маршрутів, а також легко ідентифікувати потенційні проблемні області, де необхідні додаткові логістичні рішення.

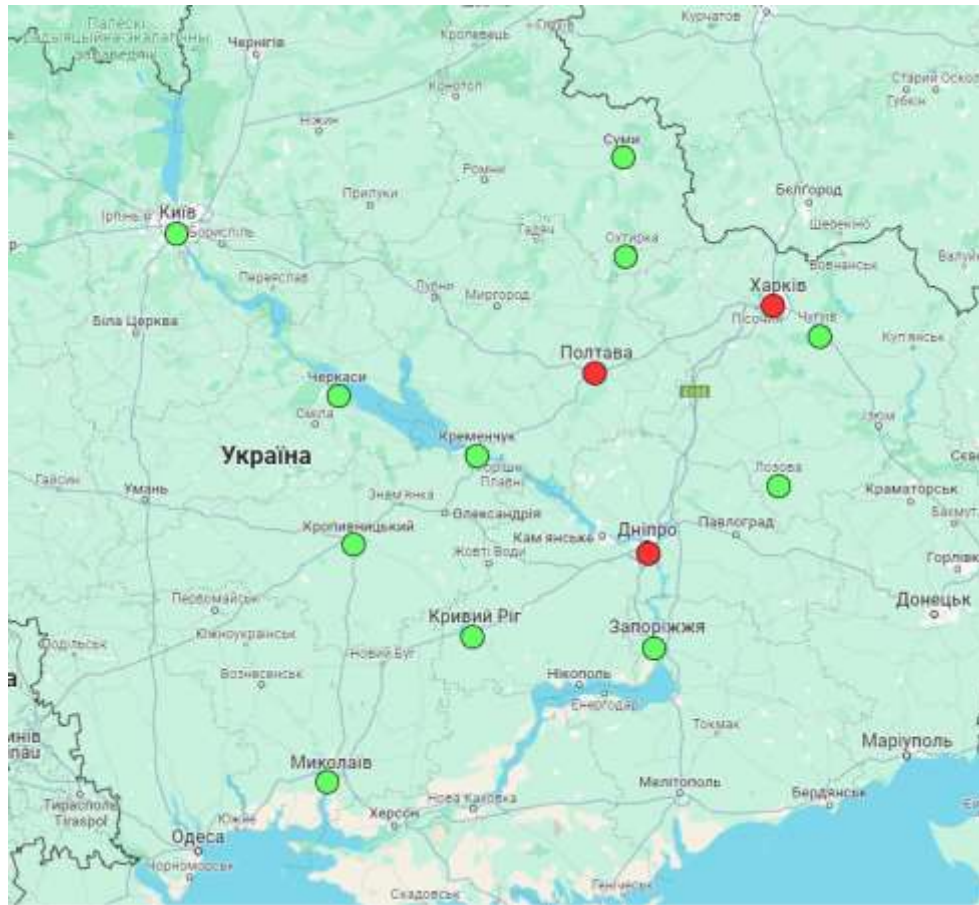


Рис. 2.1. Схема розташування постачальників та споживачів медичних матеріалів

Для оптимізації логістичних процесів були визначені найкоротші відстані між пунктами завантаження та розвантаження вантажів. Це дозволило розрахувати оптимальні маршрути, що зменшують час у дорозі, врахувати різні сценарії та варіанти маршрутів, щоб знайти найбільш ефективні рішення, а також забезпечити більш надійне планування, зменшивши ризики затримок та непередбачуваних витрат.

Введемо умовні позначки для складів (табл. 2.4) та для лікарень (табл. 2.5):

Таблиця 2.4

Умовні позначки для складів

| Населений пункт | Умовна позначка |
|-----------------|-----------------|
| Дніпро | a1 |
| Харків | a2 |
| Полтава | a3 |

Таблиця 2.5

Умовні позначки для госпіталів

| Населений пункт | Умовна позначка |
|-----------------|-----------------|
| Запоріжжя | b1 |
| Кривий Ріг | b2 |
| Миколаїв | b3 |
| Кропивницький | b4 |
| Суми | b5 |
| Ахтирка | b6 |
| Лозова | b7 |
| Чугуїв | b8 |
| Київ | b9 |
| Черкаси | b10 |
| Кременчук | b11 |

Розподіл відправників вантажів та отримувачів вантажів (сформована система взаємовідносин)

| Пункти завантаження | Пункти розвантаження | Об'єм перевезення, т | Відстань, км |
|---------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| a1 | b1 | 1,1 | 91,1 |
| | b2 | 1,5 | 157 |
| | b3 | 0,7 | 319,8 |
| | b4 | 0,5 | 245,3 |
| a2 | b5 | 1 | 191,7 |
| | b6 | 0,6 | 115,4 |
| | b7 | 0,8 | 141,2 |
| | b8 | 0,7 | 41 |
| a3 | b9 | 1,3 | 337,2 |
| | b10 | 1,1 | 259 |
| | b11 | 0,9 | 133,4 |

Визначення найкоротших відстаней між пунктами завантаження та розвантаження є необхідним для подальшого вирішення задач маршрутизації. Ці дані дозволяють розробити оптимальні маршрути, мінімізуючи час і витрати на транспортування. Завдяки цьому ми можемо підвищити ефективність логістичних операцій, забезпечити своєчасну доставку вантажів та максимально використовувати наявні ресурси, що є критично важливим для успішного виконання волонтерських задач[14]. Результати розрахунку найкоротших відстаней наведені у таблиці 2.7.

Найкоротші відстані між пунктами завантаження та розвантаження

| Пункти розвантаження | Пункти завантаження | | |
|----------------------|---------------------|-------|-------|
| | a1 | a2 | a3 |
| b1 | 91,1 | 291,1 | 276,3 |
| b2 | 157 | 377 | 268 |
| b3 | 319,8 | 541 | 431,1 |
| b4 | 245,3 | 381,8 | 247,5 |
| b5 | 378 | 191,7 | 187,4 |
| b6 | 300,7 | 115,4 | 105,1 |
| b7 | 135,6 | 141,2 | 187 |
| b8 | 248,9 | 41 | 208,5 |
| b9 | 475 | 480,4 | 337,2 |
| b10 | 323 | 398,1 | 259 |
| b11 | 184,2 | 249,9 | 133,4 |

Приведені дані будуть використані при формуванні математичної моделі для визначення оптимальних параметрів.

2.2 Розробка математичної моделі транспортування гуманітарної допомоги

Планування перевізної діяльності полягає у визначенні оптимальних маршрутів руху транспортних засобів, що дозволяють виконати договірні зобов'язання з найменшими витратами.

Маршрут руху — шлях слідування автомобіля при виконанні перевезень. Найбільш поширеною на сьогодні є класифікація, за якою виділяються маятникові та кільцеві маршрути.

Маятниковий маршрут — це маршрут, при якому шлях слідування автомобіля між двома вантажними пунктами неодноразово повторюється. Вони бувають з зворотним холостим пробігом ($B \leq 0,5$); з зворотним не повністю завантаженим пробігом ($0,5 < B < 1,0$); з зворотним завантаженим пробігом ($B = 1,0$) (де B — коефіцієнт використання пробігу автомобіля на маршруті, визначається як відношення завантаженого пробігу до загальної протяжності маршруту).

Кільцевий маршрут — це маршрут слідування автомобіля по замкнутому контуру, що з'єднує декілька відправників і (або) одержувачів. Різновидами кільцевих маршрутів є розвізні, збірні та збірно-розвізні маршрути, організовані в тих випадках, коли маса вантажу, що отримується (відправляється) кореспондентськими пунктами, менша за вантажопідйомність рухомого складу. При русі за розвізними (збірними) маршрутами здійснюється поступове розвантаження (завантаження) вантажу. На збірно-розвізному маршруті відбувається одночасне завантаження та розвантаження вантажів.

Задача пошуку найкоротшого шляху з першого пункту маршруту до m -го зводиться до вибору чисел x_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, m$), при яких досягається мінімум функції, що визначає довжину маршруту між початковим і кінцевим пунктом.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \rightarrow \min. \quad (2.1)$$

Для вирішення задачі вважається, що довжини ділянок доріг між кожною парою сусідніх пунктів відомі і дорівнюють l_{ij} , а число x_{ij} дорівнює 1, якщо ділянка є ланкою обраного маршруту, і x_{ij} дорівнює 0, якщо він не входить до цього маршруту. Параметри при необхідності можуть означати не лише відстані, але й тривалість проїзду по ділянках мережі або вартість пробігу автомобіля.

Якщо при перевезенні вантажу використовується схема «багато-до-багатьох», вирішується транспортна задача. Визначається за якими маршрутами (маятниковим або кільцевим) буде перевозитися вантаж від кожного відправника до одержувачів, закріплених за ним після вирішення транспортної задачі.

Економіко-математична модель транспортної задачі виглядає наступним чином:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i \quad (i = \overline{1, n}), \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_j \quad (j = \overline{1, m}), \quad (2.3)$$

$$\forall x_{ij} \geq 0, \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j, \quad (2.5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} * x_{ij} \rightarrow \min, \quad (2.6)$$

де i - кількість постачальників;

j - кількість споживачів;

a_i - обмеження за пропозицією;

b_j - обмеження за попитом.

c_{ij} - елементи цільової функції (відстань, вартість перевезення між вантажоутворюючими і вантажопоглинаючими пунктами);

x_{ij} - обсяг кореспонденції між i -тою та j -тою точками.

Для розв'язання транспортної задачі розроблені спеціальні методи, які дозволяють з множини можливих рішень знайти оптимальне. Одним із таких методів є розподільний метод, який має кілька різновидів, що відрізняються головним чином способом виявлення оптимального рішення. Найвідомішими є три різновиди: метод Хічкова; метод Креко; модифікований розподільний метод або метод потенціалів. Вони відрізняються головним чином способом виявлення оптимального рішення. Початкове допустиме рішення може бути отримане кількома способами. Найпростішим є спосіб північно-західного кута. Для отримання більш наближеного до оптимального початкового допустимого плану перевезень найчастіше пропонується використовувати методи найменшого елемента в матриці; подвійної переваги; апроксимації Фогеля.

Перед нами поставлена стандартна транспортна задача, яка вирішується двома етапами: побудова опорного плану та його оптимізація.

Перший етап полягає у побудові початкового допустимого плану перевезень. Існує кілька методів для цього: метод північно-західного кута, метод найменшого елемента в матриці, метод подвійної переваги та метод апроксимації Фогеля. Ми обираємо метод апроксимації Фогеля, оскільки як показує практика він дозволяє отримати початковий план, який найбільш наближений до оптимального. Цей метод враховує різницю між двома найменшими значеннями в кожному рядку та

стовпці матриці витрат, що дає змогу мінімізувати загальні витрати на перевезення ще на початковому етапі.

Метод аппроксимації Фогеля використовується для розв'язання транспортної задачі, де знаходиться початковий розподіл, особливо при невеликій кількості пунктів, який є оптимальним або досить близьким до нього. Основні кроки методу Фогеля наступні:

а) Початкова матриця доповнюється одним стовбцем і однією строкою. Для кожного рядка і кожного стовбця матриці знаходяться два найменших елементи. Далі обчислюється абсолютна різниця між цими двома елементами. Ці різниці записуються у відповідний стовбець для рядків і у відповідну строку для стовбців різниць. Якщо дві клітинки в одному рядку або стовбці мають однакові значення, то різниця для цього рядка або стовбця вважається рівною нулю.

