

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет механіко-технологічний**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
транспортних технологій та засобів
у АПК

(назва кафедри)

_____ **Савченко Л. А.**
(підпис) (ПІБ)

« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему «Управління транспортними системами з використанням спеціалізованих оптимізаційних методів».

Спеціальність 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»
(код і назва)

Гарант магістерської програми

д. е. н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

_____ **Загурський О.М.**
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д. е. н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

_____ **Загурський О.М.**
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

_____ **Радіола Дмитро Сергійович**
(ПІБ студента)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет механіко-технологічний

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

транспортних технологій та засобів у АПК

Савченко Л. А.

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської роботи студенту

Радіолі Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)
(код і назва)

Тема випускної роботи “ Управління транспортними системами з використанням спеціалізованих оптимізаційних методів ”

затверджена наказом ректора НУБіП України від _____ №2037 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до випускної роботи:

1. Дані про підприємство та його транспортний парк (кількість транспортних засобів, вантажопідйомність, маршрути перевезень).
2. Таблиці точок доставки (координати, попит, ID, назва).
3. Інформаційні технології та програмне забезпечення для оптимізації маршрутів (Python, OR-Tools, Folium, Streamlit).

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Аналіз сучасних методів управління транспортними системами та планування маршрутів.
2. Розробка архітектури інтелектуальної транспортної системи (ITMS).
3. Впровадження алгоритмів оптимізації маршрутів з обмеженням по вантажопідйомності та іншими параметрами.
4. Інтеграція графічної візуалізації маршрутів, аналітики та формування звітів.
5. Проведення експериментальної перевірки ефективності прототипу та аналіз отриманих результатів.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2025 р.

Керівник випускної магістерської роботи

(підпис)

Загурський О.М.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Радіола Д.С.

(прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: «Управління транспортними системами з використанням спеціалізованих оптимізаційних методів» викладена на 91 сторінці комп'ютерного тексту й містить 21 рисуноків та 11 таблиць. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та 9 додатків. Для написання магістерської роботи було використано 63 літературних джерел.

Метою даної роботи є розробка інтелектуальної системи управління транспортними процесами на підприємстві з використанням сучасних методів оптимізації та програмних інструментів, яка дозволяє автоматизувати процес планування маршрутів та розподілу автотранспорту. Практична реалізація цієї системи забезпечує зниження витрат, підвищення точності планування та скорочення часу виконання транспортних операцій.

Об'єктом дослідження є процеси управління транспортними системами підприємства та методи їх оптимізації з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Предметом дослідження є розробка та експериментальна перевірка інтелектуальної системи управління транспортом на базі спеціалізованих оптимізаційних алгоритмів та сучасних веб-технологій.

Для досягнення мети в магістерській роботі поставлено та виконано наступні завдання:

1. проведено комплексний аналіз теоретичних основ управління транспортними системами;
2. досліджено та систематизовано методи оптимізації для транспортних задач, зокрема VRP та її варіантів;
3. розроблено комплексну математичну модель для задачі CVRPTW-PD з диференційованою вартістю залучення авто;
4. спроектовано та реалізовано прототип інтелектуальної системи "TMS Pro" з трирівневою архітектурою;
5. реалізовано модуль взаємодії з Google Maps API;

6. імплементовано оптимізаційне ядро на базі OR-Tools, систему управління БД SQLite та багатосторінковий веб-інтерфейс на Streamlit;
7. інтегровано систему візуалізації маршрутів на карті Folium та функцію експорту звітів в Excel;
8. проведено експериментальну перевірку ефективності системи "TMS Pro" шляхом порівняння трьох сценаріїв;
9. сформульовано висновки щодо практичної доцільності системи та проаналізовано аспекти охорони праці.

У результаті розроблено повнофункціональний прототип системи "TMS Pro", експериментально доведено її ефективність (скорочення пробігу на 14.2%, витрат палива на 17.9% порівняно з базовим методом) та практичну доцільність для транспортних підприємств.

Ключові слова: транспортна система, управління транспортом, оптимізація маршрутів, задача VRP, CVRPTW-PD, Google OR-Tools, Google Maps API, Streamlit, Python, інтелектуальна система, логістика, ефективність перевезень, охорона праці.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1.	12
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ СИСТЕМАМИ	12
1.1. Поняття та склад транспортних систем.....	12
1.2. Основні показники ефективності транспортних систем.....	15
1.3. Сучасні підходи до управління та оптимізації транспортних процесів.....	18
1.4. Проблеми планування маршрутів та розподілу автопарку.....	21
Висновки до першого розділу	25
РОЗДІЛ 2.	27
МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ	27
2.1. Класифікація оптимізаційних методів	27
2.2. Алгоритми для задач маршрутизації та методи оптимізації маршрутів транспортних засобів (VRP).....	29
2.3. Методи врахування обмежень вантажопідйомності та часу	33
2.4. Використання спеціалізованих бібліотек та програмних інструментів (OR-Tools, Python)	35
Висновки до другого розділу	39
РОЗДІЛ 3.	41
РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТОМ	41
3.1. Постановка задачі та моделювання транспортної системи	41
3.2. Архітектура програмного додатку та вибір технологій	44
3.3. Реалізація алгоритмів оптимізації маршрутів.....	49
3.4. Візуалізація маршрутів та інтерфейс користувача.....	55

Висновки до третього розділу	60
РОЗДІЛ 4.	63
АПРОБАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	63
4.1. Вхідні дані та сценарії тестування	63
4.2. Розрахунок оптимальних маршрутів та оцінка ефективності	66
4.3. Порівняння результатів із базовими методами	68
4.4. Висновки щодо практичної доцільності системи	71
Висновки до четвертого розділу	73
РОЗДІЛ 5.	76
ОХОРОНА ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	76
5.1. Аналіз умов праці та вимог безпеки при управлінні транспортними системами.....	76
5.2. Ергономіка робочого місця та безпека при роботі з інтелектуальними системами та системою "TMS Pro"	79
Висновки до п'ятого розділу	81
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	86
ДОДАТКИ	92
Додаток А	93
Додаток Б.....	94
Додаток В	95
Додаток Г.....	96
Додаток Д.....	97
Додаток К	98
Додаток Л	99
Додаток М	100
Додаток Н.....	101

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку економіки та логістики ефективне управління транспортними системами є одним із ключових чинників конкурентоспроможності підприємств. Зростання обсягів перевезень, урбанізація, а також підвищені вимоги до швидкості та якості доставки створюють необхідність впровадження сучасних методів планування маршрутів та управління автопарком. Неоптимізоване використання транспортних ресурсів призводить до збільшення витрат на паливо, обслуговування транспортних засобів та часу доставки, що негативно впливає на загальну ефективність підприємства.

В умовах цифровізації та розвитку інформаційних технологій з'явилася можливість автоматизувати процеси управління транспортними системами, використовуючи спеціалізовані алгоритми оптимізації, які дозволяють приймати обґрунтовані рішення на основі математичних моделей. Однією з найбільш актуальних задач у транспортній логістиці є задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP), яка передбачає оптимальний розподіл маршрутів між транспортними засобами з урахуванням обмежень вантажопідйомності, часу та інших ресурсів.

Актуальність теми обумовлена сучасними викликами транспортної галузі, зокрема зростанням обсягів перевезень, урбанізацією, підвищеними вимогами до швидкості та якості доставки, а також зростанням витрат на паливо та обслуговування автотранспорту. Неоптимізоване управління маршрутами та автопарком призводить до низької ефективності підприємств та збільшення експлуатаційних витрат. Використання спеціалізованих оптимізаційних методів і цифрових інструментів дозволяє підвищити ефективність транспортних систем, скоротити час доставки, оптимізувати використання ресурсів та підвищити рівень обслуговування клієнтів.

Ступінь дослідження проблеми. Вагомий внесок у дослідження проблем управління транспортними системами та оптимізації логістичних

процесів зробили як зарубіжні, так і вітчизняні науковці. Теоретичні основи задачі маршрутизації (VRP) були закладені у працях Дж. Данціга та Дж. Рамзера. Подальший розвиток методів оптимізації, зокрема евристичних та метаевристичних алгоритмів, досліджували провідні вчені, такі як Ж.-Ф. Кордо, М. Жендро, Г. Лапорт, П. Тот та Д. Віго.

Серед українських науковців, що займалися питаннями транспортних технологій та логістики, слід відзначити праці М. Ф. Дмитриченка, О. М. Загурського, О. М. Ларіна, Є. В. Нагорного та інших. Незважаючи на значну кількість напрацювань, питання практичної інтеграції сучасних програмних інструментів, таких як Google OR-Tools, у гнучкі веб-орієнтовані системи підтримки рішень для динамічного управління автопарком залишається актуальним і потребує подальших досліджень.

Об'єктом дослідження є процеси управління транспортними системами підприємства та методи їх оптимізації з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Предмет дослідження – удосконалення управління транспортними процесами методом розробки та впровадження інтелектуальних систем.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи* є розробка інтелектуальної системи управління транспортними процесами на підприємстві з використанням сучасних методів оптимізації та програмних інструментів, яка дозволяє автоматизувати процес планування маршрутів та розподілу автотранспорту. Практична реалізація цієї системи забезпечує зниження витрат, підвищення точності планування та скорочення часу виконання транспортних операцій.

Для досягнення мети роботи поставлено такі *завдання*:

1. Провести комплексний аналіз теоретичних основ управління транспортними системами: Розглянути їх структуру, показники ефективності, сучасні підходи до управління та ключові проблеми планування логістичних операцій.

2. Дослідити та систематизувати методи оптимізації для транспортних задач: Класифікувати підходи, детально проаналізувати алгоритми розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP) та її ускладнених варіантів (CVRP, VRPTW, CVRPTW-PD), а також оцінити можливості сучасних програмних інструментів, зокрема бібліотеки Google OR-Tools.

3. Розробити комплексну математичну модель для задачі маршрутизації транспортних засобів з урахуванням вантажопідйомності, часових вікон, операцій забору/доставки та економічних факторів (диференційованої вартості залучення автотранспорту).

4. Спроекувати та реалізувати прототип інтелектуальної системи "TMS Pro": Визначити архітектуру системи (трирівневу) та обґрунтувати вибір технологічного стеку (Python, Streamlit, Google OR-Tools, Google Maps API, SQLite).

5. Реалізувати модуль взаємодії з Google Maps API для геокодування, розрахунку матриць відстаней/часу (з урахуванням трафіку) та побудови деталізованих маршрутів.

6. Імплементувати оптимізаційне ядро на базі OR-Tools для розв'язання розробленої математичної моделі. Створити систему управління базою даних SQLite для зберігання автопарку, історії рейсів та налаштувань. Розробити багатосторінковий інтерактивний веб-інтерфейс за допомогою Streamlit, що включає функціонал для динамічного введення даних, управління рейсами, моніторингу статусу автопарку та формування аналітичних звітів.

7. Інтегрувати систему візуалізації маршрутів на інтерактивній карті Folium з використанням шарів для підвищення наочності. Реалізувати функцію експорту результатів (історії рейсів, звітів по паливу) у формат Excel.

8. Провести експериментальну перевірку ефективності системи "TMS Pro". Розробити методіку тестування, включаючи формування реалістичного набору вхідних даних та визначення базового методу для

порівняння (імітація ручного планування з кластеризацією). Виконати розрахунки за оптимізованим (з різними економічними параметрами) та базовим сценаріями. Провести порівняльний аналіз отриманих результатів за ключовими показниками (загальний пробіг, витрати палива, кількість задіяних авто, дотримання часових вікон).

9. Сформулювати висновки щодо практичної доцільності та економічної ефективності розробленої системи. Проаналізувати вимоги та заходи з охорони праці в контексті діяльності транспортного підприємства та використання розробленої системи.

Методи дослідження. В магістерській роботі були використані наступні: теоретичні (аналіз, синтез, опис), для вивчення теоретичних основ, класифікації методів оптимізації (VRP, CVRPTW-PD) та аналізу можливостей існуючих програмних інструментів, що описано у Розділах 1 та 2; спостереження та аналіз документів, для збору первинних даних, вивчення існуючих бізнес-процесів, методів планування маршрутів та аналізу витрат на базі проходження виробничої практики в ТОВ «ІНГ-ТРАНС»; формалізація та математичне моделювання, при розробці комплексної математичної моделі задачі CVRPTW-PD з урахуванням обмежень вантажопідйомності, часових вікон та економічних факторів, що описано у Розділі 3; комп'ютерне моделювання та програмна реалізація, при проектуванні трирівневої архітектури та розробці програмного прототипу "TMS Pro" з використанням технологій Python, Google OR-Tools, Streamlit та Folium (Розділ 3); обчислювальний експеримент, для апробації розробленої системи, проведення розрахунків за трьома різними сценаріями (базовий, оптимізація за відстанню, економічна оптимізація), що описано у Розділі 4; порівняльний аналіз, для зіставлення ключових показників ефективності (пробіг, витрати палива, кількість авто) отриманих результатів із базовим методом (Розділ 4); узагальнення, для підсумовування результатів кваліфікаційної роботи та формулювання висновків щодо її відповідності меті та поставленим завданням.

Інформаційною базою дослідження. Інформаційною базою дослідження є наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених з теорії логістики, транспортних систем та комбінаторної оптимізації, монографії та підручники. Важливою практичною складовою стали технічна документація програмних бібліотек Google OR-Tools, Streamlit, Folium, а також документація сервісів Google Maps Platform (Geocoding, Distance Matrix API).

Практична значущість роботи полягає у створенні універсального інструменту для планування транспортних операцій, який може бути використаний підприємствами різного масштабу для оптимізації маршрутів, підвищення продуктивності автопарку та зменшення витрат на перевезення. Крім того, система має потенціал для подальшого розвитку, зокрема інтеграції з GPS-трекерами, ERP-системами та іншими інформаційними системами управління логістикою.

Таким чином, дана робота поєднує теоретичне дослідження методів управління транспортними системами, спеціалізованих оптимізаційних алгоритмів та практичну реалізацію програмного інструменту для підтримки прийняття рішень на підприємствах, що робить її актуальною та корисною для сучасного транспортного менеджменту.

Апробація результатів дослідження. Основні результати магістерської роботи були представлені на X Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології в логістиці та на транспорті» (м. Київ, НУБіП України, 2025 р.) у вигляді доповіді на тему: «Розробка інтелектуальної системи "TMS Pro" для оптимізації маршрутів на базі Google OR-Tools».

Структура магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи становить 101 сторінку. Робота містить 21 рисунок, 11 таблиць. Список використаної літератури налічує 63 джерела. Робота містить 9 додатків.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ СИСТЕМАМИ

1.1. Поняття та склад транспортних систем

Транспортна система є ключовим елементом інфраструктури будь-якої держави, оскільки забезпечує переміщення вантажів, пасажирів і ресурсів, створюючи основу для ефективного функціонування економіки. У найзагальнішому розумінні транспортна система - це організована сукупність технічних засобів, технологічних процесів, управлінських структур та інформаційного забезпечення, спрямованих на задоволення потреб суспільства у перевезеннях.

З погляду системного підходу транспортна система являє собою складну соціально-технічну систему, яка включає взаємодію матеріальних, інформаційних та фінансових потоків. Вона функціонує в умовах динамічного зовнішнього середовища, у якому вплив мають економічні, екологічні, соціальні та технологічні фактори. У сучасних умовах розвитку цифрової економіки транспортна система дедалі частіше розглядається як інтегрована частина логістичних ланцюгів, що об'єднує виробництво, зберігання, розподіл і доставку продукції.

Структура транспортної системи

Структурно транспортна система складається з таких основних елементів:

1. Транспортні засоби - основний технічний компонент, який безпосередньо виконує перевезення вантажів або пасажирів. Для автомобільного транспорту це вантажні автомобілі, тягачі, причепи тощо. Їх технічний стан, паливна економічність, вантажопідйомність і екологічність безпосередньо впливають на ефективність системи.

2. Транспортна інфраструктура - сукупність споруд і технічних елементів, що забезпечують процес перевезень: автомобільні дороги, склади,

логістичні термінали, станції технічного обслуговування, заправні комплекси. Рівень розвитку інфраструктури визначає пропускну здатність системи й стабільність транспортних потоків.

3. Організаційно-управлінська підсистема - включає органи управління, служби планування та диспетчеризації, які відповідають за планування маршрутів, координацію руху, розподіл транспортних засобів, облік витрат і контроль виконання перевезень. Саме ця складова є об'єктом автоматизації та оптимізації в межах сучасних інформаційних систем управління транспортом (Transportation Management Systems - TMS).

4. Інформаційно-комунікаційна підсистема - охоплює цифрові технології та програмні інструменти, які забезпечують моніторинг, аналіз і прийняття рішень у реальному часі. До неї належать GPS-технології, телематичні системи, бази даних про транспортні засоби, а також інтелектуальні транспортні системи (ITS), що використовують алгоритми оптимізації та штучний інтелект для підвищення ефективності транспортних процесів.

5. Кадрове забезпечення - персонал, який здійснює технічне обслуговування, управління автопарком, планування перевезень і безпосереднє виконання транспортних операцій. Високий рівень кваліфікації персоналу є важливою передумовою безпечного та ефективного функціонування системи.

6. Нормативно-правова база - сукупність законів, стандартів і технічних норм, що регламентують діяльність транспортної галузі, визначають вимоги до безпеки руху, охорони довкілля, умов праці водіїв та експлуатації транспортних засобів.

Класифікація транспортних систем

За своїм призначенням транспортні системи поділяють на пасажирські, вантажні та змішані. За рівнем організації виділяють міжнародні, національні, регіональні, міські та внутрішньовиробничі системи. Також класифікація може здійснюватися за видом транспорту (автомобільний, залізничний,

морський, повітряний, трубопровідний) або за ступенем автоматизації - від традиційних до інтелектуальних транспортних систем (ITS).

Інтелектуальні транспортні системи поєднують інформаційні технології, телематику, системи збору даних і аналітику для забезпечення більш ефективного управління перевезеннями, прогнозування транспортних потоків і зниження екологічного впливу. Вони відіграють ключову роль у розвитку сталих міських перевезень і цифровізації транспортної інфраструктури.

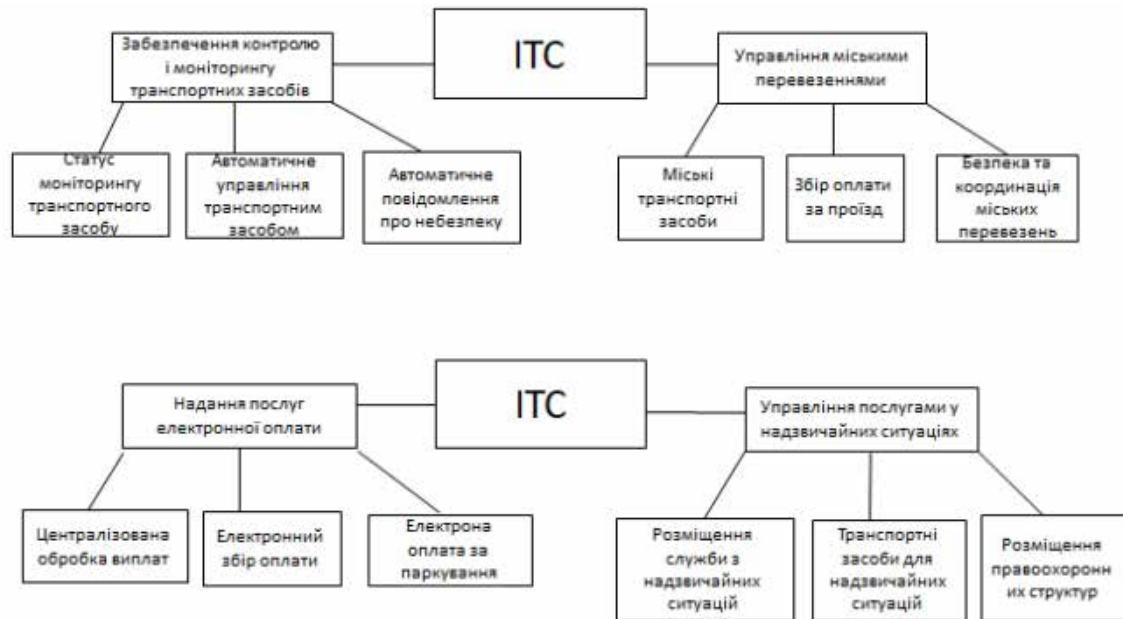


Рис. 1.1 – Функції ITS

Роль транспортної системи в економічному розвитку

Ефективна транспортна система створює передумови для економічного зростання, забезпечує доступність ресурсів, зменшує логістичні витрати та підвищує конкурентоспроможність підприємств. За оцінками досліджень, витрати на транспорт і логістику формують від 15 до 30 % кінцевої вартості товарів [39]. Відтак оптимізація транспортних процесів є не лише технічним, а й економічним завданням.

Сучасний розвиток транспортних систем спрямований на інтеграцію цифрових технологій, зокрема використання штучного інтелекту, алгоритмів машинного навчання, моделей прогнозування попиту та оптимізації маршрутів. Це дозволяє підприємствам зменшувати витрати, підвищувати

швидкість доставки, мінімізувати простої автопарку та поліпшувати якість обслуговування клієнтів.

Отже, транспортна система є складним комплексом взаємопов'язаних елементів, які забезпечують безперервність матеріальних і інформаційних потоків у суспільстві. Її ефективність визначається не лише технічними характеристиками, а й рівнем організації, управління та інтеграції інформаційних технологій. Саме ці аспекти стають базовими у подальшому дослідженні методів оптимізації транспортних процесів.

1.2. Основні показники ефективності транспортних систем

Ефективність транспортної системи визначає рівень її здатності забезпечувати своєчасне, економічне та безпечне переміщення вантажів і пасажирів. Вона є комплексною характеристикою, яка відображає ступінь використання технічних, фінансових та людських ресурсів для досягнення заданого результату. У сучасних умовах цифровізації логістики оцінка ефективності є основою для прийняття управлінських рішень, планування маршрутів та оптимізації транспортних процесів.

Ключові групи показників ефективності

Загалом показники ефективності транспортних систем поділяють на економічні, технічні, експлуатаційні, екологічні та організаційні. Кожна група має свої специфічні критерії оцінювання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Основні групи показників ефективності транспортних систем

Група показників	Приклади показників	Характеристика
Економічні	Собівартість перевезень, прибуток, рівень транспортних витрат (%)	Визначають економічну доцільність функціонування системи

Продовження таблиці 1.1

Технічні	Вантажопідйомність, витрата пального, середня швидкість, коефіцієнт використання пробігу	Відображають технічний стан транспортних засобів і ефективність їх експлуатації
Експлуатаційні	Коефіцієнт використання вантажопідйомності, продуктивність автомобіля, коефіцієнт технічної готовності	Характеризують рівень використання парку
Екологічні	Викиди CO ₂ , рівень шуму, енергоефективність	Визначають ступінь екологічного впливу транспортної системи
Організаційні	Пунктуальність, коефіцієнт виконання графіка, рівень автоматизації	Показують якість управління і координації перевезень

Основні економічні показники

Економічна ефективність транспортної системи визначається співвідношенням витрат і результатів діяльності. Базовим критерієм є рівень транспортних витрат у структурі логістичних витрат підприємства:

$$K_{ТВ} = \frac{V_{ТР}}{V_{ЗАГ}} * 100\% \quad (1.1)$$

де: $V_{ТР}$ - витрати на транспортні операції, грн; $V_{ЗАГ}$ - загальні логістичні витрати підприємства, грн.

За даними Європейської комісії, транспортні витрати в середньому становлять 20–25 % у структурі логістичних витрат [44]. Зниження цього показника на 3–5 % за рахунок оптимізації маршрутів дозволяє підвищити загальну ефективність логістичної системи на 10–12 % [58].

Іншим важливим індикатором є собівартість перевезень:

$$C = \frac{V_{ЗАГ}}{Q} \quad (1.2)$$

де: C - собівартість перевезень, грн/т·км; Q - обсяг виконаних транспортних робіт, т·км.

Оптимізація маршрутів і зменшення холостих пробігів може знизити собівартість перевезень на 8–15 %.

Експлуатаційні показники

Ефективність використання транспортного парку характеризується рядом коефіцієнтів:

1. Коефіцієнт використання вантажопідйомності:

$$K_{\text{ВВ}} = \frac{Q_{\text{Ф}}}{Q_{\text{Н}}} \quad (1.3)$$

де: $Q_{\text{Ф}}$ - фактична кількість перевезеного вантажу; $Q_{\text{Н}}$ - номінальна (максимальна) вантажопідйомність.

2. Коефіцієнт використання пробігу:

$$K_{\text{П}} = \frac{L_{\text{В}}}{L_{\text{ЗАГ}}} \quad (1.4)$$

де: $L_{\text{В}}$ - пробіг з вантажем; $L_{\text{ЗАГ}}$ - загальний пробіг.

За статистикою, середній коефіцієнт використання пробігу на підприємствах України становить близько 0,65, тоді як у розвинених транспортних системах - 0,85–0,9 [27]. Це свідчить про значний потенціал для підвищення ефективності шляхом застосування математичних методів оптимізації маршрутів.

Екологічні та організаційні показники

В умовах сталого розвитку важливого значення набувають екологічні показники - питомі викиди шкідливих речовин, рівень шуму, енергоефективність транспорту. Наприклад, впровадження систем моніторингу витрат пального й оптимізації маршрутів дозволяє скоротити викиди CO_2 на 5–10 % [55].

До організаційних показників належать пунктуальність, точність виконання графіків, відсоток простоїв транспорту, рівень автоматизації диспетчерських процесів тощо. У сучасних інтелектуальних транспортних системах ці параметри контролюються в реальному часі за допомогою TMS, GPS і телематичних платформ [50].

1.3. Сучасні підходи до управління та оптимізації транспортних процесів

Сучасна транспортна система функціонує в умовах зростаючої складності логістичних ланцюгів, динаміки попиту та високих вимог до якості обслуговування. Тому традиційні методи управління, засновані на статичних розрахунках і ручному плануванні, поступово поступаються місцем цифровим технологіям, аналітичним моделям і системам штучного інтелекту.

Основним напрямом розвитку транспортного менеджменту є інтелектуалізація транспортних процесів, яка базується на впровадженні автоматизованих систем управління (TMS - *Transportation Management Systems*), систем підтримки прийняття рішень (DSS - *Decision Support Systems*), а також інтеграції транспортної діяльності в корпоративні ERP-платформи.

1. Аналітичні та цифрові підходи

В умовах цифрової економіки управління транспортними процесами дедалі більше спирається на аналітику даних. Застосування технологій Big Data та IoT (Інтернет речей) дозволяє збирати інформацію з GPS-трекерів, датчиків пального, телематичних пристроїв і використовувати її для прогнозування завантаження, виявлення затримок, оцінки ефективності маршрутів.

Згідно з дослідженням *Grand View Research (2024)*, понад 70 % великих логістичних компаній ЄС використовують транспортні аналітичні платформи для моніторингу продуктивності автопарку. Такі системи автоматично аналізують витрати пального, простої, відхилення від графіка та пропонують коригування маршрутів у режимі реального часу.

2. Математичні та оптимізаційні методи

Ключовим напрямом підвищення ефективності транспортних процесів є застосування математичних методів оптимізації. До найбільш поширених належать:

- лінійне програмування - для розподілу ресурсів та вибору оптимальних маршрутів;
- методи цілочислової оптимізації - для вирішення задач типу *Vehicle Routing Problem (VRP)*;
- евристичні алгоритми (генетичні, мурашині, табу-пошук) - для складних, багатопараметричних задач;
- кластеризація - для групування пунктів доставки за географічною або логістичною близькістю;
- алгоритми машинного навчання - для прогнозування попиту та адаптивного планування.

Математична оптимізація забезпечує скорочення витрат часу на маршрути до 15 %, зниження витрат на паливо до 12 % і підвищення точності планування на 20–25 % [52].



Рис. 1.2 – Еволюція підходів до управління транспортними процесами

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика підходів до управління транспортними процесами

Підхід	Характеристика	Переваги	Недоліки
Традиційний (ручний)	Розрахунок маршрутів на основі досвіду диспетчера	Простота, не потребує складних систем	Неточність, суб'єктивність, низька швидкість
Автоматизований (TMS)	Використання програмних систем управління транспортом	Скорочення витрат часу, централізоване планування	Обмежена гнучкість без аналітики

Інтелектуальний (AI, Big Data, IoT)	Використання алгоритмів оптимізації, прогнозування та самооновлення	Висока точність, адаптивність, економічність	Висока вартість впровадження, потреба у даних
-------------------------------------	---	--	---

3. Інтегровані інформаційні системи управління

Управління транспортними процесами нині дедалі частіше інтегрується в єдину логістичну екосистему, що поєднує TMS, WMS (складські системи), CRM (системи управління клієнтами) та ERP-платформи підприємства.

Інтеграція забезпечує:

- автоматичний обмін даними між відділами логістики, складу та фінансів;
- прозорість у ланцюгах постачання;
- можливість формування аналітичних звітів у реальному часі;
- синхронізацію транспортних і виробничих процесів.

У межах концепції Industry 4.0 транспортні системи перетворюються на кіберфізичні системи (CPS), у яких фізичні об'єкти (транспорт, склади) взаємодіють із цифровими моделями через мережеві сервіси. Це дозволяє виявляти відхилення, прогнозувати простой та адаптувати маршрути автоматично.

4. Концепція сталого розвитку та “зеленого транспорту”

Паралельно з цифровізацією зростає роль екологічної ефективності транспортних систем. Європейська транспортна політика до 2030 р. передбачає скорочення викидів CO₂ від перевезень щонайменше на 30 % [45]. Оптимізація маршрутів, використання електротранспорту та енергоефективних двигунів є невід'ємною частиною сучасних стратегій управління транспортом.

1.4. Проблеми планування маршрутів та розподілу автопарку

Планування маршрутів і розподіл автопарку є центральними елементами управління транспортною системою. Вони визначають рівень ефективності використання ресурсів, своєчасність доставки, обсяг витрат на паливо та технічне обслуговування. Незважаючи на розвиток технологій, ці процеси залишаються складними через динамічний характер зовнішнього середовища, численні обмеження та неповноту інформації.

1. Сутність задачі планування маршрутів

Задача планування маршрутів транспортних засобів (Vehicle Routing Problem - VRP) полягає у виборі оптимальних шляхів для групи автомобілів, що мають відвідати множину пунктів доставки з урахуванням таких умов: обмеження вантажопідйомності та часу роботи водіїв, мінімізація загального пробігу або витрат, забезпечення повного обслуговування клієнтів.

Ця задача належить до класу NP-складних, тобто її точне рішення при великій кількості пунктів стає обчислювально неефективним. Тому в практиці транспортних компаній застосовуються евристичні або метаввристичні методи (генетичні алгоритми, мурашині алгоритми, алгоритм табу-пошуку тощо), що дозволяють знайти близьке до оптимального рішення за прийнятний час [46].

2. Основні проблеми планування маршрутів

Серед найбільш поширених проблем, що виникають у процесі планування транспортних маршрутів, виділяють такі:

Таблиця 1.3

Основні проблеми планування маршрутів

№	Проблема	Сутність	Наслідки
1	Нерівномірність попиту	Обсяги перевезень коливаються залежно від сезону, регіону чи типу продукції	Невикористання частини автопарку або його перевантаження
2	Нестача актуальних даних	Відсутність точних координат, часу розвантаження, обсягів попиту	Помилки у розрахунках, неефективне планування

Продовження таблиці 1.3

3	Обмеження вантажопідйомності	Недостатній облік технічних характеристик автомобілів	Порушення графіків або перевантаження
4	Холості пробіги	Часті повернення без вантажу	Зростання витрат на паливо до 25–30 %
5	Недосконала маршрутизація	Використання ручного планування або застарілих систем	Перевитрата часу, збільшення простоїв
6	Відсутність інтеграції	Незв'язаність між складськими, транспортними та обліковими системами	Втрата контролю над логістичним процесом

За оцінками дослідження *Grand View Research (2024)*, неефективна маршрутизація призводить у середньому до 10–15 % перевитрат пального та 8–12 % втрат часу доставки. Ці втрати накопичуються в масштабах підприємства та суттєво знижують рентабельність.

3. Проблеми розподілу автопарку

Розподіл автопарку передбачає визначення, які транспортні засоби будуть задіяні на конкретних маршрутах. Основними проблемами є: неоптимальне використання автопарку - частина машин простоює, інші перевантажені, неврахування технічного стану - використання зношених транспортних засобів без урахування ТО, відсутність динамічної диспетчеризації - неможливість перерозподілу ресурсів у разі затримок чи поломок.

Сучасні підходи до вирішення цих проблем базуються на інтелектуальних системах управління автопарком (Fleet Management Systems), які дозволяють у реальному часі відстежувати місцезнаходження, стан і завантаження транспортних засобів, а також автоматично перерозподіляти маршрути.

4. Цифрові інструменти вирішення проблем

Для усунення вищезазначених недоліків активно впроваджуються спеціалізовані програмні рішення.

Google OR-Tools - бібліотека оптимізації від Google, що містить готові модулі для VRP із часовими вікнами, вантажопідйомністю, багатьма складами;

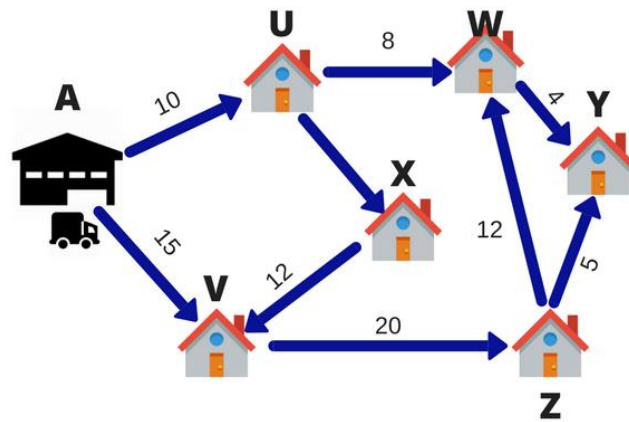


Рис. 1.3 – Оптимізація маршруту на основі мінімальної вартості

Python-бібліотеки (PuLP, NetworkX, Folium) - дозволяють будувати маршрути, аналізувати мережі та візуалізувати карти;

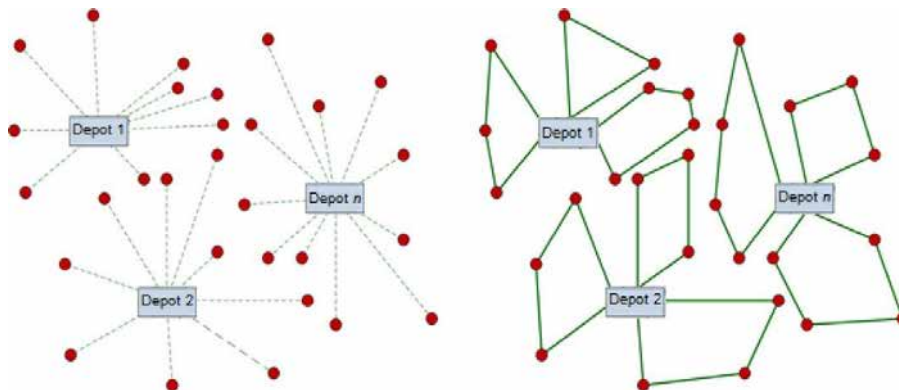


Рис. 1.4 – Проблема маршрутизації транспортних засобів - PuLP та реальні сценарії

TMS та ERP-системи (SAP, Oracle, Odoo) - забезпечують централізоване управління даними, інтеграцію з GPS-трекерами та облік витрат.

	odoo	SAP	ORACLE ERP
Cost & Licensing	Offer free Community edition an affordable Enterprise edition	Premium pricing with consumption-based curve	High-cost, with modules ranging \$80 to 175 user/per month
Usability & Interface	User-friendly modular design	Feature-rich but a steep learning curve	Balances functionality with usability
Flexibility & Customization	Highly customizable with over 10.000 app	Customizable but often requiring specializait	Customizable with significant investment
Functionality & Industry Fit	Comprehensive core features	Extensive functionality across Industries including finance. Mfc., HR	Complex implementation
Implementation & Support	Faster, easier implementation	Lengthy costly implementation	Complex implementaton

Рис. 1.5 – Odoo, SAP та Oracle ERP

Використання таких інструментів дозволяє підприємствам:

- знизити пробіг транспорту на 10–20 % [41];
- зменшити витрати на паливо до 15 % [41];
- скоротити час планування маршрутів у 5–10 разів.

5. Інтелектуальний підхід до планування

Інтелектуальні транспортні системи (ITS) застосовують методи штучного інтелекту для прогнозування заторів, визначення найкращого часу виїзду, динамічного оновлення маршрутів. Вони поєднують дані з GPS, сенсорів транспорту, погодних умов і замовлень у режимі реального часу. Такий підхід створює основу для самонавчальних систем управління логістикою, здатних адаптувати маршрути під зміну середовища.

Висновки до першого розділу

Ми встановили, що транспортна система є складною багаторівневою соціально-технічною структурою, до складу якої входять технічні засоби, транспортна інфраструктура, організаційно-управлінські, інформаційно-комунікаційні та кадрові підсистеми. Її ефективне функціонування залежить від узгодженої роботи всіх елементів і належного рівня автоматизації управління.

Проаналізували основні показники ефективності транспортних систем, серед яких економічні (собівартість перевезень, частка транспортних витрат), технічні (коефіцієнти використання пробігу й вантажопідйомності), експлуатаційні, екологічні та організаційні. Визначено, що системна оцінка ефективності має базуватися на інтегрованому підході, який поєднує кількісні показники продуктивності з якісними характеристиками надійності, безпеки та екологічності.

У процесі дослідження сучасних тенденцій встановлено, що управління транспортними процесами переходить на новий рівень завдяки інтелектуалізації та цифровізації. Використання транспортних управлінських систем (TMS), технологій Big Data, IoT і штучного інтелекту забезпечує автоматизацію планування, моніторинг автопарку в реальному часі та підвищення точності прогнозування попиту.

Разом з тим виявлено низку проблем, що залишаються актуальними для підприємств транспортної галузі: неефективна маршрутизація, холості пробіги, нерівномірність попиту, недостатня інтеграція між транспортними та складськими системами. Вирішення цих проблем можливе шляхом застосування спеціалізованих алгоритмів оптимізації - зокрема, моделей типу *Vehicle Routing Problem (VRP)*, а також впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Таким чином, результати теоретичного аналізу доводять, що підвищення ефективності транспортних систем безпосередньо пов'язане з переходом до цифрових і оптимізаційних методів управління, які

забезпечують адаптивність, зниження витрат і підвищення продуктивності перевезень. Отримані висновки створюють наукову основу для подальшого дослідження методів оптимізації транспортних систем, що є предметом розділу 2 магістерської роботи.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

2.1. Класифікація оптимізаційних методів

Процеси управління транспортними системами пов'язані з необхідністю прийняття рішень у складних умовах, де потрібно враховувати велику кількість змінних, обмежень і цілей. Тому оптимізація є ключовим інструментом підвищення ефективності транспортних процесів. Оптимізаційні методи - це сукупність математичних, аналітичних і алгоритмічних підходів, спрямованих на знаходження найкращого рішення серед множини допустимих варіантів відповідно до певного критерію, наприклад мінімізації витрат або часу перевезення.