б) Вибирається найбільше значення різниці, незалежно від того, чи воно знаходиться в стовбці чи рядку різниць. В клітинку матриці, яка містить мінімальний елемент у цьому рядку або стовбці, записується максимально можлива вантажопідйомність з урахуванням співвідношення ресурсів постачальника і попиту споживача. Якщо виявляється, що попит споживача повністю задовольняється або ресурс постачальника повністю вичерпується, то цей рядок або стовбець матриці виключаються з подальшого розгляду.

в) Після заповнення клітинок матриці різниць знову перераховуються, і операція повторюється знову до тих пір, поки не буде складено допустиму програму розподілу.

Цей метод дозволяє ефективно знаходити рішення для опорного транспортного плану, зокрема при наближених рішеннях, коли точні розрахунки можуть бути складними або часомісткими.

Другий етап транспортної задачі – це оптимізація отриманого плану. Для цього існує декілька методів, зокрема метод потенціалів, метод гілок та меж. Метод потенціалів часто використовується для оптимізації початкового допустимого плану перевезень, дозволяючи знайти найменші витрати шляхом перерахунку потенціалів для кожної комірки транспортної таблиці. Однак, у нашому випадку ми обираємо метод гілок та меж, оскільки він дозволяє здійснити повний перебір усіх можливих варіантів, забезпечуючи знаходження глобального мінімуму по критерію часу. Цей метод є особливо ефективним для задач великого масштабу та складних логістичних операцій, де важливо врахувати всі можливі маршрути та комбінації, щоб гарантувати оптимальне рішення. Тому він більше підходить до нашого випадку.

Ми перейшли від стандартної транспортної задачі до задачі маршрутизації через необхідність врахування більш складних і динамічних умов реальних логістичних операцій. Математична постановка задачі маршрутизації залежить від типу маршруту, за яким планується здійснювати перевезення вантажу: маятниковим або кільцевим (збірним, збірно-розвізним). У першому випадку вирішується задача «узгодження» рейсів, а в другому — задача комівояжера. Додатковою вихідною інформацією для розглянутих задач є матриця найкоротших відстаней між споживачами та постачальниками. Початковий набір пунктів у маршрути здійснюється, виходячи з сумісності вантажів для маятникових маршрутів.

Маршрутизація перевезень автомобільним транспортом дозволяє реалізувати логістичний принцип "від дверей до дверей". Існує багато математичних методів, які дозволяють знаходити як точне, так і наближене рішення поставлених задач. Серед методів, що дають точне рішення, найбільшого поширення набув метод "гілок та меж", який буде використовуватися в даному випадку[12].

Для вирішення задачі комівояжера застосовується метод "гілок та меж". Розв'язання задачі комівояжера, тобто визначення оптимального порядку відвідування точок розвізного маршруту, проводиться методом "гілок та меж". Цей метод включає наступні етапи:

а) Приведення матриці найкоротших відстаней та визначення нижньої границі $\omega(x)$ для множини всіх можливих маршрутів (вершин "дерева рішень"):

$$\omega(x) = \sum_{i=1}^n h_i + \sum_{j=1}^n h_j, \quad (2.7)$$

де h_i, h_j - константи приведення відповідно по рядках і стовбцям;

$$h_i = \min(l_{ij}), i = 1, 2, \dots, n; \quad (2.8)$$

$$l_{ij}' = l_{ij} - h_i, i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.9)$$

де l_{ij}' - елемент нової матриці, приведенної по рядках;

$$h_j = \min(l_{ij}'), j = 1, 2, \dots, n; \quad (2.10)$$

$$l_{ij}'' = l_{ij}' - h_j, i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.11)$$

де l_{ij}'' - елемент нової матриці після наступного приведення вихідної матриці по стовбцям;

б) визначаються оцінки Q_{ij} для клітинок з нульовими елементами $l_{ij} = 0$ в новій матриці L' :

$$Q_{ij} = \min_k l'_{ik} + \min_s l''_{sj}, \quad (2.12)$$

при умові: $k \neq j; s \neq i; k, s = 1, 2, \dots, n$,

де l'_{ik} - найменше значення елемента в рядку i ;

l''_{sj} - найменше значення елемента в стовбці j ;

в) визначаються пари (ks) з максимальною оцінкою, тобто:

$$Q_{ks} = \max_{ij} Q_{ij}; i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.13)$$

Від початкового вузла "всі рішення" проводяться відгалуження у вузли ks та \overline{ks} з нижніми межами:

$$\omega(ks) = \omega(x) + \sum_{i=1}^n h_i + \sum_{j=1}^m h_j, \quad (2.14)$$

$$\omega(\overline{ks}) = \omega(x) + Q_{ks}, \quad (2.15)$$

де ks - маршрути підмножини, що включають точки k і s ;

\overline{ks} - маршрути підмножини, що не включають точки k і s ;

г) з матриці виключаються рядок k і стовбець s . Елементу, що знаходиться на перетині рядка s і стовбця k , присвоюється значення нескінченності (∞), тобто накладається заборона на його включення в маршрут або блокування.

д) після блокування операція приведення повторюється, але вже для нової матриці L' , з викресленим рядком k і стовбцем s і заблокованими необхідними елементами l'_{ij} . Для відгалуження вибирають наступний вузол з найменшою нижньою межею і так далі, поки не буде отримана матриця розміром 2×2 . У цій матриці пари, включені до маршруту, визначаються однозначно, і в результаті формується оптимальний розвізний маршрут.

Основними показниками ефективності застосовуваного алгоритму є зменшення загального пробігу автомобіля, збільшення продуктивності роботи автомобіля та пробігу з вантажем. Пробіг з вантажем (L_v), загальний пробіг (L_0) і транспортна робота (P) для розвізних маршрутів визначаються за наступними формулами:

$$L_v = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^{t-2} l_{t,t+1}^m, \quad (2.16)$$

$$L_0 = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^{t-1} l_{t,t+1}^m, \quad (2.17)$$

$$P = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^{t-2} [l_{t,t+1}^m * (q_m^\Sigma - \sum_{s=1}^{t-2} q_s)] \quad (2.18)$$

де m - кількість розвізних маршрутів;

t - кількість пунктів на маршруті (пункт завантаження враховується двічі);

$l_{t,t+1}^m$ - пробіг між сусідніми пунктами маршруту, км;

q_m^Σ - сумарний обсяг перевезень на m маршруті, т;

q_s - обсяг вантажу, що розвантажується в s пункті, т.

2.3 Розрахунок параметрів математичної моделі з використанням прискореного алгоритму планування перевезень вантажів

Першим етапом нашого дослідження є розгляд маятникового маршруту. Маятниковий маршрут передбачає рух транспортного засобу з пункту відправлення до пункту призначення та повернення назад до пункту відправлення. Такий маршрут часто використовується у випадках, коли необхідно регулярно здійснювати доставку товарів або послуг між двома точками. Наступним етапом є розгляд кільцевого маршруту. Кільцевий маршрут включає декілька пунктів призначення, через які транспортний засіб проходить по черзі, утворюючи замкнутий цикл. Такий маршрут дозволяє ефективніше використовувати

транспортні ресурси, оскільки забезпечує доставку медикаментів до кількох лікарень за одну поїздку[13].

Для вирішення цієї задачі та отримання опорного плану ми використовуємо метод Фогеля. Цей метод використовується для знаходження початкового опорного плану в транспортній задачі. Він базується на пошуку двох мінімальних значень у кожному рядку і кожному стовпчику вартісної матриці та обчисленні різниці між ними. Отримані значення утворюють додатковий рядок і стовпець різниць, які доповнюють вихідну матрицю. Цей підхід дозволяє покращити точність вибору початкового рішення та покращити ефективність алгоритму розв'язання транспортних задач.

Таблиця 2.8

Метод Фогеля (перший етап)

| Пункти розвантаження | Пункти завантаження | | | Стовпець різниць |
|----------------------|---------------------|-------|-------|------------------|
| | a1 | a2 | a3 | |
| b1 | 91,1 | 291,1 | 276,3 | 185,2 |
| b2 | 157 | 377 | 268 | 111 |
| b3 | 319,8 | 541 | 431,1 | 111,3 |
| b4 | 245,3 | 381,8 | 247,5 | 2,2 |
| b5 | 378 | 191,7 | 187,4 | 4,3 |
| b6 | 300,7 | 115,4 | 105,1 | 10,3 |
| b7 | 135,6 | 141,2 | 187 | 5,6 |
| b8 | 248,9 | 41 | 208,5 | 167,5 |
| b9 | 475 | 480,4 | 337,2 | 137,8 |

Продовження табл. 2.8

| | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|------|
| b10 | 323 | 398,1 | 259 | 64 |
| b11 | 184,2 | 249,9 | 133,4 | 50,8 |
| Рядок різниць | 44,5 | 74,4 | 28,3 | - |

Найбільший елемент знаходиться у стовпці різниць і дорівнює 185,2. Це відповідає найменшому значенню в матриці, яке дорівнює 91,1 і знаходиться на перетині рядка b1 і стовпця a1. Отже, в цю знайдену клітину поміщається навантаження - потреба пункту b1 (1,1 тонн).

Таблиця 2.9

Метод Фогеля (другий етап)

| Пункти розвантаження | Пункти завантаження | | | Стовпець різниць |
|----------------------|---------------------|-------|-------|------------------|
| | a1 | a2 | a3 | |
| b1 | 1,1 | - | - | - |
| b2 | 157 | 377 | 268 | 111 |
| b3 | 319,8 | 541 | 431,1 | 111,3 |
| b4 | 245,3 | 381,8 | 247,5 | 2,2 |
| b5 | 378 | 191,7 | 187,4 | 4,3 |
| b6 | 300,7 | 115,4 | 105,1 | 10,3 |
| b7 | 135,6 | 141,2 | 187 | 5,6 |
| b8 | 248,9 | 41 | 208,5 | 167,5 |
| b9 | 475 | 480,4 | 337,2 | 137,8 |
| b10 | 323 | 398,1 | 259 | 64 |
| b11 | 184,2 | 249,9 | 133,4 | 50,8 |
| Рядок різниць | 21,4 | 74,4 | 28,3 | - |

Найбільший елемент знаходиться у стовпці різниць і дорівнює 167,5. Це відповідає найменшому значенню в матриці, яке дорівнює 41 і знаходиться на перетині рядка b8 і стовпця a2. Закріплюємо відповідного відправника та отримувача, після чого виключаємо відповідний рядок з подальшого розгляду. Продовжуючи вирішення задачі за аналогічним алгоритмом, отримуємо необхідний розподіл отримувачів за відправниками, який наведено у таблиці 2. 10. У чисельнику кожної комірки таблиці вказано відстань між відповідними пунктами, а в знаменнику – обсяг перевезення. Такий підхід дозволяє чітко визначити маршрути та обсяги вантажів, що транспортуються, забезпечуючи ефективне планування логістичних операцій.