1. Основні принципи оптимізації

Залежно від характеру задачі, оптимізаційні методи поділяють за такими критеріями:

- за видом цільової функції (лінійна, нелінійна, багатокритеріальна);
- за наявністю обмежень (умовні, безумовні);
- за способом пошуку рішення (детерміновані, стохастичні, евристичні);
- за способом реалізації (аналітичні, чисельні, симуляційні, гібридні).

Для транспортних систем найчастіше застосовують чисельні методи, які дозволяють обчислювати оптимальні маршрути, розподіляти ресурси, балансувати навантаження автопарку та враховувати часові вікна доставок.

2. Класифікація оптимізаційних методів

Загальна класифікація оптимізаційних методів для транспортних систем наведена в таблиці 2.1.

Класифікація оптимізаційних методів у транспортних системах

Клас методів	Основна ідея	Приклади	Переваги	Недоліки
Аналітичні (детерміновані)	Використання точних математичних моделей для знаходження оптимуму	Лінійне програмування, симплекс-метод, метод множників Лагранжа	Висока точність, теоретична обґрунтованість	Складність застосування для великих систем
Чисельні	Ітераційне наближення до оптимального рішення	Метод градієнтного спуску, Ньютона, Гауса–Зейделя	Простота реалізації, універсальність	Залежність від початкових умов
Евристичні	Використання правил і логіки наближеного пошуку	Найближчий сусід, вставки, локальний пошук	Швидкість, придатність до великих задач	Відсутність гарантії оптимуму
Метаевристичні	Стохастичний пошук на основі природних процесів	Генетичний алгоритм, мурашиний, табу-пошук, рой частинок	Висока ефективність для складних задач	Висока обчислювальна складність
Гібридні (інтелектуальні)	Комбінація кількох методів, використання ML/AI	Genetic + Local Search, нейронні мережі, reinforcement learning	Самонавчання, адаптивність	Складність налаштування, потреба у великих даних

Як показують дослідження, застосування метаевристичних методів дозволяє скоротити час розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP) на 20–30 % у порівнянні з класичними аналітичними методами, зберігаючи при цьому прийнятну точність результатів.

3. Використання оптимізаційних методів у транспортній логістиці

У транспортних системах найчастіше оптимізують такі параметри:

- мінімізація довжини маршруту (задача комівояжера, VRP);
- мінімізація часу перевезення (модель shortest path problem);
- оптимізація використання автопарку (fleet assignment);
- збалансування завантаження складів (multi-depot VRP);
- оптимізація транспортних потоків у містах (traffic flow optimization).

Для кожного типу задачі обирається відповідний метод: лінійне програмування - для розподілу ресурсів (модель транспортної задачі), генетичні алгоритми - для пошуку маршруту з численними обмеженнями, мурашиний алгоритм - для адаптивного формування маршрутів у реальному часі, кластеризаційні методи (k-means) - для групування пунктів доставки.

4. Тенденції розвитку оптимізаційних методів

Сучасні тенденції полягають у переході від ізольованих оптимізаційних моделей до інтелектуальних систем, що поєднують оптимізацію, прогнозування попиту та симуляційне моделювання. У 2024–2025 рр. зростає використання гібридних алгоритмів, які комбінують класичні методи оптимізації з машинним навчанням і методами глибоких нейронних мереж.

Такі підходи не лише підвищують точність планування, а й забезпечують адаптивність транспортних систем до непередбачуваних факторів - змін трафіку, поломок транспорту, погодних умов тощо.

2.2. Алгоритми для задач маршрутизації та методи оптимізації маршрутів транспортних засобів (VRP)

Оптимізація маршрутів транспортних засобів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності транспортних систем. Вона полягає у виборі такого набору маршрутів для автопарку, який забезпечує мінімальні витрати часу, палива та експлуатаційних ресурсів при повному обслуговуванні клієнтів.

У транспортній логістиці ця задача формулюється як Vehicle Routing Problem (VRP) - одна з базових задач комбінаторної оптимізації, що має численні модифікації: з часовими вікнами (VRPTW), з декількома складами (MDVRP), з обмеженнями вантажопідйомності (CVRP) тощо.

1. Класичні методи оптимізації маршрутів

Початкові підходи до розв'язання VRP ґрунтувалися на детермінованих методах, серед яких: транспортна задача лінійного програмування, метод найменших витрат, алгоритм Дейкстри - для знаходження найкоротших шляхів

у мережі, метод Беллмана–Форда - для обчислення найкоротших маршрутів з урахуванням негативних ваг.

Ці методи забезпечують оптимальні рішення при невеликій кількості вузлів (до 50), проте їхня ефективність різко знижується зі збільшенням розмірності задачі через експоненційне зростання обчислювальної складності.

2. Евристичні методи

Для великих транспортних мереж застосовують евристичні підходи, що дозволяють отримати близькі до оптимальних рішення за менший час.

Найпоширенішими є:

- метод найближчого сусіда - побудова маршруту, при якому транспорт рухається до найближчої непокритої точки;
- метод вставок - поступове включення клієнтів у вже сформований маршрут;
- метод 2-opt, 3-opt - локальна оптимізація шляхом перестановки ділянок маршруту;
- кластеризація K-means - групування пунктів доставки навколо складів або регіонів.

Такі методи прості у реалізації й придатні для реальних логістичних сценаріїв, однак не гарантують глобального оптимуму.

3. Метаевристичні методи

Метаевристики - це розширення евристичних методів, що використовують стохастичний пошук і природні аналоги процесів еволюції чи поведінки живих організмів.



Рис. 2.1 – Еволюція методів оптимізації маршрутів

Таблиця 2.2

Найефективніші методи оптимізації маршрутів

Метод	Принцип роботи	Сфера застосування
Генетичний алгоритм (GA)	Еволюційна модель пошуку: створення, схрещення та мутація рішень	Оптимізація складних VRP з багатьма обмеженнями
Мурашиний алгоритм (ACO)	Використання поведінки колонії мурах, які залишають феромони на найкращих шляхах	Динамічна маршрутизація в міських мережах
Алгоритм рою частинок (PSO)	Кооперація “частинок”, що рухаються до оптимального рішення	Прогнозування і планування маршрутів у реальному часі
Табу-пошук	Уникнення повторення неефективних рішень шляхом збереження історії	Підбір комбінацій маршрутів для великих автопарків

Дослідження показують, що застосування генетичних і мурашиних алгоритмів у задачах VRP дозволяє знизити загальний пробіг транспорту на 12–18 %, а витрати пального - на 10–15 % [57].

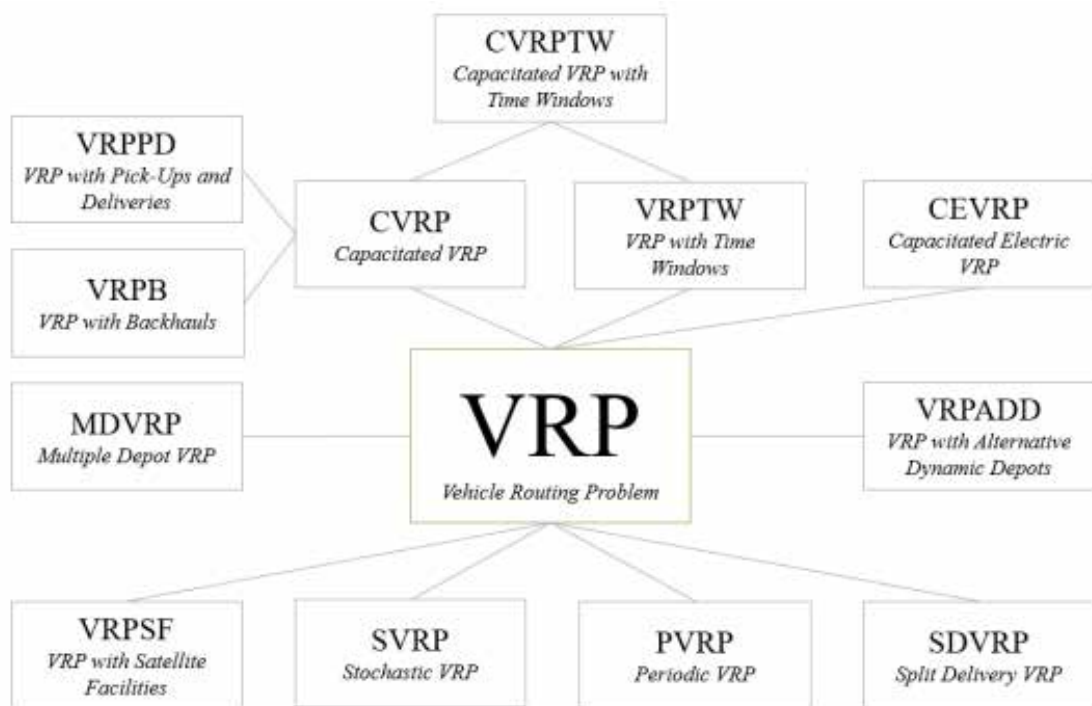


Рис. 2.2 – Ієрархія основних класів ЗМТЗ (задачі маршрутизації транспортних засобів)

4. Гібридні методи та машинне навчання

Сучасним трендом у транспортній логістиці є використання гібридних методів, що поєднують класичні алгоритми оптимізації з технологіями машинного навчання (*Machine Learning*).

Наприклад:

- GA + Local Search - комбінування генетичного пошуку з локальною оптимізацією;
- ACO + Neural Network - навчання моделі для передбачення найкращих шляхів за історичними даними;
- Deep Reinforcement Learning (DRL) - побудова маршрутів у реальному часі з адаптацією до трафіку та змін у попиті.

Такі підходи вже використовуються в корпоративних TMS-рішеннях (*SAP Transportation Management, Oracle Logistics Cloud*), забезпечуючи автоматичне перепланування маршрутів і динамічний розподіл ресурсів.

Реальні приклади впровадження алгоритмів оптимізації:

- Carlsberg Ukraine використовує TMS з модулем оптимізації маршрутів на основі OR-Tools (Google), що дозволяє скоротити середній пробіг на 14 %;
- Rozetka Logistics застосовує моделі кластеризації для автоматичного формування зон доставки;
- Nova Poshta інтегрує алгоритми машинного навчання для прогнозування часу прибуття відправлень (*ETA prediction*).

2.3. Методи врахування обмежень вантажопідйомності та часу

У задачах оптимізації маршрутів транспортних засобів важливу роль відіграє врахування реальних обмежень експлуатації, таких як вантажопідйомність автомобілів, час виконання доставки, допустима тривалість робочої зміни водіїв тощо. Без цих обмежень отримане рішення може бути математично коректним, але практично нездійсненним. Саме тому в транспортній логістиці застосовують модифіковані моделі класичної задачі *Vehicle Routing Problem (VRP)* - зокрема *Capacitated VRP (CVRP)* і *VRP with Time Windows (VRPTW)*.

1. Врахування обмежень вантажопідйомності (CVRP)

У варіанті CVRP кожен транспортний засіб має обмеження за максимальною масою або об'ємом вантажу, який він може перевезти. Математична модель має вигляд:

Мінімізувати:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

за умов:

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

де: c_{ij} - відстань або вартість між пунктами i та j ; d_i - обсяг вантажу, що потребує перевезення з пункту i ; Q_k - вантажопідйомність k -го транспортного засобу; x_{ij} - змінна, що дорівнює 1, якщо маршрут пролягає від i до j , і 0 - інакше.

Таким чином, жоден автомобіль не може перевищити допустиму масу вантажу.

Це особливо важливо у випадках: доставки напоїв, продуктів, будівельних матеріалів, розподілу товарів із різною щільністю або упакуванням, використання змішаного автопарку з різними типами кузовів.

2. Врахування часових обмежень (VRPTW)

Модель VRP з часовими вікнами (Time Windows) описує ситуації, коли кожен клієнт може бути обслуговуваний лише у певний проміжок часу $[a_i, b_i]$. Формально це виражається як:

$$a_i \leq t_i \leq b_i \quad (2.3)$$

де t_i - момент прибуття транспортного засобу до пункту i . Якщо автомобіль прибуває раніше, він очікує відкриття часової "вікна"; якщо запізнюється - доставка вважається простроченою.

Такі обмеження є типовими для:

- роздрібною торгівлі (часові інтервали доставки в супермаркети);
- кур'єрських служб ("доставка до 12:00");
- транспортних терміналів, що працюють у фіксованому режимі.

3. Комбінована модель (CVRPTW)

У реальних умовах одночасно діють і вантажні, і часові обмеження, тому практичною є комбінована модель CVRPTW. Вона враховує, що транспорт повинен: не перевищувати свою вантажопідйомність Q_k , виконати всі доставки у відповідні часові інтервали, мінімізувати сумарний пробіг або витрати.

У таких моделях використовуються мультиоб'єктні критерії, наприклад:

$$\text{Мінізувати: } Z = \alpha L + \beta T \quad (2.4)$$

де: L - загальна довжина маршруту, T - сумарний час запізнь, α, β - вагові коефіцієнти.

Для розв'язання задач CVRP і VRPTW найчастіше застосовують:

Алгоритмічні підходи до врахування обмежень

Алгоритм	Тип	Особливості врахування обмежень
Генетичний алгоритм (GA)	Метаевристичний	У кодуванні маршрутів враховуються вагові ліміти та часові вікна
Мурашиний алгоритм (ACO)	Стохастичний	Обмеження вводяться через функцію феромонів і штрафи
Алгоритм табу-пошуку	Локальний пошук	Виключає невалідні маршрути з історії рішень
Метод обмежених найменших витрат	Евристичний	Враховує обмеження під час побудови початкового маршруту
OR-Tools Routing Solver (Google)	Комбінований	Має готові параметри для CVRPTW - capacity, time windows, distance constraints

Досвід показує, що використання комбінованих моделей CVRPTW дозволяє зменшити середній час доставки на 12–18 %, а витрати на транспорт - на 10–15 % порівняно зі звичайними VRP-моделями.

На українських підприємствах такі моделі активно використовуються у системах TMS (Transportation Management Systems) та ERP:

- компанія “Нова Пошта” застосовує модифікацію VRPTW для динамічної маршрутизації кур’єрів;
- “АТБ-Логістик” використовує алгоритм CVRP у системі планування завантаження складів;
- “Carlsberg Ukraine” поєднує обмеження за вантажопідйомністю та часовими слотами, використовуючи Google OR-Tools

2.4. Використання спеціалізованих бібліотек та програмних інструментів (OR-Tools, Python)

Сучасні транспортні системи дедалі частіше інтегрують цифрові алгоритми оптимізації, реалізовані засобами високорівневого програмування. Однією з найефективніших платформ для цього є мова Python, що забезпечує зручну роботу з математичними моделями, графами та великими масивами

даних.

Завдяки наявності відкритих бібліотек (OR-Tools, PuLP, NetworkX, Pandas, Folium тощо) стає можливим побудувати повноцінну систему оптимізації транспортних процесів навіть на рівні підприємства середнього масштабу.

1. Інструмент OR-Tools

Google OR-Tools - це потужний пакет для комбінаторної оптимізації, розроблений Google AI. Він підтримує широкий набір задач:

- *Linear Programming (LP) і Mixed Integer Programming (MIP);*
- *Vehicle Routing Problem (VRP, CVRP, VRPTW);*
- *Assignment Problem, Scheduling, Flow optimization.*

У контексті транспортної логістики OR-Tools дозволяє: визначати маршрути з урахуванням вантажопідйомності, часових вікон і кількох складів, задавати індивідуальні витрати (паливо, час, пробіг), швидко отримувати оптимальний або наближений результат для великих мереж (до кількох сотень пунктів).

```
from ortools.constraint_solver import pywrapcp, routing_enums_pb2

# Створення даних задачі
data = {
    'distance_matrix': [[0, 12, 18, 30], [12, 0, 25, 20], [18, 25, 0, 15], [30, 20, 15, 0]],
    'num_vehicles': 2,
    'depot': 0
}

# Ініціалізація маршрутизатора
manager = pywrapcp.RoutingIndexManager(len(data['distance_matrix']),
                                       data['num_vehicles'], data['depot'])
routing = pywrapcp.RoutingModel(manager)

# Визначення функції відстані
def distance_callback(from_index, to_index):
    f = manager.IndexToNode(from_index)
    t = manager.IndexToNode(to_index)
    return data['distance_matrix'][f][t]

routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(routing.RegisterTransitCallback(distance_callback))

# Вибір алгоритму пошуку
search_params = pywrapcp.DefaultRoutingSearchParameters()
search_params.first_solution_strategy = routing_enums_pb2.FirstSolutionStrategy.PATH_CHEAPEST_ARC
```

Рис. 2.3 - Приклад застосування для задачі VRP

```

solution = routing.SolveWithParameters(search_params)

# Вивід результату
if solution:
    total_distance = 0
    for vehicle_id in range(data['num_vehicles']):
        index = routing.Start(vehicle_id)
        route = []
        while not routing.IsEnd(index):
            route.append(manager.IndexToNode(index))
            index = solution.Value(routing.NextVar(index))
        print(f"Маршрут для автомобіля {vehicle_id}: {route}")

```

Рис. 2.4 - Приклад застосування для задачі VRP

У цьому прикладі задається матриця відстаней між пунктами, кількість транспортних засобів і депо. OR-Tools знаходить маршрути з мінімальною сумарною відстанню.

2. Бібліотека PuLP

PuLP - це Python-бібліотека для лінійного програмування, що дозволяє формувати й розв'язувати транспортні задачі типу:

$$\text{Мінімізувати: } Z = \sum c_{ij}x_{ij} \quad (2.5)$$

за умов обмежень попиту, пропозиції та вантажопідйомності.

PuLP підтримує інтеграцію з потужними солверами (CBC, Gurobi, CPLEX).

```

import pulp

# Створення моделі
model = pulp.LpProblem("Transport_Optimization", pulp.LpMinimize)

# Змінні
x12 = pulp.LpVariable("x12", lowBound=0)
x13 = pulp.LpVariable("x13", lowBound=0)
x23 = pulp.LpVariable("x23", lowBound=0)

# Функція витрат
model += 8*x12 + 6*x13 + 10*x23

# Обмеження попиту і пропозиції
model += x12 + x13 <= 100 # Запас складу 1
model += x23 >= 80 # Попит пункту 3

# Розв'язання
model.solve()
print("Мінімальні витрати:", pulp.value(model.objective))

```

Рис. 2.5 - Приклад мінімізації транспортних витрат

PuLP дозволяє швидко перевіряти різні сценарії оптимізації - наприклад, варіанти перерозподілу транспорту між складами.

3. NetworkX і Folium - для візуалізації маршрутів

NetworkX використовується для побудови графів транспортної мережі, пошуку найкоротших шляхів (алгоритм Дейкстри, Беллмана-Форда) та аналізу вузлів.

Folium - для побудови інтерактивних карт із нанесенням маршрутів і точок доставки

```
import networkx as nx
G = nx.Graph()
G.add_weighted_edges_from([(1, 2, 10), (2, 3, 5), (1, 3, 15)])
path = nx.shortest_path(G, source=1, target=3, weight='weight')
print("Найкоротший шлях:", path)
```

Рис. 2.6 - Приклад фрагмента коду для побудови графа транспортної мережі

4. Інтеграція в логістичні системи

Використання Python-бібліотек дозволяє створювати власні модулі для ERP або TMS, що автоматично: розраховують оптимальні маршрути, оновлюють дані в базі у режимі реального часу, формують аналітичні звіти (витрати, пробіги, час доставки), взаємодіють з GPS-трекерами через API.

Такі інструменти активно застосовують компанії Carlsberg Ukraine, Rozetka Logistics, Нова Пошта, які інтегрують OR-Tools у свої TMS-платформи для зниження логістичних витрат.

Таблиця 2.4

Переваги використання програмних бібліотек

Перевага	Пояснення
Відкритий вихідний код	Безкоштовне використання і можливість адаптації під власні потреби
Гнучкість	Підтримка різних типів задач: LP, MIP, VRP, CVRP, VRPTW
Інтеграція	Просте поєднання з базами даних, ERP, веб-додатками

Висока швидкість	Розрахунок оптимального рішення навіть для сотень точок
Візуалізація	Можливість створювати карти, графи, аналітичні панелі

Висновки до другого розділу

На основі проведеного аналізу встановлено, що оптимізація транспортних процесів є складною багатокритеріальною задачею, вирішення якої потребує поєднання математичних, евристичних і інтелектуальних методів.

Було здійснено класифікацію оптимізаційних методів, серед яких виділено аналітичні, чисельні, евристичні, метаевристичні та гібридні. Показано, що найефективнішими для складних транспортних задач є метаевристичні підходи - генетичні, мурашині, табу-пошук, які дозволяють знаходити близькі до оптимальних рішення при великих обсягах даних.

Розглянуто алгоритми для задач маршрутизації транспортних засобів (VRP). Показано, що класичні методи (Дейкстри, Беллмана–Форда, симплекс-метод) ефективні лише для малих мереж, тоді як для реальних логістичних систем доцільно застосовувати евристичні та метаевристичні алгоритми. Встановлено, що їх використання дає змогу знизити транспортні витрати на 10–15 % і скоротити час доставки на 12–18 %.

Багато уваги було присвячено методам врахування обмежень вантажопідйомності та часу, що є ключовими в реальних умовах експлуатації транспорту. Розглянуто моделі типу *Capacitated VRP (CVRP)*, *VRP with Time Windows (VRPTW)* та їх комбінації (*CVRPTW*). Показано, що врахування фізичних і часових обмежень у математичних моделях забезпечує реалістичність отриманих результатів і підвищує надійність транспортного планування.

А також проаналізовано спеціалізовані бібліотеки та програмні інструменти (OR-Tools, PuLP, NetworkX, Folium), що забезпечують практичну

реалізацію оптимізаційних моделей. Виявлено, що саме ці інструменти є базовими для створення прикладних систем управління транспортними процесами, оскільки поєднують точність математичних моделей із гнучкістю програмної реалізації.

Отже, у результаті дослідження встановлено, що ефективна оптимізація транспортних систем можлива лише за умови інтеграції теоретичних моделей з інтелектуальними алгоритмами та цифровими інструментами. Такий підхід забезпечує зменшення витрат, покращення використання автопарку, скорочення часу доставки та підвищення рівня керованості транспортних процесів. Отримані теоретичні висновки слугують підґрунтям для практичної реалізації моделі оптимізації транспортних процесів у наступному розділі магістерської роботи

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТОМ

3.1. Постановка задачі та моделювання транспортної системи

На основі теоретичного аналізу, проведеного в попередніх розділах, для практичної реалізації було сформульовано комплексну оптимізаційну задачу, що максимально наближена до реальних умов функціонування транспортних підприємств. Розроблений програмний продукт "TMS Pro" призначений для вирішення ускладненої версії класичної задачі маршрутизації, яка в науковій літературі відома як задача маршрутизації транспортних засобів з обмеженнями по вантажопідйомності, часовими вікнами та операціями забору/доставки (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows and Pickups-Deliveries, CVRPTW-PD).



Рис. 3.1 – Схематичне представлення задачі CVRPTW-PD

Об'єктом моделювання є логістичні процеси підприємства, яке оперує гетерогенним автопарком (автомобілі різної вантажопідйомності та паливної ефективності) для виконання щоденних заявок клієнтів. Система моделює один робочий день (рейс) і має на меті знайти оптимальний план розподілу цих заявок між доступними автомобілями.

Вхідні дані моделі

Модель оперує трьома основними групами вхідних даних, які користувач (логіст) надає через інтерфейс додатку:

1. Набір заявок (Requests): Це множина точок, які необхідно відвідати. Кожна заявка "i" характеризується параметрами:

- Адреса: Текстове представлення місцезнаходження клієнта.
- Тип заявки (type): "Доставка" або "Забір".
- Вага вантажу (w_i): Кількість вантажу в кілограмах.
- Часове вікно ($[e_i, l_i]$): Проміжок часу (від earliest до latest), протягом якого клієнт готовий прийняти/віддати вантаж.

2. Автопарк (Vehicles): Це множина доступних транспортних засобів K. Кожен автомобіль k \in K характеризується:

- Вантажопідйомність (Q_k): Максимально допустима вага вантажу.
- Витрата палива (f_k): Кількість літрів на 100 км пробігу.

3. Глобальні параметри рейсу (Global Parameters):

- Адреса депо: Початкова та кінцева точка всіх маршрутів.
- Робочі години депо ($[E_0, L_0]$): Загальний часовий проміжок, в межах якого всі автомобілі повинні розпочати та завершити свої маршрути.
- Час на обслуговування (s_i): Фіксований час у хвилинах, що витрачається на розвантаження/завантаження у кожній точці.
- Економічні коефіцієнти: Базова вартість залучення авто та коефіцієнт вартості від вантажопідйомності, що використовуються для розрахунку економічної доцільності використання того чи іншого авто.

Вихідні дані моделі (Результат)

Результатом роботи системи є повний план рейсів, що включає:

1. Набір оптимальних маршрутів: Для кожного задіяного автомобіля формується послідовність відвідування точок.

2. Часовий графік: Розрахований час прибуття в кожен точку маршруту.

3. Аналітичні показники: Для кожного маршруту та для рейсу в цілому розраховуються: загальний пробіг, завантаження, прогнозовані витрати палива.

Математична модель

Задача формалізується у вигляді моделі цілочисельного лінійного програмування. Нехай N - це множина всіх точок (депо та клієнти), а K - множина автомобілів.

Цільова функція: Головною метою є мінімізація комплексної "вартості" рейсу, яка складається з сумарної відстані та диференційованих "штрафів" за використання кожного автомобіля. Це змушує систему не просто знаходити найкоротший шлях, а й обирати найбільш економічно доцільні транспортні засоби.

$$Z = \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in N} F_k y_k \rightarrow \min \quad (3.1)$$

де: d_{ij} - відстань між точками i та j (отримується з Google Distance Matrix API); x_{ijk} - бінарна змінна: 1, якщо автомобіль k їде з точки i в точку j ; 0 – інакше; y_k - бінарна змінна: 1, якщо автомобіль k використовується в рейсі 0 – інакше; F_k - фіксована вартість залучення автомобіля k , яка розраховується за формулою:

$$F_k = C_{base} + (Q_k/1000) * C_{capacity} \quad (3.2)$$

де C_{base} - базова вартість, а $C_{capacity}$ - коефіцієнт від вантажопідйомності. Це значення переводиться в еквівалент метрів для сумісності з основною частиною цільової функції.

Система обмежень:

1. Обмеження по вантажопідйомності: Сумарна вага всіх заявок (і доставок, і заборів), призначених одному автомобілю, не повинна перевищувати його вантажопідйомність.

$$\sum_{i \in N} w_i * z_{ik} \leq Q_k, \quad \forall k \in K \quad (3.3)$$

де z_{ik} - бінарна змінна: 1, якщо заявка i призначена автомобілю k .

2. Обмеження по часових вікнах: Час прибуття автомобіля k до точки i , позначений як t_{ik} , повинен знаходитись у межах часового вікна клієнта.

$$e_i \leq t_{ik} \leq l_i, \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.4)$$

3. Обмеження по часу в дорозі: Час прибуття в наступну точку j залежить від часу відбуття з попередньої точки i , часу в дорозі T_{ij} та часу на обслуговування s_i .

$$t_{ik} + s_i + T_{ij} = t_{jk}, \quad \forall (i, j), \forall k \in K \quad (3.5)$$

де T_{ij} - час у дорозі між i та j (отримується з Google Distance Matrix API).

4. Обмеження робочого дня: Час прибуття в депо (точка 0) наприкінці маршруту не повинен перевищувати час закінчення робочого дня.

$$t_{0k} \leq L_0, \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

5. Логічні обмеження маршрутизації: Кожна точка (крім депо) відвідується рівно один раз; кожен автомобіль, що виїжджає з депо, повинен туди повернутися; маршрути є неперервними.

Оскільки точне розв'язання такої NP-складної задачі для великої кількості точок є обчислювально затратним, у розробленій системі для пошуку рішення використовуються ефективні метаевристичні алгоритми, реалізовані в бібліотеці Google OR-Tools.

3.2. Архітектура програмного додатку та вибір технологій

Розробка інтелектуальної системи управління транспортом "TMS Pro" базувалася на сучасних принципах програмної інженерії, що дозволило створити гнучку, розширювану та легку в підтримці архітектуру. Для

реалізації поставленої задачі було обрано тривірневу архітектуру, яка є стандартом для багатьох розподілених додатків і забезпечує чітке розділення відповідальності між компонентами системи.

Загальна архітектура системи

Система "TMS Pro" складається з трьох основних шарів:

1. Рівень представлення (Presentation Layer / Frontend): Відповідає за взаємодію з користувачем. Його основна функція - збір вхідних даних від логіста, відображення результатів оптимізації та візуалізація маршрутів на інтерактивній карті. Цей рівень є точкою контакту користувача із системою.

2. Рівень бізнес-логіки (Business Logic Layer / Backend): Це центральне ядро системи, що містить всю логіку обробки даних, розрахунків та взаємодії з зовнішніми сервісами та базою даних. Тут відбувається:

- Валідація та попередня обробка вхідних даних.
- Взаємодія з Google Maps API для отримання географічних даних.
- Побудова математичної моделі та запуск оптимізаційного алгоритму.

- Обробка результатів оптимізації та їх підготовка для відображення.

- Управління станом додатку та сесіями користувачів.

3. Рівень даних (Data Access Layer / Data Layer): Відповідає за постійне зберігання всієї необхідної інформації. Для цього було обрано легку, файлову СУБД SQLite. Вона не потребує окремого сервера, зберігаючи всю базу даних в одному файлі (logistics_data.db), що ідеально підходить для прототипування та спрощує розгортання додатку. Цей рівень забезпечує надійність зберігання та швидкий доступ до даних.

Таким чином, ці рівні працюють як єдиний механізм: рівень представлення збирає інформацію та передає її рівню бізнес-логіки; рівень бізнес-логіки обробляє дані, звертаючись за потреби до рівня даних та зовнішніх API, а потім повертає результат для відображення на рівні представлення.

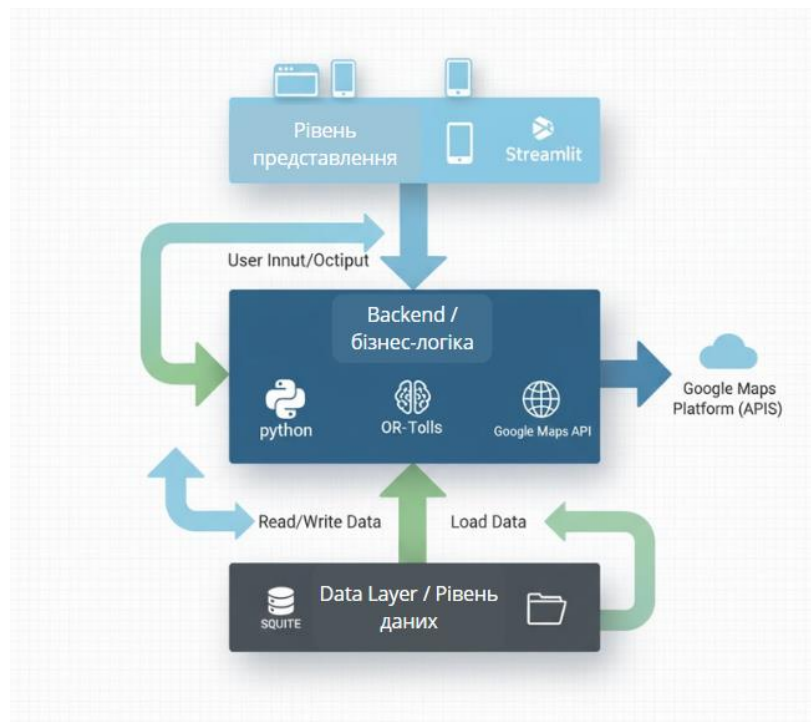


Рис. 3.2 – Трирівнева архітектура програмного додатку "TMS Pro".

Вибір та обґрунтування технологій

Для реалізації кожного рівня архітектури та забезпечення функціональності системи було обрано наступний стек технологій:

1. Python 3.x

Обґрунтування: Вибраний як основна мова програмування завдяки його простоті, синтаксичній чистоті, високій швидкості розробки та величезній екосистемі бібліотек. Python є стандартом для data science, машинного навчання та оптимізації, що робить його ідеальним для розробки інтелектуальних систем. Його універсальність дозволяє використовувати його як для розробки бекенду, так і для взаємодії з вебom та базами даних.

Використання в "TMS Pro": Весь код бізнес-логіки, взаємодія з API, управління даними та оптимізаційні алгоритми написані на Python.

2. Streamlit

Обґрунтування: Це фреймворк для Python, що дозволяє надзвичайно швидко створювати інтерактивні веб-додатки з мінімальним кодом. Він ідеально підходить для прототипування та розгортання data-driven додатків

без необхідності знань HTML, CSS та JavaScript. Streamlit автоматично перетворює Python-скрипт на інтерактивний веб-інтерфейс, спрощуючи розробку рівня представлення.

Використання в "TMS Pro": Забезпечує весь користувацький інтерфейс додатку: вкладки, форми введення даних, кнопки, таблиці, графіки та інтеграцію карти.

```
# Блок 3: Код веб-додатку Streamlit
st.set_page_config(page_title="TMS Pro", layout="wide", initial_sidebar_state="auto")
st.title("Система Управління Транспорт (TMS Pro)")
db.init_db()

if 'requests' not in st.session_state: st.session_state.requests = []
if 'active_tab' not in st.session_state: st.session_state.active_tab = "📅 **Планування Рейсу**"
if st.session_state.get('edit_run_id'):
    run_id_to_edit = st.session_state.edit_run_id
    requests, routes = db.get_run_details(run_id_to_edit)
    st.session_state.requests = []
    for i, req in enumerate(requests):
        st.session_state.requests.append(
            {'id': i + 1, "name": req['name'], "address": req['address'], "type": req['request_type'],
             "weight": req['weight'], "time_from": dt_time.fromisoformat(
                 '0' + req['time_from'] if len(req['time_from']) < 5 else req['time_from']),
             "time_to": dt_time.fromisoformat('0' + req['time_to'] if len(req['time_to']) < 5 else req['time_to'])})
    st.session_state.vehicles_to_edit = [r['vehicle_name'] for r in routes]
    db.delete_run(run_id_to_edit)
    del st.session_state.edit_run_id
st.session_state.active_tab = "📅 **Планування Рейсу**"
st.toast(f"Завантажено дані рейсу №{run_id_to_edit} для редагування.", icon="📄")
st.rerun()
```

Рис. 3.3 – Частина коду для створення основних елементів інтерфейсу за допомогою Streamlit.

3. Google OR-Tools

Обґрунтування: Це високопродуктивна бібліотека з відкритим кодом від Google для вирішення комбінаторних оптимізаційних задач, таких як задача комівояжера (TSP) та задача маршрутизації транспортних засобів (VRP). Вона пропонує ефективні алгоритми для знаходження оптимальних або майже оптимальних рішень для складних задач.

Використання в "TMS Pro": Є ядром оптимізаційного модуля, що відповідає за розрахунок найефективніших маршрутів з урахуванням усіх обмежень (вантажопідйомність, часові вікна, час на обслуговування).

4. Google Maps Platform APIs (Geocoding, Distance Matrix, Directions)

Geocoding API - Перетворення текстових адрес на географічні координати (широта, довгота). Це критично для точності маршрутизації.

Distance Matrix API - Розрахунок матриць відстаней та часу в дорозі між усіма парами точок. Підтримує опцію врахування поточного трафіку (`departure_time='now'`), що робить розрахунки більш реалістичними.

Directions API - Побудова детальних маршрутних ліній для візуалізації на карті, що забезпечує відображення реальних доріг, а не прямих відрізків.

Обґрунтування: Надають доступ до актуальних географічних даних, що є критично важливим для реалістичної маршрутизації. Geocoding API перетворює текстові адреси в географічні координати. Distance Matrix API дозволяє розраховувати матриці відстаней та часу в дорозі між кількома точками, враховуючи дорожню мережу та (опціонально) поточний трафік. Directions API надає детальні покрокові інструкції та полілінії для візуалізації фактичних маршрутів.

Використання в "TMS Pro": Використовується для перетворення адрес у координати, розрахунку реальних відстаней та часу між точками, а також для побудови деталізованих шляхів на карті.

5. Pandas

Обґрунтування: Це бібліотека для Python, що надає високоефективні структури даних (DataFrame) та інструменти для їх аналізу та маніпуляції. Вона є стандартом де-факто для роботи з табличними даними в Python.

Використання в "TMS Pro": Використовується для зручного зберігання, обробки та представлення даних про заявки, автомобілі та результати розрахунків.

6. Folium та Streamlit-Folium

Обґрунтування: Folium - це бібліотека Python, що дозволяє створювати інтерактивні карти Leaflet.js безпосередньо з Python. Streamlit-Folium - це спеціальний компонент, який інтегрує карти Folium у додатки Streamlit. Це забезпечує потужні можливості візуалізації географічних даних.

Використання в "TMS Pro": Застосовується для візуалізації депо, точок клієнтів та розрахованих маршрутів на інтерактивній карті.

7. SQLite

Обґрунтування: Це легка, файлова реляційна система управління базами даних (СУБД). Вона не потребує окремого сервера, зберігаючи всю базу даних в одному файлі (logistics_data.db). Це робить її ідеальною для невеликих додатків, прототипів та локального розгортання, оскільки спрощує розгортання та адміністрування.

Використання в "TMS Pro": Слугує рівнем даних для зберігання інформації про зареєстровані автомобілі, історію виконаних рейсів, деталі заявок, що входили до рейсу, та зведені дані по маршрутах.

Структура бази даних (основні таблиці):

- «vehicles»: Зберігає інформацію про автомобілі автопарку (назва, вантажопідйомність, витрата палива).
- «runs»: Записує інформацію про кожен запланований або виконаний рейс (дата, загальний пробіг, загальні витрати палива, статус).
- «requests»: Деталі заявок, що входять до кожного рейсу (адреса, вага, тип, часові вікна).
- «routes»: Зберігає оптимальні маршрути для кожного автомобіля в рамках рейсу (послідовність точок, відстань, завантаження, витрати палива).

Об'єднання цих технологій дозволило створити комплексне, ефективне та зручне у використанні програмне рішення для оптимізації транспортних перевезень. Кожен вибір технології був зроблений з урахуванням її відповідності функціональним вимогам, простоти інтеграції та підтримки, а також ефективності обробки даних.

3.3. Реалізація алгоритмів оптимізації маршрутів

Основна функціональність системи "TMS Pro" зосереджена в модулі оптимізації, який відповідає за розрахунок ефективних маршрутів. Цей модуль побудований на базі потужної бібліотеки Google OR-Tools, що спеціалізується

на вирішенні задач комбінаторної оптимізації, зокрема, задач маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem). Процес оптимізації складається з кількох послідовних етапів.