Таблиця 2.10

Розподіл отримувачів за відправниками

| Пункти розвантаження | Пункти завантаження | | |
|----------------------|---------------------|------------|------------|
| | a1 | a2 | a3 |
| b1 | 91,1 /1,1 | - | - |
| b2 | 157 /1,5 | - | - |
| b3 | 319,8 /0,7 | - | - |
| b4 | - | 381,8 /0,4 | 247,5 /0,1 |
| b5 | - | 191,7 /1 | - |
| b6 | - | - | 105,1 /0,6 |
| b7 | 135,6 /0,7 | 141,2 /0,1 | - |
| b8 | - | 41 /0,7 | - |
| b9 | - | - | 337,2 /1,3 |
| b10 | - | - | 259 /1,1 |
| b11 | - | - | 133,4 /0,9 |

Розглянемо транспортну роботу для маятникових маршрутів, виходячи з цієї системи. Ці маршрути працюють за принципом маятника: транспортні засоби рухаються від однієї кінцевої точки до іншої і назад, без зупинки на проміжних пунктах або з мінімальною кількістю зупинок. Це дозволяє оптимізувати витрати часу і знизити витрати на паливо та обслуговування транспорту.

Транспортна робота для даного випадку складає:

$$P = 91.1 * 1.1 + 157 * 1.5 + 319.8 * 0.7 + 381.8 * 0.4 + 247.5 * 0.1 + 191.7 * 1 + 105.1 * 0.6 + 135.6 * 0.7 + 141.2 * 0.1 + 41 * 0.7 + 337.2 * 1.3 + 259 * 1.1 + 133.4 * 0.9 = 1972.86$$

Пробіг с вантажем для даного випадку складає:

$$L = 91.1 + 157 + 319.8 + 381.8 + 247.5 + 191.7 + 105.1 + 135.6 + 141.2 + 41 + 133.4 = 1945.2$$

Розглянемо транспортну роботу окремо для кожного складу:

$$P1 = 91.1 * 1.1 + 157 * 1.5 + 319.8 * 0.7 + 135.6 * 0.7 = 654.49$$

$$P2 = 381.8 * 0.4 + 191.7 * 1 + 141.2 * 0.1 + 41 * 0.7 = 387.24$$

$$P3 = 247.5 * 0.1 + 105.1 * 0.6 + 337.2 * 1.3 + 259 * 1.1 + 133.4 * 0.9 = 931.13$$

Пробіг с вантажем для даного випадку для кожного складу:

$$L1 = 91.1 + 157 + 319.8 + 135.6 = 703.5$$

$$L2 = 381.8 + 191.7 + 141.2 + 41 = 755.7$$

$$L3 = 247.5 + 105.1 + 133.4 = 486$$

Розглянутий маятниковий маршрут не є кращим, оскільки він часто не забезпечує оптимального використання ресурсів та може призводити до збільшення часу перевезень. В реальних умовах логістичних операцій більш широко використовується кільцевий маршрут, який дозволяє краще адаптуватися

до змінних потреб і обмежень[9]. Кільцевий маршрут забезпечує більш ефективне охоплення декількох пунктів завантаження та розвантаження в межах одного маршруту, що сприяє зниженню загальних витрат часу і підвищенню ефективності транспортування. Це робить кільцевий маршрут більш гнучким та економічно вигідним варіантом в порівнянні з маятниковим маршрутом.

Розглянемо тепер транспортну роботу для кільцевого маршруту. На даний момент у використанні вантажівки з вантажопідйомністю 4,5 тони, що дозволяє організувати ефективний кільцевий розвізний маршрут, що охоплює всі призначені пункти. Таким чином, ми вирішуємо задачу комівояжера для складів a_1 , a_2 та a_3 , використовуючи метод "гілок і меж". Для успішної оптимізації роботи необхідно скласти матрицю найкоротших відстаней між усіма пунктами маршруту і визначити найменші значення в кожному рядку.

Організація такого маршруту дозволяє знизити витрати часу та палива, оптимізувати логістику складу і забезпечити ефективне обслуговування всіх клієнтів. Крім того, використання вантажівок з великою вантажопідйомністю забезпечує можливість перевезення великих обсягів товарів без додаткових витрат на додаткові транспортні засоби.

Цей підхід є ключовим у вирішенні задачі логістики для підприємства, що має значний обсяг вантажів та потребує постійного оптимізованого підходу до організації розподілу та доставки товарів[15].

Складемо матрицю найкоротших відстаней між пунктами маршруту для складу a_1 і знайдемо в кожному рядку мінімальний елемент.

Таблиця 2.11

Матриця найкоротших відстаней між пунктами, закріпленими за першим складом

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b3 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 91,1 | 157 | 319,8 | 135,6 | 91,1 |
| b1 | 91,1 | ∞ | 204,2 | 367,7 | 201,3 | 91,1 |
| b2 | 157 | 204,2 | ∞ | 174,6 | 301,4 | 157 |
| b3 | 319,8 | 367,7 | 174,6 | ∞ | 502,4 | 174,6 |
| b7 | 135,6 | 201,3 | 301,4 | 502,4 | ∞ | 135,6 |
| Загалом | | | | | | 649,4 |

Відніmemo з кожного рядка знайдені мінімальні значення і визначимо найменший елемент для кожного стовпця.

Таблиця 2.12

Скорегована матриця найкоротших відстаней

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b3 | b7 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| a1 | ∞ | 0 | 65,9 | 228,7 | 44,5 |
| b1 | 0 | ∞ | 113,1 | 276,6 | 110,2 |
| b2 | 0 | 47,2 | ∞ | 17,6 | 144,4 |
| b3 | 145,2 | 193,1 | 0 | ∞ | 327,8 |
| b7 | 0 | 65,7 | 165,8 | 366,8 | ∞ |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 17,6 | 44,5 |

Після віднімання мінімальних елементів отримуємо повністю редуковану матрицю.

Таблиця 2.13

Повністю редукована матриця для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b3 | b7 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| a1 | ∞ | 0 | 65,9 | 211,1 | 0 |
| b1 | 0 | ∞ | 113,1 | 259 | 65,7 |
| b2 | 0 | 47,2 | ∞ | 0 | 99,9 |
| b3 | 145,2 | 193,1 | 0 | ∞ | 283,3 |
| b7 | 0 | 65,7 | 165,8 | 349,2 | ∞ |

Сума констант приведення визначає нижню межу:

$$\omega(x) = 91.1 + 91.1 + 157 + 174.6 + 135.6 + 17.6 + 44.5 = 711.5$$

Кожен допустимий маршрут являє собою цикл, за яким комівояжер відвідує кожне місто лише один раз і повертається в початкове місто.

Крок 1. Визначаємо ребро розгалуження і розбиваємо всю множину маршрутів відносно цього ребра на два підмножини.

З цією метою для всіх клітинок матриці з нульовими елементами по черзі замінюємо нулі на нескінченність і визначаємо для них суму утворених констант приведення, вони наведені в дужках.

Крок 1.1 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b3 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0(47,2) | 65,9 | 211,1 | 0(65,7) | 0 |
| b1 | 0(65,7) | ∞ | 113,1 | 259 | 65,7 | 65,7 |
| b2 | 0(0) | 47,2 | ∞ | 0(211,1) | 99,9 | 0 |
| b3 | 145,2 | 193,1 | 0(211,1) | ∞ | 283,3 | 145,2 |
| b7 | 0(65,7) | 65,7 | 165,8 | 349,2 | ∞ | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47,2 | 65,9 | 211,1 | 65,7 | 0 |

$$(a1, b1) = 0 + 47.2 = 47.2; (a1, b7) = 0 + 65.7 = 65.7; (b1, a1) = 65.7 + 0 = 65.7; (b2, a1) = 0 + 0 = 0; (b2, b3) = 0 + 211.1 = 211.1; (b3, b2) = 145.2 + 65.9 = 211.1; (b7, a1) = 65.7 + 0 = 65.7;$$

Найбільша сума констант приведення дорівнює $(0 + 211.1) = 211.1$ для ребра $(b2, b3)$, отже, множина розбивається на два підмножини $(b2, b3)$ та $(b2^*, b3^*)$.

Виключення ребра $(b2, b3)$ проводимо шляхом заміни елемента $(b2, b3) = 0$ на ∞ , після чого здійснюємо чергове приведення матриці відстаней для утвореного підмножини $(b2^*, b3^*)$, в результаті отримаємо редуковану матрицю.

Крок 1.2 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b3 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0 | 65,9 | 211,1 | 0 | 0 |
| b1 | 0 | ∞ | 113,1 | 259 | 65,7 | 0 |
| b2 | 0 | 47,2 | ∞ | ∞ | 99,9 | 0 |
| b3 | 145,2 | 193,1 | 0 | ∞ | 283,3 | 0 |
| b7 | 0 | 65,7 | 165,8 | 349,2 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 211,1 | 0 | 211,1 |

Нижня межа гамільтонових циклів цієї підмножини:

$$\omega(b2', b3') = 711.5 + 211.1 = 922.6$$

Включення ребра (b2,b3) проводиться шляхом виключення всіх елементів 3-го рядка та 4-го стовпця, в якому елемент (b2,b3) замінюємо на ∞ , для виключення утворення негамільтонового циклу.

У результаті отримаємо іншу скорочену матрицю (4 x 4), яка підлягає операції приведення.

Після операції приведення скорочена матриця буде мати вигляд:

Крок 1.3 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0 | 65,9 | 0 | 0 |
| b1 | 0 | ∞ | 113,1 | 65,7 | 0 |
| b3 | 145,2 | 193,1 | ∞ | 283,3 | 145,2 |
| b7 | 0 | 65,7 | 165,8 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 65,9 | 0 | ∞ |

Нижня межа підмножини (b2,b3) дорівнює:

$$\omega(b2, b3) = 711.5 + 211.1 = 922.6 \leq 922.6$$

Оскільки нижні межі підмножини (b2,b3) та підмножини (b2*,b3*) рівні, то ребро (3,4) включаємо в маршрут з новою межею 922.6.

Крок 2. Визначаємо ребро розгалуження

Крок 2.1 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|----------|----------------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0(47,9) | 0(47,2) | 0(65,7) | 0 |
| b1 | 0(47,2) | ∞ | 47,2 | 65,7 | 47,2 |
| b3 | 0(47,9) | 47,9 | ∞ | 138,1 | 47,9 |

Продовження табл. 2.17

| | | | | | |
|---------------------|---------|------|------|----------|------|
| b7 | 0(65,7) | 65,7 | 99,9 | ∞ | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47,9 | 47,2 | 65,7 | 0 |

Максимальне значення: $(a1, b7) = 65,7$

Виключення ребра $(a1, b7)$

Таблиця 2.18

Крок 2.2 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0 | 0 | ∞ | 0 |
| b1 | 0 | ∞ | 47,2 | 65,7 | 0 |
| b3 | 0 | 47,9 | ∞ | 138,1 | 0 |
| b7 | 0 | 65,7 | 99,9 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 65,7 | 65,7 |

Нижня межа підмножини $(a1^*, b7^*)$ дорівнює:

$$\omega(a1', b7') = 922.6 + 65.7 = 988.3$$

Включення ребра $(a1, b7)$: $(b7, a1) = \infty$

Крок 2.3 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| b1 | 0 | ∞ | 47,2 | 0 |
| b3 | 0 | 47,9 | ∞ | 0 |
| b7 | ∞ | 65,7 | 99,9 | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47,9 | 47,2 | 160,8 |

Нижня межа підмножини (a1,b7) дорівнює:

$$\omega(a1, b7) = 922.6 + 160.8 = 1083.4 > 988.3$$

Оскільки нижня межа цієї підмножини (a1,b7) більша, ніж підмножини (a1*,b7*), то ребро (a1,b7) не включаємо в маршрут.