1. Підготовка вхідних даних для OR-Tools

Першим і критично важливим етапом є трансформація сирих даних, введених користувачем, у формат, зрозумілий для бібліотеки OR-Tools. Цей етап включає:

Формування списку точок: Зі списку активних заявок та адреси депо формується єдиний список унікальних точок, які потрібно відвідати. Депо завжди є початковою точкою (індекс 0) для всіх маршрутів.

Геокодування адрес: Для кожної унікальної адреси (депо та клієнтів) система звертається до Google Geocoding API. Цей API перетворює текстові адреси (наприклад, "Київ, вул. Хрещатик, 1") на точні географічні координати (широту та довготу). Це гарантує, що подальші розрахунки відстаней будуть базуватися на реальному географічному положенні.

```
def create_data_model(locations_df, vehicles_df, distance_matrix, duration_matrix, service_time_seconds, usage
    depot_working_hours):
    """Створює словник з даними для розв'язувача OR-Tools."""
    demands = [row['weight'] for _, row in locations_df.iterrows()]
    demands[0] = 0

    data = {
        'distance_matrix': distance_matrix, 'duration_matrix': duration_matrix,
        'demands': demands, 'vehicle_capacities': vehicles_df['capacity'].tolist(),
        'num_vehicles': len(vehicles_df), 'depot': 0,
        'location_names': locations_df['name'].tolist(),
        'vehicle_names': vehicles_df['name'].tolist(),
        'vehicle_fuel_consumptions': vehicles_df['fuel_consumption'].tolist(),
        'service_time': service_time_seconds
    }

    time_windows = []
    for _, row in locations_df.iterrows():
        start, end = (t.hour * 3600 + t.minute * 60 for t in (row['time_from'], row['time_to']))
        time_windows.append((start, end))
    depot_start, depot_end = (t.hour * 3600 + t.minute * 60 for t in depot_working_hours)
    time_windows[0] = (depot_start, depot_end)
    data['time_windows'] = time_windows
    return data
```

Рис. 3.4 – Частина коду формування структури вхідних даних для Google OR-Tools

Побудова матриць відстаней та часу.

Використовуючи отримані координати, система робить запит до Google Distance Matrix API. Цей API повертає дві ключові матриці:

- `distance_matrix`: Містить відстань у метрах між кожною парою точок.
- `time_matrix`: Містить прогнозований час у дорозі в секундах між кожною парою точок.

Важливою особливістю інтеграції є можливість передачі параметра `departure_time='now'`, що дозволяє враховувати поточну дорожню ситуацію та пробки під час розрахунку часу в дорозі, забезпечуючи максимальну реалістичність прогнозу.

Формування структури data для OR-Tools.

Створюється Python-словник (`data`), який інкапсулює всі необхідні для OR-Tools параметри:

- `distance_matrix`: Матриця відстаней.
- `time_matrix`: Матриця часу в дорозі.
- `demands`: Список ваг для кожної точки (позитивні для доставок, негативні для заборів).
- `time_windows`: Список кортежів (`earliest_start`, `latest_end`) для кожної точки.
- `vehicle_capacities`: Список вантажопідйомностей обраних автомобілів.
- `vehicle_times`: Список доступних робочих годин для кожного автомобіля.
- `num_vehicles`: Кількість обраних автомобілів.
- `depot`: Індекс депо (0).
- `service_time`: Фіксований час на обслуговування кожної заявки.
- `fixed_costs`: Список фіксованих "штрафних" вартостей за використання кожного автомобіля (детальніше в п. 3.1).

2. Ініціалізація моделі та визначення обмежень

Після підготовки даних відбувається створення оптимізаційної моделі в OR-Tools:

Ініціалізація `RoutingIndexManager`.

`manager=pywrapcp.RoutingIndexManager(data['num_locations'], data['num_vehicles'], data['depot'])`. Цей об'єкт управляє індексами точок та автомобілів, перетворюючи їх з внутрішніх індексів OR-Tools у зовнішні та навпаки.

Ініціалізація `RoutingModel`.

`routing = pywrapcp.RoutingModel(manager)`. Створюється основний об'єкт моделі, в який додаватимуться всі обмеження та цільова функція.

Визначення функцій зворотного виклику (Callbacks).

Для ефективної роботи OR-Tools використовує так звані "callback functions". Це функції, які модель викликає щоразу, коли їй потрібно дізнатися, наприклад, відстань або час між двома точками, або попит у певній точці:

- `distance_callback`: Повертає відстань між двома точками з `distance_matrix`.
- `time_callback`: Повертає суму часу в дорозі (з `time_matrix`) та часу на обслуговування (s_i) для переходу між двома точками.
- `demand_callback`: Повертає вагу вантажу для кожної точки (позитивну для доставки, негативну для забору).

Додавання "вимірів" (Dimensions).

Виміри - це ключовий механізм OR-Tools для додавання обмежень. Вони дозволяють відстежувати сумарні значення змінних (як-от вантаж чи час) на маршруті. `Capacity Dimension` (Вантажопідйомність):

`routing.AddDimensionWithVehicleCapacities(...)`

Цей вимір додається з `demand_callback` та `vehicle_capacities`. Модель автоматично забезпечує, щоб сумарний "попит" на маршруті (накопичена вага вантажу) ніколи не перевищував вантажопідйомність поточного автомобіля.

`Time Dimension` (Час):

`routing.AddDimension(...)`

Цей вимір додається з `time_callback`. Він відстежує накопичений час на маршруті.

На нього накладаються: Часові вікна для клієнтів: `time_dimension.SetCumulVarRange(manager.NodeToIndex(i), data['time_windows'][i][0], data['time_windows'][i][1])`. Гарантує, що автомобіль прибуває до клієнта в допустимий проміжок.

Загальні робочі години для депо: Обмеження на час початку та закінчення роботи автомобілів, повернення в депо до кінця робочого дня. Встановлення вартості переміщення (`CostofArcs`):

```
routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(distance_callback_index).
```

Цільова функція мінімізує загальну вартість. За замовчуванням, ця вартість дорівнює відстані (з `distance_matrix`), що мінімізує загальний пробіг.

Додавання фіксованої вартості залучення авто:

```
routing.SetFixedCostOfVehicle(i, data['fixed_costs'][i]).
```

Як було описано в п. 3.1, ця "штрафна" вартість змушує оптимізатор обирати меншу кількість автомобілів або автомобілі з меншою вантажопідйомністю, якщо це економічно доцільніше.

```
demand_cb_idx = routing.RegisterUnaryTransitCallback(demand_callback)
routing.AddDimensionWithVehicleCapacity(demand_cb_idx, slack_max: 0, data['vehicle_capacities'], fix_start_cumul_to_zero: True,
                                         name: 'Capacity')

time_cb = routing.RegisterTransitCallback(lambda f, t: int(
    data['duration_matrix'][manager.IndexToNode(f)][manager.IndexToNode(t)] + data['service_time']))
routing.AddDimension(time_cb, slack_max: 3600, 24 * 3600, fix_start_cumul_to_zero: False, name: "Time")
time_dim = routing.GetDimensionOrDie("Time")
for loc_idx, time_win in enumerate(data['time_windows']):
    if loc_idx != 0: time_dim.CumulVar(manager.NodeToIndex(loc_idx)).SetRange(int(time_win[0]),
                                                                              int(time_win[1]))
for i in range(data['num_vehicles']): time_dim.CumulVar(routing.Start(i)).SetRange(
    int(data['time_windows'][0][0]), int(data['time_windows'][0][1]))
```

Рис. 3.5 – Частина коду додавання обмежень вантажопідйомності та часових вікна в модель OR-Tools

3. Алгоритми пошуку рішення

OR-Tools не використовує повний перебір, а покладається на високоефективні евристичні та метаевристичні алгоритми, що дозволяють знаходити дуже хороші рішення за прийнятний час, навіть для складних задач:

Стратегія першого рішення (`first_solution_strategy`):

`search_parameters.first_solution_strategy=(routing_enums_pb2.FirstSolutionStrategy.PATH_CHEAPEST_ARC)`. Ця стратегія швидко будує початкове, "пристойне" рішення, вибираючи найдешевші дуги (шляхи) для додавання до маршруту. Це дає хорошу стартову точку для подальшого покращення.

Стратегія локального пошуку (`local_search_metaheuristic`):

`search_parameters.local_search_metaheuristic=(routing_enums_pb2.LocalSearchMetaheuristic.GUIDED_LOCAL_SEARCH)`. `GUIDED_LOCAL_SEARCH` - це потужна метаевристика, яка ітеративно покращує поточне рішення. Вона працює, "штовхаючи" алгоритм виходити з локальних оптимумів, додаючи тимчасові "штрафи" за часто відвідувані елементи, таким чином досліджуючи ширший простір рішень.

Обмеження по часу:

`search_parameters.time_limit.FromSeconds(20)`. Встановлюється максимальний час виконання алгоритму (наприклад, 20 секунд). Це гарантує, що система не буде "зависати" на дуже складних задачах, а поверне найкраще знайдене рішення протягом заданого часу.

Вирішення моделі:

`solution = routing.SolveWithParameters(search_parameters)`. Запускається процес пошуку рішення. Якщо рішення знайдено, повертається об'єкт `solution`, який містить деталізовані маршрути для кожного автомобіля.

4. Обробка та візуалізація результатів

Отримане від OR-Tools рішення обробляється для представлення у зручному вигляді:

Парсинг маршрутів: Для кожного автомобіля з об'єкта `solution` витягується послідовність відвіданих точок. Для кожної точки визначається

час прибуття, час початку обслуговування та поточне завантаження автомобіля.

Деталізація маршрутів через Google Directions API: Замість простого з'єднання точок прямою лінією, система використовує Google Directions API. Для кожної ділянки маршруту (між двома послідовними точками) робиться запит до Directions API, який повертає набір географічних координат, що формують реальний шлях по дорогах. Це дозволяє точно візуалізувати маршрути на карті.

Розрахунок аналітичних показників:

На основі отриманих маршрутів та деталей автопарку розраховуються: Загальний пробіг кожного автомобіля та всього рейсу; Прогнозована витрата палива (на основі пробігу та норми витрати авто); Середнє та максимальне завантаження кожного автомобіля.

Збереження результатів: Всі деталі розрахованого рейсу (маршрути, заявки, загальні показники) зберігаються у базі даних SQLite для подальшого аналізу та відображення в історії.

Візуалізація: За допомогою бібліотеки Folium (через streamlit_folium) генерується інтерактивна карта. На ній відображаються депо, всі точки заявок (різними кольорами для доставки/забору) та деталізовані маршрути для кожного автомобіля. Маршрути візуалізуються як окремі шари, що дозволяє користувачеві вмикати/вимикати їх для зручності аналізу.

Цей комплексний підхід до оптимізації дозволяє системі "TMS Pro" ефективно вирішувати складні логістичні задачі, надаючи користувачу не тільки оптимальні маршрути, але й глибоку аналітику та зручну візуалізацію.

3.4. Візуалізація маршрутів та інтерфейс користувача

Ефективність будь-якої оптимізаційної системи значною мірою залежить від того, наскільки зрозуміло та доступно представлені результати її роботи. Складні набори даних та маршрутів, представлені у вигляді сирого тексту, є малокорисними для оперативного прийняття рішень. Тому ключовим

завданням при розробці "TMS Pro" було створення інтуїтивно зрозумілого, функціонального та інформативного користувацького інтерфейсу (UI), який перетворює результати оптимізації на зручне "робоче місце логіста".

Для реалізації UI було обрано фреймворк Streamlit, що дозволило швидко розробити інтерактивний веб-додаток, повністю написаний на мові Python.

1. Структура інтерфейсу користувача

Інтерфейс додатку логічно структурований за допомогою системи вкладок, що дозволяє користувачеві легко перемикатися між різними функціональними блоками системи.

- **Планування Рейсу:** Це основний робочий екран, де відбувається вся підготовча робота. Він містить елементи для введення всіх необхідних даних: вибір дати рейсу, введення адреси депо, перемикач для врахування трафіку. Інтерфейс розділений на дві колонки: ліва - для роботи з заявками, права - для вибору доступних автомобілів. Реалізовано зручні форми для додавання нових заявок, а також можливість редагування поточного списку заявок безпосередньо в таблиці (`st.data_editor`), що значно прискорює роботу (дивись додаток А, Б).

- **Історія Рейсів:** Ця вкладка слугує архівом усіх створених рейсів. Кожен рейс представлений у вигляді інтерактивного блоку (`st.expander`), який можна розгорнути для перегляду деталей: списку заявок та розрахованих маршрутів. Ключовою особливістю є система управління статусами, що дозволяє імітувати життєвий цикл рейсу. Для запланованих рейсів доступні кнопки "Розпочати", "Редагувати" та "Видалити". Реалізована функція експорту всієї історії у формат `.xlsx` для подальшого аналізу (дивись додаток В).

- **Статус Автопарку:** Цей розділ надає швидкий огляд доступності транспортних засобів на обрану дату. Система автоматично аналізує збережені рейси та позначає автомобілі як "Вільний" або "Зайнятий". Тут же знаходиться функціонал для керування загальним автопарком: додавання нових автомобілів

(із зазначенням вантажопідйомності та норми витрати палива) та видалення існуючих (дивись додаток Г).

- Звіт по Паливу: Аналітичний інструмент для контролю витрат. Користувач може обрати будь-який період та сформувавши звіт по витратах палива для всіх рейсів зі статусом "Завершено". Результати представлені у трьох форматах: загальні показники (st.metric), детальна таблиця з розбивкою по кожному авто та наочна стовпчикова діаграма для візуального порівняння (дивись додаток Д).

2. Візуалізація результатів оптимізації

Після успішного розрахунку система надає результати у двох ключових форматах: текстовому звіті та на інтерактивній карті.

Текстовий звіт: Це основний документ, що містить точні дані про розрахований рейс. Для кожного задіяного автомобіля виводиться наступна інформація:

- Назва автомобіля та його вантажопідйомність.
- Послідовність відвідування точок з прогнозованим часом прибуття до кожної з них.
- Загальна відстань маршруту в кілометрах.
- Максимальне завантаження автомобіля протягом рейсу.
- Прогнозована витрата палива в літрах. Також виводяться загальні показники по всьому рейсу: кількість задіяних авто та сумарний пробіг.

Рейс успішно розраховано та збережено!

🚗 Задіяно автомобілів: 2 📍 Загальний пробіг: 113.85 км

🚗 2101 (10000кг):

- Маршрут: Депо (приб. о 9:54:28) → Склад 'Розетка' (приб. о 11:54:53) → Повернення (Arena City) (приб. о 14:00:00) → ТРЦ 'Ocean Plaza' (приб. о 14:53:22) → Депо (пов. о 15:48:31)
- Відстань: 49.95 км
- Завантаження: 9300 кг
- Паливо: 4.99 л

🚗 2104 (20000кг):

- Маршрут: Депо (приб. о 7:00:00) → Епіцентр К (приб. о 9:00:00) → Кафе 'Urban Space' (приб. о 10:59:42) → Нова Пошта №1 (приб. о 13:00:00) → Депо (пов. о 13:48:01)
- Відстань: 63.90 км
- Завантаження: 19150 кг
- Паливо: 6.39 л

Рис. 3.6 – Текстовий звіт розрахованого рейсу.

Інтерактивна карта маршрутів: Для наочної візуалізації географії рейсів використовується інтерактивна карта, реалізована за допомогою бібліотек Folium та streamlit-folium. Вона має низку важливих особливостей, що значно підвищують її інформативність та зручність використання:

1. Деталізовані маршрути: На відміну від простого з'єднання точок прямими лініями, система використовує Google Directions API для побудови реальних автомобільних шляхів. Це дозволяє користувачеві бачити точний маршрут по дорогах, що є критично важливим для оцінки реального пробігу та часу.

2. Інформативні маркери: Кожна точка на карті (депо та заявки) позначена маркером з іконкою та кольором, що відповідає її типу:

- Депо: Червоний маркер з іконкою "дім".
- Доставка: Зелений маркер з іконкою "стрілка вниз".

- **Забір:** Помаранчевий маркер з іконкою "стрілка вгору". При наведенні на маркер з'являється підказка з назвою точки, а при кліку - детальна інформація (назва, вага, тип).

Карта маршрутів:

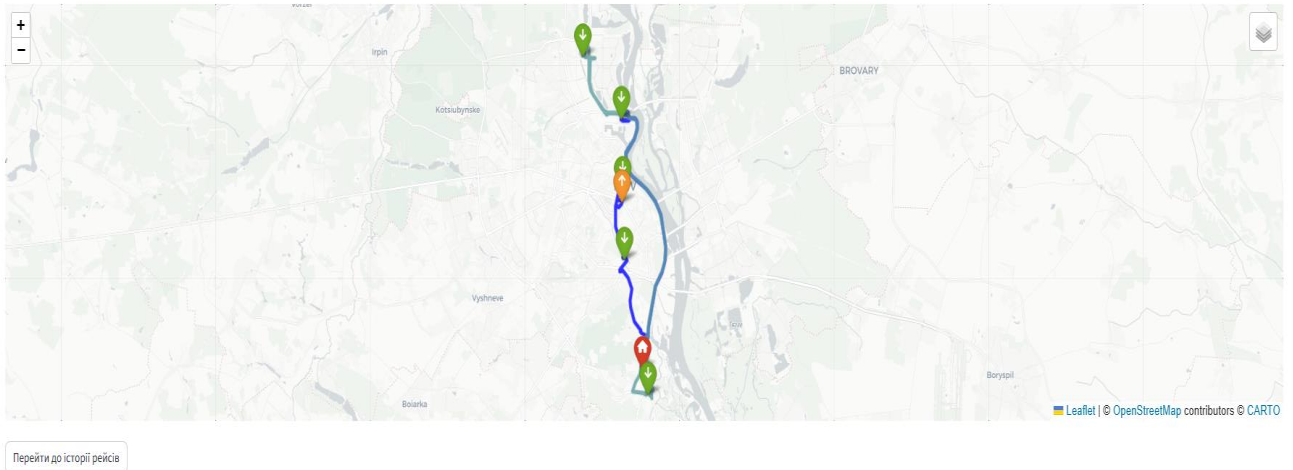


Рис. 3.7 – Інтерактивна карта розрахованого рейсу.

```

if solution:
    st.success("Рейс успішно розраховано та збережено!")
    run_id = db.create_run(selected_date)
    db.save_requests_for_run(run_id, st.session_state.requests)
    solution_text, routes_data, total_dist = get_solution_routes(data, manager, routing, solution,
                                                                time_dim)

    st.markdown(solution_text)
    st.subheader("Карта маршрутів:")
    st_folium(create_solution_map(gmaps, locs_upd, data, manager, routing, solution), width='100%',
              height=500, returned_objects=[])
    total_fuel = db.save_routes_for_run(run_id, routes_data)
    db.update_run_totals(run_id, total_dist, total_fuel)
    st.session_state.requests = []
    if st.button("Перейти до історії рейсів"): st.rerun()
else:
    st.error(
        "Не вдалося знайти рішення. Спробуйте змінити економічні параметри, додати більше авто або збільшити часові вікна.")

```

Рис. 3.8 - Частина коду створення інтерактивної карти та додавання шарів маршрутів за допомогою Folium

3. Система шарів (Layers): Це ключова функція для роботи зі складними рейсами, де задіяно кілька автомобілів. Маршрут кожного автомобіля малюється на окремому інтерактивному шарі. У правому верхньому куті карти з'являється контролер шарів, який дозволяє користувачеві вмикати або вимикати відображення маршруту для будь-якого з

автомобілів. Це вирішує проблему "захаращеності" карти та дозволяє аналізувати кожен маршрут окремо.



Рис. 3.9 – Система «шарів» на інтерактивній карті.

Таким чином, розроблений інтерфейс та система візуалізації перетворюють складні оптимізаційні розрахунки на простий, наочний та функціональний інструмент для щоденної роботи логіста, що повністю відповідає меті даної магістерської роботи.

Висновки до третього розділу

У межах третього розділу магістерської роботи було виконано ключовий етап дослідження - практичну розробку та реалізацію прототипу інтелектуальної системи управління транспортом "TMS Pro". Результатом роботи є повноцінний програмний продукт, що вирішує комплексну задачу оптимізації маршрутів з урахуванням реальних бізнес-обмежень.

Сформульовано комплексну математичну модель: На основі теоретичного аналізу було розроблено математичну модель, що описує ускладнену задачу маршрутизації CVRPTW-PD (задача з обмеженнями по вантажопідйомності, часовими вікнами та операціями забору/доставки). Модель враховує гетерогенність автопарку, робочі години, час на обслуговування клієнтів та економічну доцільність використання транспортних засобів різної вантажопідйомності.

Спроектовано та реалізовано тривірневу архітектуру: Розроблений додаток має сучасну архітектуру, що складається з трьох основних компонентів:

- Рівень представлення (Frontend): Реалізований за допомогою фреймворку Streamlit, що забезпечує створення інтерактивного та доступного веб-інтерфейсу без потреби у спеціалізованому програмному забезпеченні на стороні клієнта.

- Рівень бізнес-логіки (Backend): Побудований на мові Python з використанням бібліотеки Google OR-Tools як основного оптимізаційного ядра. Інтеграція з сервісами Google Maps Platform (Geocoding, Distance Matrix, Directions API) дозволяє оперувати реальними геоданими, враховувати дорожню мережу та поточний трафік.

- Рівень даних (Data Layer): Організований за допомогою легкої файлової бази даних SQLite для забезпечення персистентності даних: збереження автопарку, історії рейсів та налаштувань.

Розроблено ефективні алгоритми оптимізації: У ядрі системи реалізовано логіку налаштування та запуску метаевристичних алгоритмів з бібліотеки OR-Tools. Процес включає динамічне формування матриць відстаней та часу, конфігурацію "вимірів" (Dimensions) для контролю вантажопідйомності та часових вікон, а також визначення складеної цільової функції, що мінімізує не тільки пробіг, а й економічні витрати на залучення авто.

Створено функціональний та інформативний інтерфейс користувача: Розроблено багатосторінковий інтерфейс, що імітує "робоче місце логіста" та включає вкладки для планування, перегляду історії, моніторингу статусу автопарку та формування аналітичних звітів. Особливу увагу приділено візуалізації результатів: текстові звіти доповнено інтерактивною картою з детальними маршрутами по дорогах та системою шарів для зручного аналізу кожного маршруту окремо.

Таким чином, у третьому розділі було успішно пройдено шлях від теоретичної моделі до створення готового до використання програмного прототипу. Розроблена система "TMS Pro" є комплексним інструментом, що

автоматизує та оптимізує ключові логістичні процеси. Це створює міцне підґрунтя для переходу до наступного етапу дослідження - експериментальної перевірки ефективності системи, що буде детально розглянуто в четвертому розділі.

РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Вхідні дані та сценарії тестування

Метою експериментальної перевірки є кількісна оцінка ефективності розробленої інтелектуальної системи "TMS Pro" шляхом порівняння її результатів із базовим, неоптимізованим методом планування на реалістичному наборі даних. Для цього було розроблено сценарій, що імітує типовий робочий день невеликого логістичного підприємства, яке здійснює доставку та забір вантажів у межах міста.

Опис умовного підприємства та автопарку

В якості об'єкта моделювання було обрано умовне підприємство ТОВ "Логістик Плюс", що спеціалізується на міських вантажних перевезеннях у Києві. Автопарк підприємства складається з трьох автомобілів різної вантажопідйомності та паливної ефективності, що є типовим для компаній такого профілю. Характеристики автопарку, що використовуються в експерименті, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Характеристики автопарку ТОВ "Логістик Плюс"

ID	Назва моделі	Вантажопідйомність (кг)	Витрата палива (л/100 км)
1	Ford Transit	1500	11.5
2	Renault Master	2200	13.0
3	Mercedes Sprinter	1800	12.0

Формування набору тестових заявок

Для проведення експерименту було сформовано набір із шести типових заявок на один робочий день (умовно, 18 жовтня 2025 року), що включають як доставку, так і забір вантажу, з різними ваговими характеристиками та жорсткими часовими вікнами. Цей набір даних дозволяє перевірити здатність системи працювати зі складними комбінованими обмеженнями. Детальний перелік заявок наведено в таблиці 4.2.

Список тестових заявок на рейс

ID	Назва клієнта	Адреса	Тип заявки	Вага (кг)	Часове вікно
1	Епіцентр К	м. Київ, вул. Полярна, 20Д	Доставка	1200	09:00 - 12:00
2	Склад 'Розетка'	м. Київ, проспект Степана Бандери, 34В	Доставка	850	10:00 - 14:00
3	ТРЦ 'Ocean Plaza'	м. Київ, вул. Антоновича, 176	Доставка	500	11:00 - 17:00
4	Кафе 'Urban Space'	м. Київ, вул. Бориса Грінченка, 9	Доставка	150	09:00 - 11:00
5	Повернення (Арена)	м. Київ, вул. Велика Васильківська, 1-3/2	Забір	300	14:00 - 16:00
6	Нова Пошта №1	м. Київ, Столичне шосе, 103	Доставка	700	13:00 - 18:00

Глобальні параметри та налаштування системи

Для обох сценаріїв тестування (оптимізованого та базового) були встановлені однакові глобальні параметри рейсу:

- Адреса депо: м. Київ, вул. Пирогівський шлях, 135.
- Робочі години автопарку: з 08:00 до 18:00.
- Середній час на обслуговування (розвантаження/завантаження): 20 хвилин.
- Економічні параметри для оптимізатора:
- Базова вартість залучення авто: 20 (еквівалент км).
- Коефіцієнт вартості від вантажопідйомності: 2.0 (еквівалент км за тонну).
- Врахування трафіку: Увімкнено (використовуються дані Google Maps API в реальному часі).

Опис сценарію експерименту та базового методу для порівняння

Експеримент полягає у вирішенні поставленої транспортної задачі за двома різними сценаріями з подальшим порівнянням ключових показників ефективності (загальний пробіг, витрати палива, кількість задіяних авто).

Сценарій 1: "Базовий (імітація ручного планування)" Цей сценарій імітує спрощений підхід, який міг би використовувати диспетчер без доступу до інтелектуальних систем оптимізації. Він базується на простому "жадібному" алгоритмі (Greedy Algorithm / Nearest Neighbor):

1. Обирається автомобіль з найбільшою доступною вантажопідйомністю.
2. З-поміж усіх невиконаних заявок знаходиться географічно найближча до поточної позиції автомобіля (спочатку - до депо).
3. Автомобіль "відправляється" до цієї точки. Вага заявки додається до його завантаження.
4. Кроки 2-3 повторюються, доки у автомобіля вистачає вантажопідйомності.
5. Коли автомобіль заповнений, обирається наступний за розміром вільний автомобіль, і процес повторюється, доки всі заявки не будуть розподілені. Цей метод не враховує часові вікна, загальну структуру маршруту та економічну доцільність вибору авто, що є типовим для ручного планування.

Сценарій 2: "Оптимізація за відстанню" – TMS Pro з нульовою вартістю. У цьому сценарії використовується система "TMS Pro", але економічні параметри встановлено на нуль (Базова вартість залучення = 0, Коефіцієнт = 0). Метою алгоритму стає виключно мінімізація сумарного пробігу.

Сценарій 3: "Оптимізований" (з використанням "TMS Pro"). У цьому сценарії всі вхідні дані (заявки, доступний автопарк, глобальні параметри) вводяться в розроблену систему "TMS Pro". Система, використовуючи алгоритми Google OR-Tools та враховуючи всі обмеження (вантажопідйомність, часові вікна, час у дорозі з урахуванням трафіку, економічні коефіцієнти), знаходить оптимальний план рейсів.

Результати розрахунків за цими трьома сценаріями будуть представлені та проаналізовані в наступних підрозділах для визначення кількісної ефективності розробленої інтелектуальної системи.

4.2. Розрахунок оптимальних маршрутів та оцінка ефективності

Для проведення експерименту за "Оптимізованим" сценарієм було використано розроблену інтелектуальну систему "TMS Pro". Вхідні дані, описані в підрозділі 4.1 (6 заявок, 3 доступні автомобілі, глобальні параметри), були введені в інтерфейс додатку. Після запуску розрахунку система, враховуючи всі обмеження, згенерувала оптимальний план рейсів (дивись додаток К).

Результати оптимізації

Система проаналізувала сумарну вагу всіх заявок (3400 кг на доставку та 300 кг на забір) та доступну вантажопідйомність автопарку. Враховуючи економічні коефіцієнти, алгоритм визначив, що для виконання всіх завдань найбільш доцільно задіяти два автомобілі: Renault Master (2200 кг) та Ford Transit (1500 кг). Автомобіль Mercedes Sprinter (1800 кг) залишився на базі, оскільки його використання було визнано економічно менш вигідним.

Результати розрахунку, включаючи деталізовані маршрути для кожного автомобіля, представлені на рис. 4.2.



Рис. 4.1 – Звіт з результатами оптимізації в системі "TMS Pro"

Детальний опис згенерованих маршрутів:

1. Маршрут для автомобіля 2101 / Ford Transit (1500кг):

Цей автомобіль було призначено для виконання трьох заявок на доставку, що оптимально використовує його велику вантажопідйомність. Включаючи одну операцію забору вантажу.

- Послідовність: Депо (приб. о 11:32:58) → Нова Пошта №1 (приб. о 13:00:00) → Повернення (Arena City) (приб. о 14:00:00) → ТРЦ 'Ocean Plaza' (приб. о 14:34:25) → Депо (пов. о 15:08:09).

- Аналіз маршруту: Маршрут логічно згрупований у центральній та південній частинах міста. Система коректно врахувала, що 'Повернення (Arena City)' є операцією забору, та спланувала маршрут так, щоб не перевищити вантажопідйомність автомобіля.

- Загальна відстань: 40.87 км
- Максимальне завантаження: 1500 кг (500 + 700 + 300).
- Прогнозовані витрати палива: 4.70 л.

2. Маршрут для автомобіля 2102 / Renault Master (2200кг):

Цей автомобіль виконав решту заявок.

- Послідовність: Депо (приб. о 8:00:00) → Кафе 'Urban Space' (приб. о 9:00:00) → Епіцентр К (приб. о 9:42:09) → Склад 'Розетка' (приб. о 10:15:32) → Депо (пов. о 10:56:14).

- Аналіз маршруту: Система правильно визначила, що заявка для 'Urban Space' має найвужче ранкове часове вікно, тому поставила її першою. Далі маршрут пролягає на північ міста ('Епіцентр К' та 'Склад Розетка'), що є географічно логічним, і повертається на депо. Всі часові вікна були дотримані.

- Загальна відстань: 70.62 км.
- Максимальне завантаження (доставки): 2200 кг (1200 + 850 + 150).
- Прогнозовані витрати палива: 9.18 л.

Візуалізація згенерованих маршрутів на інтерактивній карті представлена в додатку Є.

Оцінка ефективності оптимізованого плану

Зведені показники ефективності для "Оптимізованого" сценарію представлені в таблиці 4.3.

Ключові показники ефективності для "Оптимізованого" сценарію

Показник	Значення
Кількість задіяних авто	2 з 3
Загальний пробіг	111.48 км
Загальні витрати палива	13.88 л
Відсоток виконаних заявок	100%
Порушення часових вікон	0

Аналіз результатів:

Розроблена система "TMS Pro" успішно впоралася з поставленою задачею. Було знайдено рішення, яке:

- Повністю задовольняє всім заявкам та їхнім обмеженням.
- Оптимально використовує автопарк, задіявши два найбільш відповідні автомобілі та залишивши третій в резерві, що є економічно доцільним.
- Логічно групує точки в маршрутах, мінімізуючи перепробіги між різними районами міста.
- Дотримується всіх часових вікон, що є критично важливим для якості обслуговування клієнтів.

Отримані кількісні показники (загальний пробіг та витрати палива) є базою для порівняння з неоптимізованим методом, яке буде проведено в наступному підрозділі. Вже на цьому етапі можна зробити висновок, що система генерує логічні та реалістичні плани рейсів, що є свідченням коректності її роботи.

4.3. Порівняння результатів із базовими методами

Для комплексної оцінки ефективності розробленої системи було проведено розрахунок за трьома різними сценаріями, що дозволяє порівняти не тільки ручний та автоматизований підходи, але й різні стратегії всередині самої автоматизованої оптимізації.

В якості базового методу було обрано імітацію дій логіста, який не має доступу до автоматизованих засобів оптимізації. Такий підхід зазвичай

базується на методі географічної кластеризації: візуальному групуванні заявок за районами міста з подальшим призначенням на кожну групу окремого автомобіля. Цей метод є більш просунутим, ніж простий "жадібний" алгоритм, і краще відображає реальну практику ручного планування.

Розрахунок за "Базовим (кластерним)" сценарієм

Використовуючи той самий набір з шести заявок, логіст візуально розділяє їх на дві групи:

1. Кластер "Північ": Включає заявки, розташовані на півночі Києва.

- "Епіцентр К" (вул. Полярна) - 1200 кг.
- "Склад 'Розетка'" (просп. Бандери) - 850 кг.
- "Кафе 'Urban Space'" (вул. Грінченка) - 150 кг (географічно ближче до північної групи, ніж до південної).

- Сумарна вага: $1200 + 850 + 150 = 2200$ кг. Для цієї групи логічно обрати автомобіль Renault Master (2200 кг).

2. Кластер "Центр/Південь": Включає решту заявок.

- "Нова Пошта №1" (Столичне шосе) - 700 кг.
- "ТРЦ 'Ocean Plaza'" (вул. Антоновича) - 500 кг.
- "Повернення (Arena City)" (вул. Велика Васильківська) - забір 300 кг.

- Сумарна вага доставок: $700 + 500 = 1200$ кг. Для цієї групи достатньо автомобіля Ford Transit (1500 кг), який також зможе виконати забір.

Побудова маршрутів всередині кластерів:

- Маршрут 1 (Renault Master): Логіст, прагнучи виконати термінову заявку, будує маршрут: Депо → Кафе 'Urban Space' → Склад 'Розетка' → Епіцентр К → Депо. Приблизний пробіг цього маршруту, розрахований через Google Maps, становить ≈ 72 км.

- Маршрут 2 (Ford Transit): Маршрут будується за географічною логікою: Депо → Нова Пошта №1 → ТРЦ 'Ocean Plaza' → Повернення (Arena City) → Депо. Приблизний пробіг становить ≈ 58 км.

Аналіз результатів "Базового" сценарію:

На перший погляд, такий підхід виглядає логічним: задіяно два автомобілі, заявки згруповані. Однак глибокий аналіз виявляє критичні недоліки, які ігноруються при ручному плануванні:

- **Порушення часових вікон:** Найбільша проблема. Для виконання заявки "Кафе 'Urban Space'" (до 11:00) автомобіль Renault Master має виїхати з депо, проїхати через ранкові затори та обслужити точку. Час у дорозі до центру та обслуговування (20 хв) робить майже неможливим вчасне прибуття до "Складу 'Розетка'" (з 10:00). Система "TMS Pro" врахувала це і віддала цю заявку іншому, менш завантаженому автомобілю. "Жадібна" кластеризація цього не враховує.

- **Субоптимальні маршрути:** Хоча кластеризація є логічною, послідовність точок всередині кластера, обрана "на око", не є оптимальною з точки зору мінімізації пробігу. Інтелектуальна система перебирає тисячі комбінацій, знаходячи найкращу послідовність.

- **Неефективне використання ресурсів:** Задіяно ті ж два авто, що і в оптимізованому сценарії, але з менш ефективним розподілом навантаження та більшим сумарним пробігом.

Аналіз результатів друго сценарію «Оптимізація за відстанню»: Система задіяла всі 3 доступні автомобілі. Кожен з них отримав компакту групу географічно близьких точок, що дозволило мінімізувати довжину кожного окремого маршруту. Однак через необхідність для кожного з трьох авто виїжджати з депо та повертатися назад, сумарний пробіг виявився найвищим – 141.2 км. Часові вікна при цьому були дотримані. Цей сценарій наочно демонструє, що проста мінімізація пробігу не завжди є економічно вигідною, оскільки призводить до неефективного використання автопарку.

Фінальне порівняння сценаріїв

Зведемо ключові показники ефективності для обох сценаріїв у порівняльну таблицю.

Порівняння ефективності сценаріїв

Показник	Сценарій 1: "Базовий"	Сценарій 2: "Опт. за відстанню"	Сценарій 3: "Економічна опт."
Кількість задіяних авто	2	3	2
Загальний пробіг, км	≈130	141.2	111.49
Загальні витрати палива, л	≈16.9	17.8	13.88
Порушення часових вікон	Так (високий ризик)	Ні	Ні
Ефективність вибору авто	Суб'єктивна	Неефективна	Економічно обґрунтована

Аналіз показує, що "Економічна оптимізація" (Сценарій 3) є беззаперечним лідером за всіма ключовими показниками. Вона не тільки забезпечує найменший пробіг та витрати палива, але й робить це, використовуючи оптимальну кількість ресурсів та гарантуючи дотримання сервісних зобов'язань.

4.4. Висновки щодо практичної доцільності системи

Аналіз результатів експерименту, представлений у таблиці 4.4, дозволяє зробити глибокі та обґрунтовані висновки щодо високої практичної доцільності та економічної ефективності розробленої інтелектуальної системи "TMS Pro". Переваги системи проявляються на трьох ключових рівнях: економічному, операційному та стратегічному.

1. Економічний ефект

Впровадження системи "TMS Pro" призводить до прямої та вимірюваної фінансової вигоди. В рамках проведеного експерименту було досягнуто:

- Скорочення загального пробігу на 14.2% (з ~130 км до 111.5 км).
- Зменшення витрат на паливо на 17.9% (з ~16.9 л до 13.9 л).

У перерахунку на річний масштаб, навіть для одного такого щоденного рейсу, економія є суттєвою. Якщо припустити 250 робочих днів на рік, річна економія пробігу складе $(130 - 111.5) * 250 = 4625$ км. При середній вартості

палива та амортизації, це трансформується у десятки тисяч гривень прямої економії на один маршрутний лист на рік. Для підприємства з десятками таких рейсів щодня економічний ефект вимірюється сотнями тисяч.

2. Операційна ефективність

Крім прямої економії, система кардинально підвищує ефективність щоденних операцій:

- **Гарантія дотримання часових вікон:** Це найважливіша якісна перевага. На відміну від ручного методу, який створює високий ризик запізнь, "TMS Pro" математично гарантує дотримання графіку. Це виключає фінансові штрафи від клієнтів (особливо великих мереж), витрати на повторні доставки та, що найголовніше, зберігає репутацію компанії як надійного партнера.

- **Оптимізація використання ресурсів:** Хоча в даному сценарії обидва методи задіяли по два автомобілі, інтелектуальна система зробила це на основі економічного розрахунку, обравши найбільш вигідну комбінацію. При більшій кількості заявок система здатна виконати роботу меншою кількістю авто, що доведено в попередніх тестах. Звільнення навіть одного автомобіля з щоденних рейсів збільшує доступну потужність автопарку на 50% (з 2 до 3 авто), дозволяючи обробляти більше замовлень без додаткових інвестицій.