Крок 3. Визначаємо ребро розгалуження

Крок 3.1 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0(47,9) | 0(47,2) | ∞ | 0 |
| b1 | 0(47,2) | ∞ | 47,2 | 65,7 | 47,2 |
| b3 | 0(47,9) | 47,9 | ∞ | 138,1 | 47,9 |
| b7 | 0(65,7) | 65,7 | 99,9 | ∞ | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47,9 | 47,2 | 65,7 | 0 |

Максимальне значення: $(b7,a1) = 65,7$

Виключення ребра $(b7,a1)$

Таблиця 2.21

Крок 3.2 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0 | 0 | ∞ | 0 |
| b1 | 0 | ∞ | 47,2 | 65,7 | 0 |
| b3 | 0 | 47,9 | ∞ | 138,1 | 0 |
| b7 | ∞ | 65,7 | 99,9 | ∞ | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 65,7 | 131,4 |

Нижня межа підмножини $(b7^*,a1^*)$ дорівнює:

$$\omega(b7', a1') = 922.6 + 131.4 = 1054$$

Включення ребра $(b7,a1)$: $(a1, b7) = \infty$

Таблиця 2.22

Крок 3.3 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | 0 | 0 | ∞ | 0 |
| b1 | ∞ | 47,2 | 65,7 | 47,2 |
| b3 | 47,9 | ∞ | 138,1 | 47,9 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 65,7 | 160,8 |

Нижня межа підмножини (b7,a1) дорівнює:

$$\omega(b7, a1) = 922.6 + 160.8 = 1083.4 > 1054$$

Оскільки нижня межа цієї підмножини (b7,a1) більша, ніж підмножини (b7*,a1*), то ребро (b7,a1) не включаємо в маршрут.

Крок 4. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.23

Крок 4.1 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0(47,9) | 0(47,2) | ∞ | 0 |
| b1 | 0(0) | ∞ | 47,2 | 0(72,4) | 0 |
| b3 | 0(47,9) | 47,9 | ∞ | 72,4 | 47,9 |
| b7 | ∞ | 65,7 | 99,9 | ∞ | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47,9 | 47,2 | 72,4 | 0 |

Максимальне значення: (b1,b7) = 72,4

Виключення ребра (b1,b7)

Таблиця 2.24

Крок 4.2 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | b7 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0 | 0 | ∞ | 0 |
| b1 | 0 | ∞ | 47,2 | ∞ | 0 |
| b3 | 0 | 47,9 | ∞ | 72,4 | 0 |

Продовження табл. 2.24

| | | | | | |
|---------------------|----------|------|------|----------|-------|
| b7 | ∞ | 65,7 | 99,9 | ∞ | 65,7 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 72,4 | 138,1 |

Нижня межа підмножини $(b1^*, b7^*)$ дорівнює:

$$\omega(b1', b7') = 922.6 + 138.1 = 1060.7$$

Включення ребра $(b1, b7)$: $(b1, b7) = \infty$

Таблиця 2.25

Крок 4.3 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0 | 0 | 0 |
| b3 | 0 | 47,9 | ∞ | 0 |
| b7 | ∞ | ∞ | 99,9 | 99,9 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 99,9 |

Нижня межа підмножини $(b1, b7)$ дорівнює:

$$\omega(b1, b7) = 922.6 + 99.9 = 1022.5 \leq 1060.7$$

Ребро $(b1, b7)$ включаємо в маршрут з новою межею 1022.5.

Крок 5. Визначаємо ребро розгалуження

Крок 5.1 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | 0(47.9) | 0(0) | 0 |
| b3 | 0(47.9) | 47.9 | ∞ | 47.9 |
| b7 | ∞ | ∞ | 0(0) | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47.9 | 0 | 0 |

Максимальне значення: $(a1, b1) = 47.9$

Виключення ребра $(a1, b1)$

Крок 5.2 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | b2 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| a1 | ∞ | ∞ | 0 | 0 |
| b3 | 0 | 47,9 | ∞ | 0 |
| b7 | ∞ | ∞ | 0 | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 47,9 | 0 | 47,9 |

Нижня межа підмножини $(a1^*, b1^*)$ дорівнює:

$$\omega(a1', b1') = 1022.5 + 47.9 = 1070.4$$

Включення ребра $(a1, b1)$: $(b1, a1) = \infty$

Крок 5.3 для складу a1

| Пункт | a1 | b1 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|---------------------|
| a1 | 0 | ∞ | 0 |
| b1 | ∞ | 0 | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 |

Нижня межа підмножини (a1,b1) дорівнює:

$$\omega(a1, b1) = 1022.5 + 0 = 1022.5 \leq 1070.4$$

Ребро (a1,b1) включаємо в маршрут з новою межею 1022,5.

Відповідно до цієї матриці включаємо в гамільтонів маршрут ребра (b3,a1) та (b7,b2).

У результаті по дереву розгалужень гамільтонів цикл утворюють ребра:(b2,b3), (b3,a1), (a1,b1), (b1,b7), (b7,b2).

Так як початок маршруту завжди починається зі складу a1, то, аналізуючи отримані гілки дерева рішень, отримуємо рішення:

$$(a1,b1), (b1,b7), (b7,b2), (b2,b3), (b3,a1)$$

Довжина маршруту дорівнює 1088,2 км.

Транспортна робота для складу a1 в даному випадку становить:

$$P = 91.1 * 4 + 201.3 * 2.9 + 301.4 * 2.1 + 174.6 * 0.6 = 1685.87$$

пробіг з вантажем:

$$L = 91.1 + 201.3 + 301.4 + 174.6 = 768.4$$

Тепер розглянемо транспортну роботу для кільцевого маршруту для складу а2.

Таблиця 2.29

Матриця найкоротших відстаней між пунктами, закріпленими за другим складом

| Пункт | а2 | б4 | б5 | б7 | б8 | Мінімальний елемент |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| а2 | ∞ | 381,8 | 191,7 | 141,2 | 41 | 41 |
| б4 | 381,8 | ∞ | 432 | 386,5 | 419,2 | 381,8 |
| б5 | 191,7 | 432 | ∞ | 318,6 | 231,2 | 191,7 |
| б7 | 141,2 | 386,5 | 318,6 | ∞ | 167,3 | 141,2 |
| б8 | 41 | 419,2 | 231,2 | 167,3 | ∞ | 41 |
| Загалом | | | | | | 796,7 |

Відніmemo з кожного рядка знайдені мінімальні значення і визначимо найменший елемент для кожного стовпця.

Таблиця 2.30

Скорегована матриця найкоротших відстаней

| Пункт | а2 | б4 | б5 | б7 | б8 |
|-------|----------|----------|----------|-------|------|
| а2 | ∞ | 340,8 | 150,7 | 100,2 | 0 |
| б4 | 0 | ∞ | 50,2 | 4,7 | 37,4 |
| б5 | 0 | 240,3 | ∞ | 126,9 | 39,5 |

| | | | | | |
|----|---|-------|-------|----------|------|
| b7 | 0 | 245,3 | 177,4 | ∞ | 26,1 |
|----|---|-------|-------|----------|------|

Продовження табл. 2.30

| | | | | | |
|------------------------|---|-------|-------|-------|----------|
| b8 | 0 | 378,2 | 190,2 | 126,3 | ∞ |
| Мінімальний елемент | 0 | 240,3 | 50,2 | 4,7 | 0 |

Після віднімання мінімальних елементів отримуємо повністю редуковану матрицю.

Таблиця 2.31

Повністю редукована матриця для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | b7 | b8 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| a2 | ∞ | 100,5 | 100,5 | 95,5 | 0 |
| b4 | 0 | ∞ | 0 | 0 | 37,4 |
| b5 | 0 | 0 | ∞ | 122,2 | 39,5 |
| b7 | 0 | 5 | 127,2 | ∞ | 26,1 |
| b8 | 0 | 137,9 | 140 | 121,6 | ∞ |

Сума констант приведення визначає нижню межу:

$$\omega(x) = 41 + 381.8 + 191.7 + 141.2 + 41 + 0 + 240.3 + 50.2 + 4.7 + 0 = 1091.9$$

Крок 1. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.32

Крок 1.1 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | b7 | b8 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|---------------------|
| a2 | ∞ | 100,5 | 100,5 | 95,5 | 0(121,6) | 95,5 |
| b4 | 0(0) | ∞ | 0(100,5) | 0(95,5) | 37,4 | 0 |
| b5 | 0(0) | 0(5) | ∞ | 122,2 | 39,5 | 0 |
| b7 | 0(5) | 5 | 127,2 | ∞ | 26,1 | 5 |
| b8 | 0(121,6) | 137,9 | 140 | 121,6 | ∞ | 121,6 |
| Мінімальний елемент | 0 | 5 | 100,5 | 95,5 | 26,1 | 0 |

Максимальне значення: $(a2, b8) = 121,6$

Виключення ребра $(a2, b8)$

Таблиця 2.33

Крок 1.2 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | b7 | b8 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a2 | ∞ | 100,5 | 100,5 | 95,5 | ∞ | 95,5 |
| b4 | 0 | ∞ | 0 | 0 | 37,4 | 0 |
| b5 | 0 | 0 | ∞ | 122,2 | 39,5 | 0 |
| b7 | 0 | 5 | 127,2 | ∞ | 26,1 | 0 |
| b8 | 0 | 137,9 | 140 | 121,6 | ∞ | 0 |

| | | | | | | |
|---------------------|---|---|---|---|------|-------|
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 0 | 26,1 | 121,6 |
|---------------------|---|---|---|---|------|-------|

Нижня межа підмножини $(a2^*, b8^*)$ дорівнює:

$$\omega(a2', b8') = 1091.9 + 121.6 = 1213.5$$

Включення ребра $(a2, b8)$: $(b8, a2) = \infty$

Таблиця 2.34

Крок 1.3 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | 0 | ∞ | 0 | 0 | 0 |
| b5 | 0 | 0 | ∞ | 122,2 | 0 |
| b7 | 0 | 5 | 127,2 | ∞ | 0 |
| b8 | ∞ | 137,9 | 140 | 121,6 | 121,6 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 0 | 121,6 |

Нижня межа підмножини $(a2, b8)$ дорівнює:

$$\omega(a2, b8) = 1091.9 + 121.6 = 1213.5 \leq 1213.5$$

Оскільки нижні межі підмножини $(a2, b8)$ і підмножини $(a2^*, b8^*)$ рівні, то ребро $(a2, b8)$ включаємо в маршрут з новою межею 1213.5.

Крок 2. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.35

Крок 2.1 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------------|----------|---------------------|
| b4 | 0(0) | ∞ | 0(18,4) | 0(0) | 0 |
| b5 | 0(0) | 0(5) | ∞ | 122,2 | 0 |
| b7 | 0(5) | 5 | 127,2 | ∞ | 5 |
| b8 | ∞ | 16,3 | 18,4 | 0(16,3) | 16,3 |
| Мінімальний елемент | 0 | 5 | 18,4 | 0 | 0 |

Максимальне значення: $(b4, b5) = 18,4$

Виключення ребра $(b4, b5)$

Таблиця 2.36

Крок 2.2 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | b7 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | 0 | ∞ | ∞ | 0 | 0 |
| b5 | 0 | 0 | ∞ | 122,2 | 0 |
| b7 | 0 | 5 | 127,2 | ∞ | 0 |
| b8 | ∞ | 16,3 | 18,4 | 0 | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 18,4 | 0 | 18,4 |

Нижня межа підмножини $(b4^*, b5^*)$ дорівнює:

$$\omega(b4', b5') = 1213.5 + 18.4 = 1231.9$$

Включення ребра $(b4, b5)$: $(b5, b4) = \infty$

Таблиця 2.37

Крок 2.3 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | 0 | ∞ | 122,2 | 0 |
| b5 | 0 | 5 | ∞ | 0 |
| b7 | ∞ | 16,3 | 0 | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 5 | 0 | 5 |

Нижня межа підмножини $(b4, b5)$: дорівнює:

$$\omega(b4, b5) = 1213.5 + 5 = 1218.5 \leq 1231.9$$

Ребро $(b4, b5)$ включаємо в маршрут з новою меже 1218.5.

Крок 3. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.38

Крок 3.1 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|-------|---------------------|
| b4 | 0(122,2) | ∞ | 122,2 | 122,2 |

| | | | | |
|----|----------|---------|-----------------|------|
| b5 | 0(0) | 0(11,3) | ∞ | 0 |
| b7 | ∞ | 11,3 | 0(133,5) | 11,3 |

Продовження табл. 2.38

| | | | | |
|---------------------|---|------|-------|---|
| Мінімальний елемент | 0 | 11,3 | 122,2 | 0 |
|---------------------|---|------|-------|---|

Максимальне значення: $(b7, b5) = 133,5$

Виключення ребра $(b7, b5)$

Таблиця 2.39

Крок 3.2 для складу a2

| Пункт | a2 | b4 | b5 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | 0 | ∞ | 122,2 | 0 |
| b5 | 0 | 0 | ∞ | 0 |
| b7 | ∞ | 11,3 | ∞ | 11,3 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 122,2 | 133,5 |

Нижня межа підмножини $(b7^*, b5^*)$ дорівнює:

$$\omega(b7', b5') = 1218.5 + 133.5 = 1352$$

Включення ребра $(b7, b5)$: $(b5, b7) = \infty$

Таблиця 2.39

Крок 3.3 для складу a2

| | | | |
|-------|----|----|------------------------|
| Пункт | a2 | b4 | Мінімальний елемент |
|-------|----|----|------------------------|

Продовження табл. 2.39

| | | | |
|------------------------|---|----------|---|
| b4 | 0 | ∞ | 0 |
| b5 | 0 | 0 | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 |

Нижня межа підмножини (b7,b5): дорівнює:

$$\omega(b7, b5) = 1218.5 + 0 = 1218.5 \leq 1352$$

Ребро (b7,b5) включаємо в маршрут з новою меже 1218.5.

Відповідно до цієї матриці включаємо в гамільтонів маршрут ребра (b5,a2) та (b7,b4).

У результаті по дереву розгалужень гамільтонів цикл утворюють ребра: (a2,b8), (b8,b7), (b7,b4), (b4,b5), (b5,a2),

Довжина маршруту дорівнює 1218,5 км.

Транспортна робота для складу a1 в даному випадку становить:

$$P = 41 * 2.2 + 167.3 * 1.5 + 386.5 * 1.4 + 432 * 1 = 1314.25$$

пробіг з вантажем:

$$L = 41 + 167.3 + 386.5 + 432 = 1026.8$$

Тепер розглянемо транспортну роботу для кільцевого маршруту для складу a3.

Таблиця 2.40

Матриця найкоротших відстаней між пунктами, закріпленими за третім складом

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b10 | b11 | Мінімальний елемент |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a3 | ∞ | 247,5 | 105,1 | 337,2 | 259 | 133,4 | 105,1 |
| b4 | 247,5 | ∞ | 498,1 | 311,6 | 145,2 | 135,8 | 135,8 |
| b6 | 105,1 | 498,1 | ∞ | 378,1 | 314,9 | 212 | 105,1 |
| b9 | 337,2 | 311,6 | 378,1 | ∞ | 196 | 317,3 | 196 |
| b10 | 259 | 145,2 | 314,9 | 196 | ∞ | 148,6 | 145,2 |
| b11 | 133,4 | 135,8 | 212 | 317,3 | 148,6 | ∞ | 133,4 |
| Загалом | | | | | | | 820,6 |

Віднімемо з кожного рядка знайдені мінімальні значення і визначимо найменший елемент для кожного стовпця.

Таблиця 2.41

Скорегована матриця найкоротших відстаней

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b10 | b11 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| a3 | ∞ | 142,4 | 0 | 232,1 | 153,9 | 28,3 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 175,8 | 9,4 | 0 |
| b6 | 0 | 393 | ∞ | 273 | 209,8 | 106,9 |
| b9 | 141,2 | 115,6 | 182,1 | ∞ | 0 | 121,3 |
| b10 | 113,8 | 0 | 169,7 | 50,8 | ∞ | 3,4 |
| b11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 183,9 | 15,2 | ∞ |

| | | | | | | |
|------------------------|---|---|---|------|---|---|
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 50,8 | 0 | 0 |
|------------------------|---|---|---|------|---|---|

Після віднімання мінімальних елементів отримуємо повністю редуковану матрицю.

Таблиця 2.42

Повністю редукована матриця для складу а3

| Пункт | а3 | б4 | б6 | б9 | б10 | б11 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| а3 | ∞ | 142,4 | 0 | 181,3 | 153,9 | 28,3 |
| б4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 125 | 9,4 | 0 |
| б6 | 0 | 393 | ∞ | 222,2 | 209,8 | 106,9 |
| б9 | 141,2 | 115,6 | 182,1 | ∞ | 0 | 121,3 |
| б10 | 113,8 | 0 | 169,7 | 0 | ∞ | 3,4 |
| б11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 133,1 | 15,2 | ∞ |

Сума констант приведення визначає нижню межу:

$$\omega(x) = 105.1 + 135.8 + 105.1 + 196 + 145.2 + 133.4 + 0 + 0 + 0 + 50.8 + 0 + 0 = 871.4$$

Крок 1. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.43

Крок 1.1 для складу а3

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b10 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|----------|-------|-------|---------|---------------------|
| a3 | ∞ | 142,4 | 0(106,9) | 181,3 | 153,9 | 28,3 | 28,3 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 125 | 9,4 | 0(12,8) | 9,4 |
| b6 | 0(106,9) | 393 | ∞ | 222,2 | 209,8 | 106,9 | 106,9 |

Продовження табл. 2.43

| | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------|-------|---------------|----------|----------|-------|
| b9 | 141,2 | 115,6 | 182,1 | ∞ | 0(125) | 121,3 | 115,6 |
| b10 | 113,8 | 0(2,4) | 169,7 | 0(125) | ∞ | 3,4 | 0 |
| b11 | 0(2,4) | 2,4 | 78,6 | 133,1 | 15,2 | ∞ | 2,4 |
| Мінімальний елемент | 0 | 2,4 | 78,6 | 125 | 9,4 | 3,4 | 0 |

Максимальне значення: $(b_{10}, b_9) = 125$

Виключення ребра (b_{10}, b_9)

Таблиця 2.44

Крок 1.2 для складу a3

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b10 | b11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a3 | ∞ | 142,4 | 0 | 181,3 | 153,9 | 28,3 | 0 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 125 | 9,4 | 0 | 0 |
| b6 | 0 | 393 | ∞ | 222,2 | 209,8 | 106,9 | 0 |
| b9 | 141,2 | 115,6 | 182,1 | ∞ | 0 | 121,3 | 0 |
| b10 | 113,8 | 0 | 169,7 | ∞ | ∞ | 3,4 | 0 |
| b11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 133,1 | 15,2 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 125 | 0 | 0 | 125 |

Нижня межа підмножини (b10*,b9*) дорівнює:

$$\omega(b10', b9') = 871.4 + 125 = 996.4$$

Включення ребра (b10,b9): (b9,b10) = ∞

Таблиця 2.45

Крок 1.3 для складу а3

| Пункт | а3 | б4 | б6 | б10 | б11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| а3 | ∞ | 142,4 | 0 | 153,9 | 28,3 | 0 |
| б4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 9,4 | 0 | 0 |
| б6 | 0 | 393 | ∞ | 209,8 | 106,9 | 0 |
| б9 | 141,2 | 115,6 | 182,1 | ∞ | 121,3 | 115,6 |
| б11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 15,2 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 2,4 | 0 | 9,4 | 0 | 127,4 |

Нижня межа підмножини (b10,b9) дорівнює:

$$\omega(b10, b9) = 871.4 + 127.4 = 998.8 > 996.4$$

Оскільки нижня межа цього підмножини (b10,b9) більша, ніж підмножина (b10*,b9*), то ребро (b10,b9) не включаємо в маршрут.

Крок 2. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.46

Крок 2.1 для складу а3

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b10 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|----------|-------|-------|---------|---------------------|
| a3 | ∞ | 142,4 | 0(106,9) | 181,3 | 153,9 | 28,3 | 28,3 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 125 | 9,4 | 0(12,8) | 9,4 |
| b6 | 0(106,9) | 111,7 | ∞ | 222,2 | 209,8 | 106,9 | 106,9 |

Продовження табл. 2.46

| | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------|-------|----------|---------------|----------|-------|
| b9 | 141,2 | 115,6 | 111,7 | ∞ | 0(125) | 121,3 | 115,6 |
| b10 | 113,8 | 0(2,4) | 169,7 | ∞ | ∞ | 3,4 | 0 |
| b11 | 0(2,4) | 2,4 | 78,6 | 111,7 | 111,7 | ∞ | 2,4 |
| Мінімальний елемент | 0 | 2,4 | 78,6 | 125 | 9,4 | 111,7 | 0 |

Максимальне значення: $(b9, b10) = 125$

Виключення ребра $(b9, b10)$

Таблиця 2.47

Крок 2.2 для складу a3

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b10 | b11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a3 | ∞ | 142,4 | 0 | 181,3 | 153,9 | 28,3 | 0 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 125 | 9,4 | 0 | 0 |
| b6 | 0 | 393 | ∞ | 222,2 | 209,8 | 106,9 | 0 |
| b9 | 141,2 | 115,6 | 182,1 | ∞ | ∞ | 121,3 | 115,6 |
| b10 | 113,8 | 0 | 169,7 | ∞ | ∞ | 3,4 | 0 |
| b11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 133,1 | 15,2 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 125 | 9,4 | 0 | 250 |

Нижня межа підмножини (b9*,b10*) дорівнює:

$$\omega(b9', b10') = 871.4 + 250 = 1121.4$$

Включення ребра (b9,b10): (b10,b9) = ∞

Таблиця 2.48

Крок 2.3 для складу а3

| Пункт | а3 | б4 | б6 | б9 | б11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| а3 | ∞ | 142,4 | 0 | 181,3 | 28,3 | 0 |
| б4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 125 | 0 | 0 |
| б6 | 0 | 393 | ∞ | 222,2 | 106,9 | 0 |
| б10 | 113,8 | 0 | 169,7 | ∞ | 3,4 | 0 |
| б11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 133,1 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 125 | 0 | 125 |

Нижня межа підмножини (b9,b10) дорівнює:

$$\omega(b9, b10) = 871.4 + 125 = 996.4 \leq 1121.4$$

Ребро (b9,b10) включаємо в маршрут з новою межею 996.4.