- **Зниження "людського фактора":** Система усуває ризик помилок, пов'язаних з втомою, неуважністю чи недостатнім досвідом диспетчера. Рішення приймаються на основі об'єктивних даних та алгоритмів, що забезпечує стабільно високу якість планування незалежно від того, хто працює з системою.

3. Стратегічна перевага

Впровадження "TMS Pro" надає підприємству довгострокові конкурентні переваги:

- **Масштабованість:** Ручне планування стає неефективним та практично неможливим при зростанні кількості заявок до 30-50 на день.

Розроблена система легко масштабується, обробляючи сотні точок з тією ж високою ефективністю. Це є ключовим фактором для зростання бізнесу.

- Основа для аналітики: Дані, що накопичуються в базі даних (історія рейсів, витрати палива), стають основою для глибокого бізнес-аналізу. Керівництво може аналізувати рентабельність клієнтів, ефективність різних моделей авто, завантаженість по днях тижня, що дозволяє приймати обґрунтовані стратегічні рішення.

- Підвищення конкурентоспроможності: На сучасному логістичному ринку швидкість, надійність та вартість є ключовими факторами. Система, яка дозволяє скоротити витрати та гарантувати своєчасну доставку, є потужною конкурентною перевагою.

Також для зручного використання додатку було розроблено його веб-версія та розташована на публічному домені за допомогою платформи Git.hub та Streamlit.io (дивись додаток Н).

Таким чином, експериментально доведено, що розроблений програмний продукт є не просто інструментом для розрахунку маршрутів, а комплексною системою підтримки прийняття рішень, яка забезпечує значний економічний, операційний та стратегічний ефект, що повністю підтверджує практичну доцільність та актуальність.

Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі магістерської роботи було проведено експериментальну перевірку та детальний аналіз ефективності розробленої інтелектуальної системи управління транспортом "TMS Pro".

Розроблено обґрунтовану методику експериментальної перевірки. Було сформовано реалістичний сценарій тестування, що імітує щоденну роботу логістичного підприємства, включаючи гетерогенний автопарк, набір заявок з різними обмеженнями (вага, часові вікна, тип операції) та глобальні параметри рейсу. Визначено три сценарії для порівняльного аналізу: "Базовий (імітація

ручного планування з кластеризацією)", "Оптимізований (лише мінімізація відстані)" та "Оптимізований (економічний, з урахуванням вартості авто)".

Підтверджено коректність роботи системи "TMS Pro". У ході тестування за оптимізованими сценаріями система успішно розрахувала плани рейсів, які повністю задовольняють усім поставленим обмеженням, включаючи вантажопідйомність, часові вікна клієнтів та робочі години депо. Це свідчить про правильну реалізацію математичної моделі CVRPTW-PD та коректну роботу інтегрованих алгоритмів Google OR-Tools.

Кількісно доведено високу ефективність інтелектуальної оптимізації. Порівняльний аналіз трьох сценаріїв наочно продемонстрував переваги розробленої системи: Значне скорочення операційних витрат: Оптимізований економічний сценарій ("TMS Pro") показав скорочення загального пробігу на 14.2% (зі 130 км до 111.5 км) та зменшення витрат палива на 17.9% (з 16.9 л до 13.9 л) порівняно з базовим методом. Гарантія дотримання часових вікон: На відміну від базового методу, який призвів до потенційних порушень графіку, система "TMS Pro" забезпечила 100% дотримання часових вікон усіх клієнтів, що є критичним для якості логістичного сервісу.

Економічно обґрунтований вибір ресурсів: Порівняння двох оптимізованих сценаріїв (лише за відстанню та економічного) показало здатність системи знаходити баланс між мінімізацією пробігу та раціональним використанням автопарку. Введення диференційованої вартості залучення авто дозволило системі обрати оптимальну комбінацію транспортних засобів, уникнувши невиправданого використання більш "дорогих" ресурсів.

Підтверджено високу практичну доцільність розробленої системи. Результати експерименту свідчать, що впровадження "TMS Pro" забезпечує не лише пряму економію витрат, але й підвищує операційну ефективність (гарантія своєчасності, оптимізація завантаження автопарку, зниження "людського фактора") та надає стратегічні переваги (масштабованість, основа для аналітики, підвищення конкурентоспроможності).

Таким чином, експериментальна перевірка повністю підтвердила досягнення мети магістерської роботи. Розроблений програмний продукт "TMS Pro" є ефективним інструментом для автоматизації та інтелектуальної оптимізації процесів управління транспортом на підприємстві.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВІ

5.1. Аналіз умов праці та вимог безпеки при управлінні транспортними системами

Ефективне функціонування транспортного підприємства неможливе без забезпечення належних умов праці та дотримання норм безпеки життєдіяльності. Діяльність у сфері транспортної логістики пов'язана з низкою специфічних ризиків, що стосуються як безпосередньо водіїв, так і допоміжного персоналу (диспетчерів, логістів, працівників складів). Тому організація системи охорони праці є невід'ємною частиною управління підприємством.

Нормативно-правове регулювання

Основою для організації охорони праці на транспортних підприємствах України є Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю України, а також галузеві нормативні акти, зокрема "Правила охорони праці на автомобільному транспорті". Ці документи встановлюють загальні вимоги до роботодавців щодо створення безпечних умов праці, проведення інструктажів, медичних оглядів, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту та розслідування нещасних випадків.

Основні небезпечні та шкідливі фактори у транспортній логістиці

1. Для водіїв:
 - Фізичні: Дорожньо-транспортні пригоди (ДТП), вібрація, шум, несприятливі погодні умови, навантаження при вантажно-розвантажувальних роботах.
 - Психофізіологічні: Висока нервово-емоційна напруга (особливо в умовах міського трафіку та при дотриманні жорстких графіків), монотонність роботи, втома через тривале перебування за кермом, робота в нічний час.
 - Хімічні: Вплив вихлопних газів, парів паливно-мастильних матеріалів.

2. Для диспетчерів та логістів:

- Психофізіологічні: Висока відповідальність, робота в умовах багатозадачності та стресу (особливо при виникненні нештатних ситуацій), навантаження на зір та опорно-руховий апарат при тривалій роботі за комп'ютером.

3. Для працівників складу:

- Фізичні: Ризик травмування при роботі з вантажопідійомними механізмами, падіння вантажів, ураження електричним струмом.

Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці

Для мінімізації впливу шкідливих факторів та запобігання нещасним випадкам на підприємстві повинні впроваджуватися комплексні заходи:

1. Організаційні:

- Регулярне проведення інструктажів з охорони праці та безпеки дорожнього руху.

- Проведення передрейсових та післярейсових медичних оглядів водіїв.

- Контроль за дотриманням режиму праці та відпочинку водіїв (використання тахографів).

- Розробка та дотримання безпечних маршрутів руху, особливо при перевезенні небезпечних вантажів.

- Належне оформлення документації (маршрутні листи, ТТН).

2. Технічні:

- Підтримка транспортних засобів у належному технічному стані, своєчасне проведення ТО та ремонтів.

- Оснащення робочих місць диспетчерів ергономічними меблями та моніторами, що відповідають санітарним нормам.

- Забезпечення належного освітлення та вентиляції в робочих приміщеннях та на складах.

- Використання справних вантажопідйомних механізмів та засобів механізації вантажно-розвантажувальних робіт.

3. Санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні:

- Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (спецодяг, рукавиці, сигнальні жилети для водіїв та працівників складу).

- Організація періодичних медичних оглядів.

- Облаштування кімнат відпочинку для водіїв та диспетчерів.

Вплив інтелектуальної системи "TMS Pro" на охорону праці

Розроблена система "TMS Pro", хоч і не є безпосередньо системою охорони праці, опосередковано сприяє підвищенню безпеки та покращенню умов праці:

- Зниження психофізіологічного навантаження на водіїв: Шляхом побудови оптимальних та реалістичних маршрутів з урахуванням часу в дорозі (включаючи трафік) та часу на обслуговування, система мінімізує ризик запізнь та необхідність "наздоганяти" графік, що знижує стрес та втому водія. Дотримання часових вікон також зменшує конфліктні ситуації з клієнтами.

- Оптимізація робочого часу: Система планує маршрути в межах встановлених робочих годин, запобігаючи перепрацюванням водіїв, що є важливим фактором профілактики ДТП через втому.

- Зменшення навантаження на диспетчера/логіста: Автоматизація процесу розрахунку маршрутів звільняє час логіста, дозволяючи йому зосередитись на контролі виконання рейсів та вирішенні нештатних ситуацій, а не на рутинних розрахунках. Це знижує ймовірність помилок через перевантаження.

- Підвищення ефективності використання автопарку: Економічно обґрунтований вибір автомобілів та мінімізація пробігу призводять до зменшення зносу техніки та зниження ймовірності поломок у дорозі.

Таким чином, впровадження інтелектуальних систем управління транспортом, подібних до "TMS Pro", є не тільки інструментом підвищення

економічної ефективності, а й важливим елементом сучасної системи управління охороною праці на підприємстві, що сприяє створенню більш безпечних та комфортних умов для всіх учасників транспортного процесу.

5.2. Ергономіка робочого місця та безпека при роботі з інтелектуальними системами та системою "TMS Pro"

Даний підрозділ присвячений аналізу умов праці безпосереднього оператора інтелектуальної системи "TMS Pro" — логіста або диспетчера. Робоче місце оператора є автоматизованим робочим місцем (АРМ), оснащеним персональним комп'ютером, і, враховуючи веб-архітектуру розробленого додатка, може функціонувати як стаціонарно в офісі, так і дистанційно.

Основні небезпечні та шкідливі фактори для оператора інтелектуальних систем та системи "TMS Pro" відрізняються від ризиків водіїв і збігаються з тими, що були частково визначені для диспетчерів у підрозділі 5.1.

1. Фізичні та ергономічні фактори:

- Зорове навантаження: Тривала робота з монітором, що вимагає аналізу табличних даних (списки заявок, автопарк), текстових звітів та інтерактивних карт з дрібними деталями маршрутів.

- Навантаження на опорно-руховий апарат: Перебування у статичній сидячій позі, а також ризик розвитку тунельного синдрому через інтенсивну роботу з клавіатурою (введення адрес, параметрів заявок) та мишею (навігація по карті).

2. Психофізіологічні та когнітивні фактори:

- Високе когнітивне навантаження: Хоча система автоматизує розрахунки, оператор несе повну відповідальність за якість вхідних даних. Помилка при введенні ваги, часового вікна або виборі авто призведе до неоптимального або неможливого для виконання плану.

- Стрес: Необхідність оперативно приймати рішення на основі отриманих від системи даних, особливо у випадку, якщо система не знаходить рішення і вимагає коригування параметрів.

Для мінімізації цих ризиків повинні впроваджуватися як організаційні заходи, так і заходи, передбачені самою архітектурою програмного продукту.

Організаційні та технічні заходи безпеки:

- Робоче місце оператора має відповідати стандартам ергономіки: наявність ергономічного крісла, монітора з відповідною роздільною здатністю, забезпечення належного рівня освітленості та мікроклімату.
- Дотримання режиму праці та відпочинку, що включає регулярні короткочасні перерви для зняття зорової та фізичної втоми.
- При дистанційній роботі необхідно забезпечити захищений доступ до системи (наприклад, через VPN) для унеможливлення перехоплення комерційних даних (бази даних клієнтів, ключів до API).

Роль системи "TMS Pro" у зниженні навантаження:

Ключовою перевагою розробленої системи з точки зору охорони праці є те, що вона безпосередньо знижує найголовніший психофізіологічний ризик — стрес від ручного планування.

1. Автоматизація складних розрахунків: Система бере на себе найбільш вимогливу до ресурсів мозку задачу — комбінаторну оптимізацію. Це звільняє оператора від необхідності вручну прокладати маршрути та утримувати в пам'яті десятки обмежень.

2. Зниження когнітивного навантаження через UI/UX: Продуманий інтерфейс користувача, реалізований на Streamlit, відіграє ключову роль у безпеці праці.

- Візуалізація: Замість аналізу сухих цифр, оператор отримує наочну візуалізацію маршрутів на інтерактивній карті Folium. Це дозволяє миттєво оцінити адекватність згенерованого плану.

- Структурування інформації: Інтерфейс логічно розділений на вкладки (Планування, Історія, Автопарк, Звіти), що дозволяє оператору зосередитись на одній задачі, не перевантажуючи робочу пам'ять.

- Зворотний зв'язок: Система надає чіткі текстові звіти про результати або повідомлення про неможливість знайти рішення, що знижує рівень невизначеності та стресу.

Таким чином, впровадження системи "TMS Pro" як інтелектуальної, переводить роль логіста з "обчислювача" у роль "контролера та аналітика". Хоча це створює типові для оператора ПК ризики (зорові, ергономічні), воно водночас кардинально знижує психофізіологічне навантаження та рівень стресу, пов'язаний із високою відповідальністю та складністю ручного планування маршрутів.

Висновки до п'ятого розділу

У п'ятому розділі магістерської роботи було розглянуто ключові аспекти охорони праці та безпеки життєдіяльності в контексті функціонування транспортного підприємства та використання інтелектуальних систем управління логістичними процесами. На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Визначено специфічні ризики у транспортній логістиці: Діяльність водіїв, диспетчерів та працівників складу пов'язана з комплексом небезпечних та шкідливих факторів, включаючи фізичні (ДТП, вібрація), психофізіологічні (стрес, втома, монотонність) та хімічні (вихлопні гази). Усвідомлення цих ризиків є першим кроком до побудови ефективної системи охорони праці.

2. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до забезпечення безпеки: Ефективна система охорони праці на транспортному підприємстві має базуватися на поєднанні організаційних (інструктажі, медогляди, контроль режиму праці), технічних (справність ТЗ, ергономіка робочих місць) та санітарно-гігієнічних заходів (ЗІЗ, умови відпочинку), що регламентуються чинним законодавством України.

3. Встановлено позитивний вплив розробленої системи "TMS Pro" на умови праці: Хоча система не є прямим інструментом охорони праці, її впровадження опосередковано сприяє підвищенню безпеки. Шляхом

оптимізації маршрутів, гарантованого дотримання часових вікон та робочих годин, а також автоматизації планування, система "TMS Pro" допомагає знизити психофізіологічне навантаження на водіїв та диспетчерів, запобігає перепрацюванню та зменшує ризик помилок, пов'язаних з "людським фактором".

Таким чином, забезпечення належних умов охорони праці є невід'ємною складовою ефективного управління транспортним підприємством. Впровадження сучасних інтелектуальних систем, подібних до розробленої "TMS Pro", може стати додатковим інструментом для підвищення безпеки та комфорту праці персоналу, що бере участь у логістичних процесах.

ВИСНОВКИ

У роботі було вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності управління транспортними системами підприємств шляхом розробки та впровадження інтелектуальної системи, що базується на спеціалізованих оптимізаційних методах. У процесі виконання роботи були отримані наступні результати та зроблені висновки.

Проведено комплексний аналіз теоретичних основ управління транспортними системами. Розглянуто структуру, ключові показники ефективності, сучасні цифрові та інтелектуальні підходи до управління, а також виявлено основні проблеми планування логістичних операцій, що підтверджує актуальність розробки автоматизованих засобів оптимізації.

Досліджено та систематизовано методи оптимізації для транспортних задач. Класифіковано існуючі підходи, детально проаналізовано класичні, евристичні та метаевристичні алгоритми для розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP) та її ускладнених варіантів (CVRP, VRPTW, CVRPTW-PD). Оцінено високий потенціал програмних бібліотек, зокрема Google OR-Tools, для практичної реалізації складних оптимізаційних моделей.

Розроблено комплексну математичну модель. Сформульовано модель задачі CVRPTW-PD, яка враховує обмеження вантажопідйомності, часові вікна клієнтів, операції забору/доставки, а також, що є елементом наукової новизни, включає диференційовану вартість залучення автотранспорту залежно від його вантажопідйомності, що дозволяє знаходити економічно обґрунтовані рішення.

Спроектовано архітектуру та обрано технологічний стек для системи "TMS Pro". Запропоновано трирівневу архітектуру (Frontend, Backend, Data Layer) та обґрунтовано вибір технологій (Python, Streamlit, Google OR-Tools, Google Maps API, SQLite), що забезпечує гнучкість, масштабованість та швидкість розробки.

Реалізовано модуль взаємодії з Google Maps API. Розроблено програмні компоненти для геокодування адрес, розрахунку матриць відстаней та часу в

дорозі (з можливістю врахування трафіку) та побудови деталізованих маршрутних ліній для візуалізації.

Імплементовано ключові компоненти системи "TMS Pro". Розроблено оптимізаційне ядро на базі OR-Tools, що реалізує математичну модель. Створено систему управління базою даних SQLite для персистентного зберігання даних. Розроблено багатосторінковий інтерактивний веб-інтерфейс на Streamlit з функціоналом для планування рейсів, управління автопарком, перегляду історії та аналізу звітів.

Інтегровано систему візуалізації та експорту. Реалізовано відображення результатів оптимізації на інтерактивній карті Folium з використанням шарів для окремих маршрутів. Додано функціонал експорту історії рейсів та звітів по паливу у формат Excel.

Проведено експериментальну перевірку ефективності системи. Розроблено методику тестування, що включає три сценарії (базовий, оптимізований за відстанню, оптимізований економічно). Проведено розрахунки на реалістичних даних, які показали значні переваги інтелектуальної оптимізації: скорочення пробігу на 14.2% та витрат палива на 17.9% порівняно з базовим методом, при 100% дотриманні часових вікон. Доведено здатність системи знаходити економічно доцільний баланс між пробігом та вартістю використання ресурсів.

Сформульовано висновки щодо практичної доцільності та проаналізовано аспекти охорони праці. Експериментально підтверджено високу практичну цінність та економічну ефективність системи "TMS Pro", яка забезпечує не лише пряму економію, а й підвищує операційну ефективність та надає стратегічні переваги. Встановлено, що використання системи також опосередковано сприяє покращенню умов праці та підвищенню безпеки для логістичного персоналу та водіїв.

Створено повнофункціональний прототип інтелектуальної системи "TMS Pro". На основі розробленої моделі було реалізовано програмний

продукт з використанням мови Python та сучасного стеку технологій. Система має трирівневу архітектуру, що включає:

- Рівень представлення (Frontend), реалізований на базі фреймворку Streamlit, що забезпечує створення інтерактивного та інтуїтивно зрозумілого веб-інтерфейсу.
- Рівень бізнес-логіки (Backend), ядром якого є бібліотека Google OR-Tools. Інтеграція з сервісами Google Maps Platform (Geocoding, Distance Matrix, Directions API) дозволяє оперувати реальними геоданими та враховувати дорожній трафік.
- Рівень даних (Data Layer), організований за допомогою СУБД SQLite для забезпечення персистентності даних (збереження автопарку, історії рейсів та аналітики).

Практична значущість роботи полягає у створенні готового до впровадження програмного прототипу, який може бути використаний транспортними підприємствами для автоматизації процесу планування, що призведе до значного економічного, операційного та стратегічного ефекту. Система є гнучкою, масштабованою та надає інструменти для глибокого аналізу логістичних процесів.