Крок 3. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.49

Крок 3.1 для складу а3

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----------|-----------------|----------|--------|---------------------|
| a3 | ∞ | 142,4 | 0(106,9) | 56,3 | 28,3 | 28,3 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 0(8,1) | 0(3,4) | 0 |
| b6 | 0(97,2) | 393 | ∞ | 97,2 | 106,9 | 97,2 |
| b10 | 113,8 | 0(5,8) | 169,7 | ∞ | 3,4 | 3,4 |

Продовження табл. 2.49

| | | | | | | |
|---------------------|--------|-----|------|-----|----------|-----|
| b11 | 0(2,4) | 2,4 | 78,6 | 8,1 | ∞ | 2,4 |
| Мінімальний елемент | 0 | 2,4 | 78,6 | 8,1 | 3,4 | 0 |

Максимальне значення: $(a3, b6) = 106,9$

Виключення ребра $(a3, b6)$

Таблиця 2.50

Крок 3.2 для складу a3

| Пункт | a3 | b4 | b6 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| a3 | ∞ | 142,4 | ∞ | 56,3 | 28,3 | 28,3 |
| b4 | 111,7 | ∞ | 362,3 | 0 | 0 | 0 |
| b6 | 0 | 393 | ∞ | 97,2 | 106,9 | 0 |
| b10 | 113,8 | 0 | 169,7 | ∞ | 3,4 | 0 |
| b11 | 0 | 2,4 | 78,6 | 8,1 | ∞ | 0 |
| Мінімальний | 0 | 0 | 78,6 | 0 | 0 | 106,9 |

| | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|
| елемент | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|

Нижня межа підмножини (a_3^*, b_6^*) дорівнює:

$$\omega(a_3', b_6') = 996.4 + 106.9 = 1103.3$$

Включення ребра (a_3, b_6) : $(b_6, a_3) = \infty$

Таблиця 2.51

Крок 3.3 для складу а3

| Пункт | а3 | б4 | б9 | б11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| б4 | 111,7 | ∞ | 0 | 0 | 0 |
| б6 | ∞ | 393 | 97,2 | 106,9 | 97,2 |
| б10 | 113,8 | 0 | ∞ | 3,4 | 0 |
| б11 | 0 | 2,4 | 8,1 | ∞ | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 0 | 97,2 |

Нижня межа підмножини (a_3, b_6) дорівнює:

$$\omega(a_3, b_6) = 996.4 + 97.2 = 1093.6 \leq 1103.3$$

Ребро (a_3, b_6) включаємо в маршрут з новою межею 1093.6.

Крок 4. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.52

Крок 4.1 для складу а3

| Пункт | a3 | b4 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|-----------------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | 111,7 | ∞ | 0(0) | 0(3,4) | 0 |
| b6 | ∞ | 295,8 | 0(9,7) | 9,7 | 9,7 |
| b10 | 113,8 | 0(5,8) | ∞ | 3,4 | 3,4 |
| b11 | 0(114,1) | 2,4 | 8,1 | ∞ | 2,4 |
| Мінімальний елемент | 111,7 | 2,4 | 0 | 3,4 | 0 |

Максимальне значення: $(b11, a3) = 114,1$

Виключення ребра $(b11, a3)$

Таблиця 2.53

Крок 4.2 для складу a3

| Пункт | a3 | b4 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | 111,7 | ∞ | 0 | 0 | 0 |
| b6 | ∞ | 295,8 | 0 | 9,7 | 0 |
| b10 | 113,8 | 0 | ∞ | 3,4 | 0 |
| b11 | ∞ | 2,4 | 8,1 | ∞ | 2,4 |
| Мінімальний елемент | 111,7 | 0 | 0 | 0 | 114,1 |

Нижня межа підмножини $(b11^*, a3^*)$ дорівнює:

$$\omega(b11', a3') = 1093.6 + 114.1 = 1207.7$$

Включення ребра $(b11, a3)$: $(a3, b11) = \infty$

Таблиця 2.54

Крок 4.3 для складу а3

| Пункт | b4 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------|----------|----|-----|------------------------|
| b4 | ∞ | 0 | 0 | 0 |

Продовження табл. 2.54

| | | | | |
|------------------------|-------|----------|-----|---|
| b6 | 295,8 | 0 | 9,7 | 0 |
| b10 | 0 | ∞ | 3,4 | 0 |
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 | 0 |

Нижня межа підмножини (b11, a3) дорівнює:

$$\omega(b11, a3) = 1093.6 + 0 = 1093.6 \leq 1207.7$$

Ребро (b11, a3) включаємо в маршрут з новою межею 1093.6.

Крок 5. Визначаємо ребро розгалуження

Таблиця 2.55

Крок 5.1 для складу а3

| Пункт | b4 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------|-----------------|----------|----------|------------------------|
| b4 | ∞ | 0(0) | 0(3,4) | 0 |
| b6 | 295,8 | 0(295,8) | ∞ | 295,8 |
| b10 | 0(299,2) | ∞ | 3,4 | 3,4 |

| | | | | |
|---------------------|-------|---|-----|---|
| Мінімальний елемент | 295,8 | 0 | 3,4 | 0 |
|---------------------|-------|---|-----|---|

Максимальне значення: $(b_{10}, b_4) = 299,2$

Виключення ребра (b_{10}, b_4)

Таблиця 2.56

Крок 5.2 для складу а3

| Пункт | b4 | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| b4 | ∞ | 0 | 0 | 0 |
| b6 | 295,8 | 0 | ∞ | 0 |
| b10 | ∞ | ∞ | 3,4 | 3,4 |
| Мінімальний елемент | 295,8 | 0 | 0 | 299,2 |

Нижня межа підмножини (b_{10}^*, b_4^*) дорівнює:

$$\omega(b_{10}', b_4') = 1093.6 + 299.2 = 1392.8$$

Включення ребра (b_{10}, b_4) : $(b_4, b_{10}) = \infty$

Таблиця 2.57

Крок 5.3 для складу а3

| Пункт | b9 | b11 | Мінімальний елемент |
|-------|----|----------|---------------------|
| b4 | 0 | 0 | 0 |
| b6 | 0 | ∞ | 0 |

| | | | |
|------------------------|---|---|---|
| Мінімальний елемент | 0 | 0 | 0 |
|------------------------|---|---|---|

Нижня межа підмножини (b10,b4) дорівнює:

$$\omega(b_{10}, b_4) = 1093.6 + 0 = 1093.6 \leq 1392.8$$

Ребро (b10,b4) включаємо в маршрут з новою межею 1392.8.

Відповідно до цієї матриці включаємо в гамільтонів маршрут ребра (2,6) та (3,4).

У результаті по дереву розгалужень гамільтонів цикл утворюють ребра: (b9,b10), (b10,b4), (b4,b11), (b11,a3), (a3,b6), (b6,b9),

Так як початок маршруту завжди починається зі складу a1, то, аналізуючи отримані гілки дерева рішень, отримуємо рішення:

$$(a_3, b_6), (b_6, b_9), (b_9, b_{10}), (b_{10}, b_4), (b_4, b_{11}), (b_{11}, a_3)$$

Довжина маршруту дорівнює 1093,6 км.

Транспортна робота для складу a1 в даному випадку становить:

$$P = 105.1 * 4 + 378.1 * 3.4 + 196 * 2.1 + 145.2 * 1 + 135.8 * 0.9 = 2384.96$$

пробіг з вантажем:

$$L = 105.1 + 378.1 + 196 + 145.2 + 135.8 = 960.2$$

2.4 Порівняльний аналіз показників існуючої та запропонованої схеми транспортування

Порівняльний аналіз показників існуючої та запропонованої схеми транспортування дозволяє оцінити ефективність різних підходів до організації вантажних перевезень. Основними критеріями, за якими проводилось порівняння, є пробіг (загальний та пробіг з вантажем) та транспортна робота, що виражається в т * км.

Таблиця 2.58

Результат послідовної оптимізації перевезення вантажу

| Варіант | Пробіг (пробіг з вантажем), км | Транспортна робота, т * км |
|---|--------------------------------|----------------------------|
| Існуючий розподіл | 4064,2 (2032,1) | 1928,14 |
| Розв'язання транспортного завдання (метод Фогеля) | 3890,4 (1945,2) | 1972.86 |
| Маршрутизація | 3516,8 (2755,4) | 5385,08 |

Почнемо з аналізу показників існуючої схеми транспортування. Пробіг становить 4064,2 км, з яких 2032,1 км проходять з вантажем. Транспортна робота при цьому становить 1928,14 т * км. Ці показники відображають поточну ефективність використання транспортних засобів в організації.

При використанні методу Фогеля для розв'язання транспортного завдання, пробіг зменшується до 3890,4 км, з яких 1945,2 км складає пробіг з вантажем.

Транспортна робота при цьому збільшується до 1972,86 т * км. Метод Фогеля передбачає оптимізацію транспортних маршрутів для зменшення загальних витрат на перевезення, в даному випадку спостерігається зменшення як загального пробігу, так і пробігу з вантажем.

Найбільшу ефективність показує метод маршрутизації, де загальний пробіг складає 3516,8 км, з яких 2755,4 км проходять з вантажем. Транспортна робота при цьому досягає 5385,08 т * км, що суттєво перевищує показники як існуючої схеми, так і розв'язання транспортного завдання методом Фогеля. Метод маршрутизації передбачає детальне планування маршрутів та оптимізацію кожного перевезення, що дозволяє максимально ефективно використовувати транспортні засоби та зменшити порожні пробіги.

Порівняльний аналіз показує, що існуюча схема транспортування має найнижчі показники транспортної роботи, що свідчить про її неефективність [16]. Метод Фогеля покращує цей показник, але збільшує загальний пробіг, що не відповідає цілям зниження витраченого часу на перевезення. Найкращі результати демонструє метод маршрутизації, що дозволяє суттєво підвищити транспортну роботу при меншому загальному пробігу. Це свідчить про високу ефективність маршрутизації у плануванні вантажних перевезень та її здатність забезпечити оптимальне використання транспортних ресурсів.

Таким чином, для досягнення максимальної ефективності вантажних перевезень організації доцільно впровадити метод маршрутизації, що дозволить зменшити загальний пробіг транспортних засобів та збільшити обсяг виконуваної транспортної роботи. Це, в свою чергу, призведе до зниження витраченого часу, експлуатаційних витрат та підвищення загальної ефективності логістичних процесів.

2.5 Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимального шляху

У зв'язку з постійною динамікою в гуманітарній сфері, коли кількість лікарень та їх призначені склади можуть змінюватись у залежності від потреб та обставин, критично важливо мати ефективний інструмент для управління маршрутами доставки. Тому був розроблений програмний додаток на мові Python[7], який призначений для покриття всіх можливих варіантів маршрутів, що можуть вибиратись. Цей додаток дозволяє швидко адаптуватись до будь-яких змін у розподілі лікарень та складів. Він забезпечує надійне планування та координацію маршрутів доставки медичного обладнання та матеріалів, що є критично важливим у сучасних умовах воєнного конфлікту.