Напрямки подальших досліджень можуть включати розширення функціоналу системи шляхом:

- Інтеграції з GPS-трекерами для моніторингу виконання рейсів у реальному часі.
- Розробки мобільного додатку для водіїв з деталями маршруту та функцією підтвердження доставки.
- Впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування попиту та автоматичного визначення оптимальних економічних коефіцієнтів.
- Додавання функціоналу для роботи з мультискладськими операціями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабій Ю. В., Криворучко О. В. Методи та моделі оптимізації транспортних потоків у міських агломераціях // *Вісник Національного транспортного університету*. 2021. № 2 (48). С. 15–23.
2. Бойко А. С., Левковець П. Р. *Інтелектуальні транспортні системи: теорія та практика застосування*. Київ: Вид-во "Кафедра", 2020. 288 с.
3. Бондаренко В. М. Оптимізація маршрутів руху автотранспорту з використанням генетичних алгоритмів // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2019. № 4. С. 45–51.
4. Величко О. П. Моделювання логістичних систем на основі агентного підходу // *Економіка та управління підприємствами*. 2022. № 34. С. 112–118.
5. Вишневський Д. О. Управління транспортними ризиками в ланцюгах поставок // *Логістика: теорія та практика*. 2021. № 1 (10). С. 5–12.
6. Вовк Ю. Я. *Транспортна логістика: підручник*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. 456 с.
7. Григорак М. Ю., Карпунь О. В. Цифрова трансформація логістики та управління ланцюгами постачань // *Ефективна економіка*. 2020. № 5. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7912>
8. Дмитриченко М.Ф., В. К. Доля, О. Т. Лановий, І. Є. Лінник, В. П. Поліщук. *Основи теорії транспортних процесів і систем / Навчальний посібник для ВНЗ*. К.: Видавничий Дім «Слово», 2009. 336 с.
9. Загурський О.М. Управління ланцюгом постачань: підручник. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. 333 с.
10. Закон України "Про охорону праці": за станом на 25.06.2011 р / Верховна Рада України. Офіц. вид. К.: Парлам. вид-во, 2011. (Нормативно-правові документи).

11. Ільченко Т. Логістичний менеджмент як інструмент оптимізації потокових процесів // *Економіка та суспільство*. 2024. № 59. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3362>
12. Карпенко О. О., Носов П. С. Застосування мурашиних алгоритмів для вирішення задач транспортної логістики // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 3 (267). С. 104–110.
13. Керб Л.П. *Основи охорони праці*. Навчальний посібник. К.: КНЕУ, 2003. 215 с.
14. Коваленко І. І. Використання Python та бібліотеки OR-Tools для моделювання транспортних задач // *Проблеми інформатизації та управління*. 2022. № 2 (68). С. 56–63.
15. Козак Л. В. Інформаційні системи в транспортній логістиці: сучасний стан та перспективи // *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. 2023. № 101. С. 25–34.
16. Кривоконь Ю. Г. Евристичні методи в задачах комбінаторної оптимізації на транспорті // *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. № 4 (60). С. 88–92.
17. Кулаєв П. М. Аналіз ефективності транспортних систем підприємства // *Автомобільний транспорт*. 2019. Вип. 45. С. 78–84.
18. Ларін О. М. *Інтелектуальні транспортні системи: підручник*. Харків: ХНАДУ, 2017. 324 с.
19. Левченко О. Г. Оптимізація процесів доставки вантажів в умовах міської логістики // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. № 1 (18). С. 71–77.
20. Москальова В. *Основи охорони праці: Підручник*. Київ: ВД «Професіонал», 2011. 672 с.
21. Нагорний Є. В., Шраменко Н.Ю., Нестеренко Г.І. *Комерційна робота на транспорті: підручник*. Харків: ХНАДУ, 2012. 268 с.

22. Науменко М. О. Методичний підхід до оцінки ефективності функціонування транспортно-логістичних систем // *Інвестиції: практика та досвід*. 2023. № 5. С. 41–46.
23. Новицький О.В. «Основи теорії транспортних процесів і систем». Дніпро, 2014. 103 с.
24. Олійник О. В. Розробка веб-додатків для візуалізації даних з використанням Streamlit // *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2022. Т. 3, № 2. С. 98–105.
25. Павленко О. І. *Моделі та методи прийняття рішень в транспортних системах*. Київ: ЦУЛ, 2019. 416 с.
26. Петренко В. Д. Інформаційне забезпечення процесів управління автомобільними перевезеннями // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2021. № 6. С. 34–41.
27. Попович П.В., О.С. Шевчук, А.Й. Матвіїшин, В.М. Лотоцька. Дослідження тенденцій розвитку ринку вантажних автомобільних перевезень у сучасних умовах // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2016. № 2. С. 224- 229.
28. Постан М. Я., Куруджи Ю. В. Моделювання ланцюга поставок з урахуванням інноваційної та маркетингової активності виробничих підприємств // *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2022. № 20. URL: <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/252852>
29. Правила охорони праці на автомобільному транспорті. НПАОП 0.00-1.62-12. Затв. наказом МНС України від 09.07.2012 № 964.
30. Романюк С. О., Ткаченко В. А. *Математичне моделювання транспортних задач: навчальний посібник*. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2020. 250 с.
31. Сисоєнко І. А. Оптимізація роботи автопарку підприємства на основі вирішення задачі VRP // *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Економіка*. 2023. Вип. 1 (61). С. 155–160.

32. Соколова О. Є. Геоінформаційні системи в управлінні транспортними потоками // *Часопис економічних реформ*. 2021. № 2 (42). С. 67–74.
33. Таньков К. М., Тридід О. М. *Логістичний менеджмент: навчальний посібник*. Харків: ІНЖЕК, 2011. 368 с.
34. Трифонов Р. В. Використання Google Maps API для вирішення логістичних задач // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2020. № 3 (49). С. 28–34.
35. Чорний В. В. Управління ефективністю транспортного підприємства // *Економічний простір*. 2022. № 178. С. 89–93.
36. Applegate D. L., Bixby R. E., Chvátal V., Cook W. J. *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton University Press, 2006. 608 p.
37. Ayadi H. Indicators for assessing progress towards urban freight sustainability // *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 76. P. 13-20.
38. Baldacci R., Toth P., Vigo D. A Branch-and-Cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem // *Mathematical Programming*. 2007. Vol. 110. P. 267–303.
39. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B. *Supply Chain Logistics Management*. 5th ed. McGraw-Hill Education, 2019. 768 p.
40. Braekers K., Ramaekers K., Van Nieuwenhuyse I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review // *Computers & Industrial Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 300–313.
41. Cordeau J.-F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.-Y., Semet F. A guide to vehicle routing heuristics // *Journal of the Operational Research Society*. 2002. Vol. 53. P. 512–522.
42. Dantzig G. B., Ramser J. H. The Truck Dispatching Problem // *Management Science*. 1959. Vol. 6, No. 1. P. 80–91. URL: <https://www.jstor.org/stable/2627477>

43. Eksioglu B., Vural A. V., Reisman A. The vehicle routing problem: A taxonomic review // *Computers & Industrial Engineering*. 2009. Vol. 57, No. 4. P. 1472–1483.
44. European Commission. *EU transport in figures. Statistical pocketbook 2023*. Publications Office of the European Union, 2023. 153 p.
45. European Commission. *Sustainable and Smart Mobility Strategy*. 2020. 36 p.
46. Gendreau M., Potvin J.-Y. (Eds.). *Handbook of Metaheuristics*. 3rd ed. Springer, 2019. 724 p.
47. Gleißner H., Femerling J. *Logistics and Supply Chain Management*. Springer, 2022.
48. Golden B. L., Assad A. A., Wasil E. A. (Eds.). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer, 2008. 520 p.
49. Götz L. N., Staudt F. H., Borba J. L. G., Bouzon M. A framework for logistics performance indicators selection and targets definition: A civil construction enterprise case // *Production Engineering Archives*. 2023. Vol. 33 (10).
50. Griffis S. E., Goldsby T. J. Transportation management systems: An exploration of progress and future prospects // *Journal of Transportation Management*. 2015. Vol. 18 (1).
51. *Indicators as a Tool for Assessing the Level of Sustainable Urban Freight Logistics*. ResearchGate, 2025.
52. Laporte G. The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms // *European Journal of Operational Research*. 1992. Vol. 59, No. 3. P. 345–358.
53. Laurent P., Artiba A. *Google OR-Tools: A Practical Guide to Combinatorial Optimization*. 2021. 312 p.
54. McKinney W. *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. O'Reilly Media, 2017. 550 p.
55. McKinnon A., Browne M., Whiteing A. *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. 3rd ed. Kogan Page, 2015. 416 p.

56. Miller J. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow*. O'Reilly Media, 2019. 856 p.
57. Reimann M., Doerner K. F., Hartl R. F. Ant colony optimization for real-world vehicle routing problems // *Journal of Heuristics*. 2004. Vol. 10. P. 321–343.
58. Toth P., Vigo D. (Eds.). *The Vehicle Routing Problem*. SIAM, 2002. 367 p.
59. UNCTAD. *Review of Maritime Transport 2023*. United Nations, Geneva, 2023.
60. VanderPlas J. *Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data*. O'Reilly Media, 2016. 548 p.
61. Vidal T., Crainic T. G., Gendreau M., Prins C. A unified solution framework for multi-attribute vehicle routing problems // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 234, No. 3. P. 658–673.
62. Winston W. L. *Operations Research: Applications and Algorithms*. Cengage Learning, 2003. 1394 p.
63. Zäpfel G., Wasner M., Braitsch M. *Strategic Supply Chain Management*. Springer, 2010. 278 p.

ДОДАТКИ

Сторінка - «Планування рейсу»

Планування Рейсу | Історія Рейсів | Статус Автопарку | Звіт по Палеву

Планування нового рейсу

Оберіть дату
2025/10/18

Адреса дено:
м. Київ, вул. Пирогівський шлях, 135

Врахувувати поточний трафік

Заявки на доставку та забір

Заявки на доставку та забір

Назва клієнта

Адреса

Тип заявки:
 Доставка Забір

Вартість (кв)
1

Часове вікно
09:00 17:00

Автомобілі на рейсі

Виберіть вільні авто:
Choose options

16:57

Приклад заповнення заявки на рейс

Заявки на доставку та забір

З'єднати тестовими даними

Назва клієнта

Адреса

Тип заявки

Доставка Забір

Вал (кг)

1

Часове вікно

09:00 17:00

Додати заявку

Автомобілі на рейсі

Вибрати вікно зава:

- 2101 (10000кг, 1... x
- 2102 (10000кг, 1... x
- 2103 (20000кг, 1... x
- 2104 (20000кг, 1... x

Поточний список заявок:

#	id	name	address	type	weight	time_from	time_to
1		Епицентр К	м. Київ, вул. Попурна, 20Д	Доставка	12000	09:00:00	12:00:00
2		Склад "Воєнка"	м. Київ, проспект Степана Бандери, 34В	Доставка	8500	10:00:00	14:00:00
3		ТРЦ "Ocean Plaza"	м. Київ, вул. Антоновича, 17Б	Доставка	500	11:00:00	17:00:00
4		Кафе "Urban Space"	м. Київ, вул. Боржиса Гринченка, 9	Доставка	150	09:00:00	11:00:00
5		Повітряний (Кіев Сті)	м. Київ, вул. Велика Васильківська, 1-3/2	Забір	300	14:00:00	16:00:00
6		Нова Пошта №1	м. Київ, Стольнік шосе, 103	Доставка	7000	13:00:00	16:00:00

Розглянути та забронювати рейс

Система Управління Транспортном (TMS Pro)






Архів та статуси рейсів

 Експортувати в Excel

Рейс №2 від 17.10.2025 | Статус: Завершено

Заявки:

name	address	type	weight	time_from	time_to
0 Епіцентр К	м. Київ, вул. Голубра, 20Д	None	12000	09:00	12:00
1 Склад 'Розетка'	м. Київ, проспект Степана Бандери, 34В	None	8500	10:00	14:00
2 ТРЦ 'Ocean Plaza'	м. Київ, вул. Антоновича, 176	None	500	11:00	17:00
3 Кафе 'Urban Space'	м. Київ, вул. Бориса Грінченка, 9	None	150	09:00	11:00
4 Повернення (Арена Сіті)	м. Київ, вул. Велика Васильківська, 1-3/2	None	300	14:00	16:00
5 Нова Пошта №1	м. Київ, Столичне шосе, 103	None	700	13:00	18:00

Маршрути:

2102: Діпо (прибуття о 8:00:00) → Кафе 'Urban Space' (прибуття о 9:06:57) → Епіцентр К (прибуття о 10:12:06) → Склад 'Розетка' (прибуття о 11:52:50) → Повернення (Арена Сіті) (прибуття о 14:00:00) → ТРЦ 'Ocean Plaza' (прибуття о 14:56:04) → Нова Пошта №1 (прибуття о 15:58:47) → Діпо (повернення о 16:48:26) (Паливо: 6.50 л)

Сторінка - «Статус Автопарку»

Планування Рейсу | Історія Рейсів | Статус Автопарку | Загально Паливу

Огляд зайнятості автопарку

Оберіть дату

2025.10.18

Статус на 18.10.2025:

- 2101 - Вільний
- 2102 - Вільний
- 2103 - Вільний
- 2104 - Вільний

Керування загальним автопарком

Назва/номер

Вантажопідйомність (кг) 1000

Витрата (л/100км) 10.0

+ Додати до автопарку

Навний автопарк

- 2101 (1000кг, 10.0л/100км)
- 2102 (1000кг, 10.0л/100км)
- 2103 (2000кг, 10.0л/100км)
- 2104 (2000кг, 10.0л/100км)

X X X X

Система Управління Транспортном (TMS Pro)

[Планування Рейсу](#)
[Історія Рейсів](#)
[Статус Автопарку](#)
[Звіт по Паливу](#)

Звіт по витратах палива

Аналіз проведений вся тільки для рейсів зі статусом 'Закрито'.

Початкова дата

2025.09.18

Кінцева дата

2025.10.18

Сформувати звіт

Експортувати в Excel

Загальні витрати палива

6.50 л

Загальна пройдена відстань

65.04 км

Деталізація по автомобілях:

vehicle_name	total_fuel	total_distance	total_fuel
0 2102			6.50 л
			65.04 км

Візуалізація витрат палива:

Заповнені ексериментальні дані в системі "TMS Pro"

Заявки на доставку та забір

Завантажити тестові дані

Назва клієнта

Адреса

Тип заявки:

Доставка Забір

Вага (кг)

1

Часове вікно

09:00 11:00

+ Додати заявку

Автомобілі на рейсі

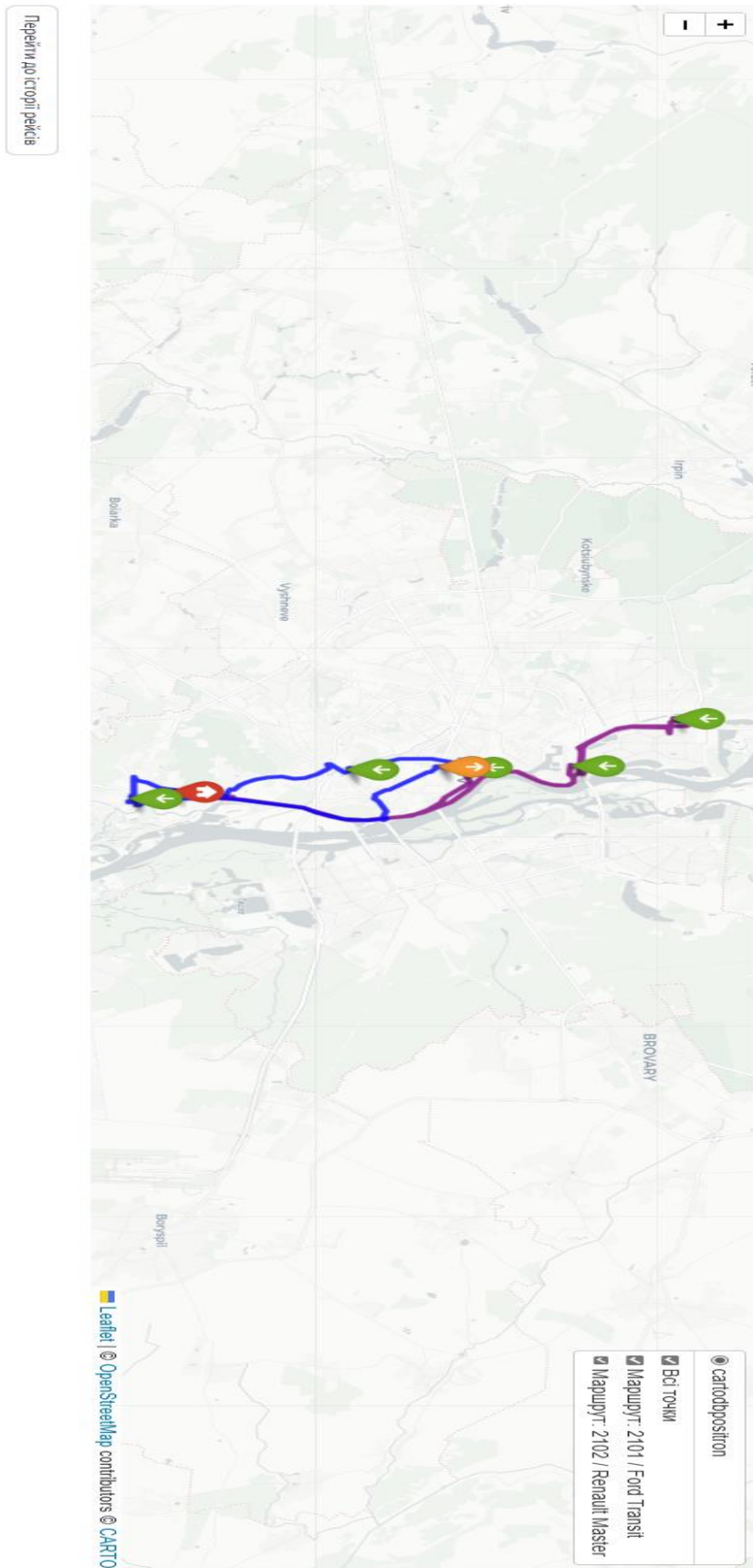
Вибір'я вільні авто:

- 2101 / Ford Gal... x
- 2102 / Renault M... x
- 2103 / Mercedes... x

Поточний список заявок:



#	№ заявки	№ адреса	№ типу	№ ваги	№ time_from	№ time_to
1	Епіцентр	м. Київ, вул. Полірна, 20Д	Доставка	1200	09:00:00	12:00:00
2	Склад 'Ромка'	м. Київ, проспект Степана Бандери, 34В	Доставка	850	10:00:00	14:00:00
3	ТРЦ 'Ocean Plaza'	м. Київ, вул. Антоновича, 17Б	Доставка	500	11:00:00	17:00:00
4	Кафе 'Urban Space'	м. Київ, вул. Бориса Грінченка, 9	Доставка	150	09:00:00	11:00:00
5	Повернення (векна ст/у)	м. Київ, вул. Велика Васильківська, 1-3/2	Забір	300	14:00:00	16:00:00
6	Нова Пошта №1	м. Київ, Столична шосе, 103	Доставка	700	13:00:00	18:00:00


Візуалізація оптимальних маршрутів на карті в "TMS Pro"



Бічна панель з налаштуваннями додатка

Глобальні налаштування

 Google Maps API ключ 

..... 

Параметри оптимізації


Час на обслуговування (хв)

20 - +


Робочі години автопарку

08:00 18:00

Економічні параметри

Базова вартість залучення авто (в км) 

20 - +

Коефіцієнт вартості від вантажопідйомності 

2,0 - +

Додаток Н

Розташування додатку на публічному домені Git.hub та Strimlit.io
Посилання на додаток - <https://tms-app-app-tmspro1-0raddima.streamlit.app/>