Перша частина програми завантажує дані з файлу JSON, які подані у додатку Г, де зберігаються відстані між пунктами, та перетворює їх у зручніший формат. Користувач обирає склад (a1, a2, a3) та вводить пункти для відвідування. Програма перевіряє коректність введених даних і використовує метод гілок та меж для знаходження оптимального маршруту, генеруючи всі можливі перестановки пунктів, обчислюючи довжину кожного шляху та знаходячи мінімальний. Оптимальний маршрут та пройдена відстань виводяться на екран. Для перевірки було введено приклад для другого складу (Рис. 2.2), щоб порівняти отримані результати. Програмний код основної частини програми поданий у додатку Д.

```
Виберіть склад з наступних: a1, a2, a3
Введіть вибраний склад: a2
Доступні пункти: ['b1', 'b2', 'b3', 'b4', 'b5', 'b6', 'b7', 'b8', 'b9', 'b10', 'b11']
Введіть пункти для відвідування через кому (наприклад, b1,b2,b3): b4,b5,b7,b8
Вибраний склад: a2
Вибрані пункти для відвідування: ['b4', 'b5', 'b7', 'b8']
Оптимальний шлях: a2 -> b5 -> b4 -> b7 -> b8 -> a2
Пройдена відстань: 1218.50 км
```

Рис. 2.2. Результат роботи програми

Результат, який видає програма повністю збігається з отриманим результатом після розрахунків.

Друга частина програми дозволяє додавати нові пункти до списку з внесенням відстаней до існуючих пунктів. Після введення назви нового пункту та відстаней до інших пунктів (Рис. 2.3), програма оновлює дані, додаючи новий пункт та відповідні відстані до файлу JSON. Оновлені дані зберігаються у файл, що забезпечує гнучкість та розширюваність системи. Таким чином, програмне забезпечення дозволяє вирішувати задачу комівояжера та оновлювати дані про пункти та відстані, роблячи систему зручною для використання та адаптації до нових умов. Програмний код допоміжної частини програми поданий у додатку Е.

```
Введіть назву нового пункту: z1
Введіть відстань від z1 до a1 (в км або '-' якщо немає шляху): 123.1
Введіть відстань від z1 до a2 (в км або '-' якщо немає шляху): 23.3
Введіть відстань від z1 до a3 (в км або '-' якщо немає шляху): -
Введіть відстань від z1 до b1 (в км або '-' якщо немає шляху): 123.2
Введіть відстань від z1 до b2 (в км або '-' якщо немає шляху): 423
Введіть відстань від z1 до b3 (в км або '-' якщо немає шляху): 134
Введіть відстань від z1 до b4 (в км або '-' якщо немає шляху): 23
```

Рис. 2.3. Результат роботи програми для додавання нового пункту

Щоб переконатися, що ми тепер можемо використовувати новий пункт, використаємо його для знаходження нового оптимального шляху для складу a1 та пунктів b1, z1 (Рис. 2.4).

```
Виберіть склад з наступних: a1, a2, a3
Введіть вибраний склад: a1
Доступні пункти: ['b1', 'b2', 'b3', 'b4', 'b5', 'b6', 'b7', 'b8', 'b9', 'b10', 'b11', 'z1']
Введіть пункти для відвідування через кому (наприклад, b1,b2,b3): b1,z1
Вибраний склад: a1
Вибрані пункти для відвідування: ['b1', 'z1']
Оптимальний шлях: a1 -> b1 -> z1 -> a1
Пройдена відстань: 337.40 км
```

Рис. 2.4. Результат роботи програми після додавання нового пункту

Розроблений програмний додаток спрямований на полегшення процесу планування та оптимізації маршрутів транспортування. Він дозволяє не лише знижувати витрати та час на доставку, але й адаптуватися до змінних умов та потреб організації за допомогою додавання нових пунктів отримання. Такий підхід забезпечує ефективність та гнучкість. Програмний код поданий у додатку А.

Висновки до розділу

У другому розділі роботи було проведено дослідження об'єкта з метою отримання вихідної інформації для моделювання, що є важливим етапом у створенні ефективної системи розподілу медикаментів для лікарень. Аналіз включав збір даних про відстані між пунктами потреби, склади, що постачають

медикаменти, та оцінку існуючих маршрутів. Це дозволило оцінити ефективність транспортної системи та виявити фактори, що потребують удосконалення.

Збір та обробка даних включала адреси складів та лікарень, що є критично важливими для планування ефективних маршрутів доставки. Це дозволило створити базу даних для аналізу географічного розподілу пунктів відправлення та призначення.

На основі зібраних даних була створена модель, яка дозволяє оптимізувати маршрути та покращити управління логістичними процесами. Це забезпечило більш ефективне використання ресурсів та скорочення витрат часу на перевезення.

Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє адаптуватися до змінних умов та потреб, додаючи нові пункти отримання та оновлюючи дані про відстані між ними. Це забезпечує ефективність та гнучкість логістичної системи.

ВИСНОВОК

В кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження з оптимізації логістичних маршрутів, що включало використання різних методів, таких як метод гілок та меж, генетичні алгоритми, метод симуляції відпалу, лінійне програмування та метод імітації. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, що залежить від специфіки задачі та умов її виконання.

Було проаналізовано існуючу транспортну систему організації НІ (Humanity & Inclusion) з метою виявлення її ефективності та можливостей для оптимізації. В ході дослідження були розглянуті такі аспекти, як використання маршрутів та ефективність виконання доставок. На основі отриманих результатів було виявлено необхідність у подальшому вдосконаленні системи для забезпечення більш ефективного та економічного використання ресурсів.

Розроблений програмний додаток дозволяє полегшити процес планування та оптимізації маршрутів транспортування, знижуючи витрати та час на доставку. Крім того, система має можливість адаптуватися до змінних умов та потреб організації за допомогою додавання нових пунктів отримання, що забезпечує її гнучкість та розширюваність. Таким чином, впровадження даного програмного забезпечення сприятиме підвищенню ефективності логістичних процесів та адаптивності до сучасних викликів, включаючи умови воєнного конфлікту.

Таким чином, виконане дослідження та розроблений програмний продукт підтвердили свою актуальність та ефективність для вирішення задач з оптимізації логістичних маршрутів, що робить їх корисними для широкого спектру практичних застосувань у сфері транспортування та логістики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поляков А. П. Логістичний підхід при постачанні підприємства сировиною та транспортуванні продукції споживачам / Терещенко О. П., Терещенко Є. О. – К.: ВМТ, 2015. – 95 с.
2. Савчук В. С. Логістика: теорія та практика: Навч. посіб. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 252 с.
3. Ткаченко Ю.О. Підсистема для планування і оптимізації транспортних маршрутів з використанням Google Maps автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук : спец. 122 «Комп'ютерні науки» / Ю.О. Ткаченко – Миколаїв, 2020. – 15 с.
4. Branch and Bound: Understanding the Branch and Bound Method in Computer Science URL: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/computer-science/algorithms-in-computer-science/branch-and-bound/> (дата звернення: 21.04.2024).
5. Mirosław Kordos. Optimization of Warehouse Operations with Genetic Algorithms. – Applied Machine Learning, 2020. – 16 с.
6. Shrinath Manoharan. Implementation of Linear Programming and Decision-Making Model for the Improvement of Warehouse Utilization. – Industrial Systems Engineering, 2022. – 12 с.
7. Schmidt, M. Route Optimization - Brute Force (Python) URL: https://martschm.github.io/python_route_optimization.html (дата звернення: 13.05.2024).
8. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. – Pearson, 2016. – 528 с.
9. Бергер М. В., Воронова Т. А. Основи логістики: Підручник. – Київ: Знання, 2021. – 348 с.

10. Lambert D. M., Cooper M. C., Pagh J. D. Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. – The International Journal of Logistics Management, 1998. – 18 с.
11. Thomas D. J., Griffin P. M. Coordinated Supply Chain Management. – European Journal of Operational Research, 1996. – 15 с.
12. Огурцов М.І., Ходзінський О.М. Розробка алгоритмів розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів з часовими вікнами. – Комп'ютерна математика, 2016. –134-142 с.
13. Іванов, Д., Долгий, А. Цифровий двійник ланцюга поставок для управління ризиками порушення та стійкістю в епоху Індустрії 4.0. – Огляд логістики та транспортування, 2020. – 64-71 с.
14. Панченко В. А., Панченко О. П. Оптимізація логістичних бізнес-процесів в умовах антикризового управління підприємством. – ПСТ, вип. 11, 2024. – 5 с.
15. Сохацька О. М. Міжнародна логістика. – Підручник, Тернопіль, ЗУНУ 2022. – 373 с.
16. Загурський О. М. Управління ланцюгом постачань. – Київ: Ямчинський О. В., 2023. – 332 с.
17. Кравченко О. П. Розумний транспорт і логістика для міст – Державний університет "Житомирська політехніка", 2021. – 615 с.
18. Іванов, О. М. Методи оптимізації: Навч. посіб. – К.: Видавництво Київського національного університету, 2010. – 146 с.
19. Лавров Є. А. Математичні методи дослідження операцій: Навч. посіб. – Суми.: Видавництво Сумського національного університету, 2017. – 212 с.
20. Крикавський Є. В., Похильченко О. А., Фертч М. Логістика та управління ланцюгами поставок: Навч. посіб. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 844 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

| № з/п | Позначення | Назва | Кількість аркушів | Примітки |
|----------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | Документація | | |
| 3 | | | | |
| 4 | САУ.КР.24.13.ПЗ. | Пояснювальна записка | 104 | Формат А4 |
| 5 | | | | |
| 6 | САУ.КР.24.13.ПЗ. | Демонстраційні матеріали | N2 | Презентація на CD-R |
| 7 | | | | |
| 8 | САУ.КР.24.13.ПЗ. | Копія роботи | 1 | Диск CD-R |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |
| 11 | | | | |
| 12 | | | | |
| 13 | | | | |
| 14 | | | | |
| 15 | | | | |
| | | | | САУ.КР.24.13.ДА.ПЗ. |
| Змін. | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |
| Розроб. | Могилевський О.Є. | | | |
| Керівн. | Одновол М.М. | | | |
| Керівн. Сп. Р. | Одновол М.М. | | | |
| Н.контр. | Хомяк Т. В. | | | |
| Зав. каф. | Желдак Т. А. | | | |
| | | Матеріали кваліфікаційної роботи | | Літ. Аркуш Аркушів |
| | | | | НТУ «ДП», 12; 124-20-1 |

Додаток Б. Відгук на кваліфікаційну роботу бакалавра

Відгук на кваліфікаційну роботу бакалавра студента групи 124-20-1 спеціальності 124 Системний аналіз

Тема кваліфікаційної роботи: Розробка математичної моделі прискореного планування перевезень вантажів при виконанні волонтерських задач.

Обсяг кваліфікаційної роботи 104 стор.

Мета кваліфікаційної роботи: Підвищення ефективності перевезень вантажів при виконанні волонтерських задач.

Актуальність теми: Робота актуальна так як пов'язана з вирішенням задач оперативного планування перевезень при зміні параметрів логістичної системи організації.

Тема кваліфікаційної роботи безпосередньо пов'язана з об'єктом діяльності бакалавра спеціальності 124 Системний аналіз, розробкою математичної моделі та її застосуванням для вирішення управлінських задач.

Виконані в кваліфікаційній роботі завдання відповідають вимогам ступеня бакалавра. Оригінальність запропонованих рішень полягає в застосуванні прискореного алгоритму планування при оперативних змінах параметрів об'єктів.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи полягає у застосуванні розробленої математичної моделі для оперативного планування процесів перевезення вантажів.

Висновки підтверджують можливість використання результатів роботи на об'єктах, які мають аналогічну структуру.

Оформлення пояснювальної записки та демонстраційного матеріалу до неї виконано згідно з вимогами. Роботу виконано самостійно, відповідно до завдання та у повному обсязі.

У роботі відзначено такі недоліки: 1) Текст кваліфікаційної роботи перенасичений інформацією, яку можливо було замінити посиланнями до літературних джерел; 2) При виборі методу вирішення задачі прискореного планування не проведено порівняння кількісних показників.

Кваліфікаційна робота в цілому заслуговує оцінки: 85 добре.

З урахуванням висловлених зауважень автор заслуговує присвоєння освітньої кваліфікації «бакалавр з системного аналізу».

Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра,

доцент

_____ / *Одновол М.М.*

Додаток Г. Файл JSON з відстанями існуючих пунктів

```
{  
  "Відстані": [  
    {  
      "Пункт": "a1",  
      "a1": "-",  
      "a2": "-",  
      "a3": "-",  
      "b1": 91.1,  
      "b2": 157,  
      "b3": 319.8,  
      "b4": 245.3,  
      "b5": 378,  
      "b6": 300.7,  
      "b7": 135.6,  
      "b8": 248.9,  
      "b9": 475,  
      "b10": 323,  
      "b11": 184.2  
    },  
    {  
      "Пункт": "a2",  
      "a1": "-",  
      "a2": "-",  
      "a3": "-",  
      "b1": 291.1,  
      "b2": 377,  
      "b3": 541,  
      "b4": 381.8,  
      "b5": 191.7,  
      "b6": 115.4,  
      "b7": 141.2,  
      "b8": 41,  
      "b9": 480.4,  
    }  
  ]  
}
```

```
"b10": 398.1,  
"b11": 249.9  
},  
{  
  "Пункт": "a3",  
  "a1": "-",  
  "a2": "-",  
  "a3": "-",  
  "b1": 276.3,  
  "b2": 268,  
  "b3": 431.1,  
  "b4": 247.5,  
  "b5": 187.4,  
  "b6": 105.1,  
  "b7": 187,  
  "b8": 208.5,  
  "b9": 337.2,  
  "b10": 259,  
  "b11": 133.4  
},  
{  
  "Пункт": "b1",  
  "a1": 91.1,  
  "a2": 291.1,  
  "a3": 276.3,  
  "b1": "-",  
  "b2": 204.2,  
  "b3": 367.7,  
  "b4": 309.1,  
  "b5": 459.4,  
  "b6": 389.2,  
  "b7": 201.3,  
  "b8": 326.8,  
  "b9": 563.1,  
  "b10": 367.9,
```



```
"b11": 247.8
},
{
  "Пункт": "b2",
  "a1": 157,
  "a2": 377,
  "a3": 268,
  "b1": 204.2,
  "b2": "-",
  "b3": 174.6,
  "b4": 119.4,
  "b5": 501.2,
  "b6": 419.5,
  "b7": 301.4,
  "b8": 404.3,
  "b9": 421.2,
  "b10": 249,
  "b11": 194.2
},
{
  "Пункт": "b3",
  "a1": 319.8,
  "a2": 541,
  "a3": 431.1,
  "b1": 367.7,
  "b2": 174.6,
  "b3": "-",
  "b4": 183,
  "b5": 623.2,
  "b6": 559,
  "b7": 502.4,
  "b8": 602.3,
  "b9": 491.2,
  "b10": 319.3,
  "b11": 315
```

```
},  
{  
  "Пункт": "б4",  
  "a1": 245.3,  
  "a2": 381.8,  
  "a3": 247.5,  
  "b1": 309.1,  
  "b2": 119.4,  
  "b3": 183,  
  "b4": "-",  
  "b5": 432,  
  "b6": 498.1,  
  "b7": 386.5,  
  "b8": 419.2,  
  "b9": 311.6,  
  "b10": 145.2,  
  "b11": 135.8  
},  
{  
  "Пункт": "б5",  
  "a1": 378,  
  "a2": 191.7,  
  "a3": 187.4,  
  "b1": 459.4,  
  "b2": 501.2,  
  "b3": 623.2,  
  "b4": 432,  
  "b5": "-",  
  "b6": 78.9,  
  "b7": 318.6,  
  "b8": 231.2,  
  "b9": 333,  
  "b10": 321.4,  
  "b11": 290  
},
```

```
{  
  "Пункт": "б6",  
  "a1": 300.7,  
  "a2": 115.4,  
  "a3": 105.1,  
  "b1": 389.2,  
  "b2": 419.5,  
  "b3": 559,  
  "b4": 498.1,  
  "b5": 78.9,  
  "b6": "-",  
  "b7": 244,  
  "b8": 172.1,  
  "b9": 378.1,  
  "b10": 314.9,  
  "b11": 212
```

```
},
```

```
{  
  "Пункт": "б7",  
  "a1": 135.6,  
  "a2": 141.2,  
  "a3": 187,  
  "b1": 201.3,  
  "b2": 301.4,  
  "b3": 502.4,  
  "b4": 386.5,  
  "b5": 318.6,  
  "b6": 244,  
  "b7": "-",  
  "b8": 167.3,  
  "b9": 522,  
  "b10": 454.3,  
  "b11": 289.1
```

```
},
```

```
{
```

"Пункт": "b8",
"a1": 248.9,
"a2": 41,
"a3": 208.5,
"b1": 326.8,
"b2": 404.3,
"b3": 602.3,
"b4": 419.2,
"b5": 231.2,
"b6": 172.1,
"b7": 167.3,
"b8": "-",
"b9": 541.2,
"b10": 483.8,
"b11": 305.4

},

{

"Пункт": "b9",
"a1": 475,
"a2": 480.4,
"a3": 337.2,
"b1": 563.1,
"b2": 421.2,
"b3": 491.2,
"b4": 311.6,
"b5": 333,
"b6": 378.1,
"b7": 522,
"b8": 541.2,
"b9": "-",
"b10": 196,
"b11": 317.3

},

{

"Пункт": "b10",

```
"a1": 323,  
"a2": 398.1,  
"a3": 259,  
"b1": 367.9,  
"b2": 249,  
"b3": 319.3,  
"b4": 145.2,  
"b5": 321.4,  
"b6": 314.9,  
"b7": 454.3,  
"b8": 483.8,  
"b9": 196,  
"b10": "-",  
"b11": 148.6  
},  
{  
  "Пункт": "b11",  
  "a1": 184.2,  
  "a2": 249.9,  
  "a3": 133.4,  
  "b1": 247.8,  
  "b2": 194.2,  
  "b3": 315,  
  "b4": 135.8,  
  "b5": 290,  
  "b6": 212,  
  "b7": 289.1,  
  "b8": 305.4,  
  "b9": 317.3,  
  "b10": 148.6,  
  "b11": "-"  
}  
]  
}
```

Додаток Д. Файл main.py із основною програмою

```
import json

import itertools

import numpy as np

# Завантаження даних з файлу JSON

with open('Distances.json', 'r', encoding='utf-8') as file:

    data = json.load(file)

# Витягнення відстаней

distances = data['Відстані']

# Перетворення даних у зручніший формат

points = [point['Пункт'] for point in distances]

distance_matrix = {point['Пункт']: {k: v for k, v in point.items() if k != 'Пункт'} for point in distances}

# Перетворення значень у числові та заміна "-" на нескінченність

for start_point in distance_matrix:

    for end_point in distance_matrix[start_point]:

        if distance_matrix[start_point][end_point] == '-':

            distance_matrix[start_point][end_point] = float('inf')

        else:

            distance_matrix[start_point][end_point] = float(distance_matrix[start_point][end_point])

# Надати користувачу вибір складу

warehouses = ['a1', 'a2', 'a3']

print("Виберіть склад з наступних: a1, a2, a3")

selected_warehouse = input("Введіть вибраний склад: ")
```

```

# Перевірка коректності вводу складу

while selected_warehouse not in warehouses:

    print("Некоректний вибір. Будь ласка, виберіть склад з наступних: a1, a2, a3")

    selected_warehouse = input("Введіть вибраний склад: ")

# Надати користувачу вибір пунктів для відвідування

filtered_points = [point for point in points if point not in warehouses]

print("Доступні пункти: ", filtered_points)

selected_points = input("Введіть пункти для відвідування через кому (наприклад, b1,b2,b3): ").split(',')

# Перевірка коректності вводу пунктів

selected_points = [point.strip() for point in selected_points if point.strip() in points]

while not selected_points:

    print("Некоректний вибір. Будь ласка, введіть пункти для відвідування з доступних пунктів.")

    selected_points = input("Введіть пункти для відвідування через кому (наприклад, b1,b2,b3): ").split(',')

    selected_points = [point.strip() for point in selected_points if point.strip() in points]

print(f"Вибраний склад: {selected_warehouse}")

print(f"Вибрані пункти для відвідування: {selected_points}")

def tsp_branch_and_bound(start, points, distance_matrix):

    n = len(points)

    all_points = [start] + points

    # Функція для обчислення довжини шляху

    def path_length(path):

        return sum(distance_matrix[path[i]][path[i+1]] for i in range(len(path) - 1))

    # Генерація всіх можливих перестановок пунктів

    permutations = itertools.permutations(points)

```

```

min_path = None

min_cost = float('inf')

for perm in permutations:

    path = [start] + list(perm) + [start]

    cost = path_length(path)

    if cost < min_cost:

        min_cost = cost

        min_path = path

return min_path, min_cost

# Запуск алгоритму

optimal_path, optimal_cost = tsp_branch_and_bound(selected_warehouse, selected_points, distance_matrix)

# Обчислення пройденої відстані в кілометрах

traveled_distance = optimal_cost

print("Оптимальний шлях:", ' -> '.join(optimal_path))

print(f"Пройдена відстань: {traveled_distance:.2f} км")

```


Додаток Е. Файл new_point.py із додатком до основної програмою

```
import json

# Завантаження даних з файлу JSON
def load_data(file_path):
    with open(file_path, 'r', encoding='utf-8') as file:
        return json.load(file)

# Збереження даних у файл JSON
def save_data(file_path, data):
    with open(file_path, 'w', encoding='utf-8') as file:
        json.dump(data, file, ensure_ascii=False, indent=4)

# Додавання нового пункту
def add_new_point(data, new_point, distances):
    # Додавання нового пункту до існуючих пунктів
    new_entry = {'Пункт': new_point}
    for point, distance in distances.items():
        new_entry[point] = distance
    # Оновлення відстаней для існуючих пунктів
    for entry in data['Відстані']:
        if entry['Пункт'] == point:
            entry[new_point] = distance
    data['Відстані'].append(new_entry)

# Основна функція для додавання нових пунктів
def main():
    file_path = 'Distances.json'
    data = load_data(file_path)
```

```
# Введення нового пункту
new_point = input("Введіть назву нового пункту: ")

# Введення відстаней до інших пунктів
distances = {}

for entry in data['Відстані']:
    point = entry['Пункт']
    distance = input(f"Введіть відстань від {new_point} до {point} (в км або '-' якщо немає шляху): ")
    distances[point] = distance

# Додавання нового пункту до даних
add_new_point(data, new_point, distances)

# Збереження оновлених даних до файлу
save_data(file_path, data)

print(f"Новий пункт '{new_point}' успішно доданий з відстанями.")

if __name__ == "__main__":
    main()
```