

Факультет \_\_\_\_\_ Комп'ютерних наук \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Системотехніки \_\_\_\_\_

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий(магістерський) \_\_\_\_\_

Дослідження методів логістики в системі обліку вантажоперевезень  
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи ІТІМ-24-2

Калюжний О.Д.

(група, прізвище, ініціали)

Спеціальність 122 – Комп'ютерні науки

(код і назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне проектування

Керівник Доц. Хряпкін О.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Гребеннік І.В.

(прізвище, ініціали)

## ЗАЯВА

щодо самостійності виконання письмової роботи

Я, Калюжний Олександр Дмитрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

посада студент

кафедра Системотехніки


заявляю: моя письмова робота на тему Дослідження методів логістики в системі обліку вантажоперевезень  
(назва роботи)

Представлена у екзаменаційну комісію  
(спеціалізовану вчену раду, екзаменаційну комісію тощо)

Для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичені з друкованих та електронних джерел, а також із раніше виконаних дослідницьких робіт та захищених кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я Ознайомлений (а) з діючим положенням «Про протидію плагіату в ХНУРЕ», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

Дата 21.12.2025

Підпис 



5. Консультанти розділів роботи:

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
<i>Кваліфікаційна робота</i>	<i>Доц. Хряпкін О.В.</i>		<i>21.12.2025</i>

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

		Терміни	
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	13.10.2025	виконано
2	Аналіз предметної області туристичних рекомендацій	14.10.2025 – 16.10.2025	виконано
3	Аналіз існуючих систем та підходів	17.10.2025–22.10.2025	виконано
4	Постановка задачі та визначення вимог	23.10.2025 – 07.11.2025	виконано
5	Аналіз літератури та наукових джерел	08.11.2025 – 10.11.2025	виконано
6	Розробка математичної моделі та адаптивного коефіцієнта $\alpha$	12.11.2025	виконано
7	Проектування архітектури системи	13.11.2025	виконано
8	Реалізація серверної частини	14.11.2025 – 05.12.2025	виконано
9	Реалізація клієнтської частини	07.11.2025 – 08.12.2025	виконано
10	Інтеграція рекомендаційної моделі	14.11.2025 – 17.12.2025	виконано
11	Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів	17.11.2025–23.12.2025	виконано
12	Оформлення пояснювальної записки	23.10.2025 – 21.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 24 листопада 2025 р.

Здобувач



Калюжний О.Д.

Керівник роботи (проекту)

Доц. Хряпкін О.В.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи: 83 с., 7 табл., 11 рис., 1 додатків, 15 джерел інформації.

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, ЕЛЕКТРОННА КОМЕРЦІЯ, СТАНДАРТ IDEF0, БАЗА ДАНИХ, КОРИСТУВАЦЬКИЙ ІНТЕРФЕЙС, ОБЛІК ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ, МОДЕЛЬ ПОТОКІВ ДАНИХ

Об'єкт дослідження – процес організації та управління логістичними операціями у системі обліку вантажоперевезень.

Предмет дослідження – методи та алгоритми логістики, зокрема методи планування маршрутів, розподілу транспортних ресурсів і оптимізації вантажоперевезень, що застосовуються в системах обліку.

Мета роботи – дослідити та порівняти методи логістики в системі обліку вантажоперевезень з метою визначення найбільш ефективних підходів до оптимізації транспортних процесів, зниження витрат і підвищення якості логістичного сервісу.

Методи дослідження – системний аналіз предметної області вантажоперевезень, математичне моделювання логістичних процесів, застосування методів оптимізації та алгоритмів маршрутизації, порівняльний аналіз ефективності логістичних рішень на основі визначених показників.

Наукова новизна полягає у комплексному порівняльному дослідженні методів логістики в контексті систем обліку вантажоперевезень з урахуванням практично значущих критеріїв ефективності, таких як час доставки, витрати на перевезення, рівень завантаження транспортних засобів та стабільність виконання логістичних планів.

Explanatory note to the master's qualification work: 83 p., 7 tables, 11 figures, 1 appendices, 15 sources of information.

The object of the study is the process of organizing and managing logistics operations in the freight accounting system.

The subject of the study is logistics methods and algorithms, in particular methods of route planning, distribution of transport resources and optimization of freight transportation, used in accounting systems.

The purpose of the work is to study and compare logistics methods in the freight accounting system in order to determine the most effective approaches to optimizing transport processes, reducing costs and improving the quality of logistics services.

Research methods are a system analysis of the subject area of freight transportation, mathematical modeling of logistics processes, application of optimization methods and routing algorithms, comparative analysis of the effectiveness of logistics solutions based on certain indicators.

The scientific novelty lies in a comprehensive comparative study of logistics methods in the context of freight accounting systems, taking into account practically significant efficiency criteria, such as delivery time, transportation costs, vehicle loading level and stability of logistics plan implementation.

РЕФЕРАТ .....	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	9
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1 Аналіз предметної області вантажних перевезень та логістичних процесів .....	12
1.2 Класифікація логістичних задач у системах обліку вантажоперевезень	13
1.3 Методи логістики, що застосовуються в системах обліку вантажоперевезень .....	15
1.4 Висновки до розділу 1 .....	19
2.1 Постановка задачі дослідження методів логістики в системі обліку вантажоперевезень .....	21
2.2 Опис логістичних моделей та методів оптимізації .....	23
2.3 Формалізація моделей обліку вантажоперевезень .....	25
2.3.1 Модель транспортної задачі.....	25
2.3.2 Модель пошуку оптимального маршруту .....	26
2.3.3 Модель маршрутизації транспортних засобів.....	28
2.3.4 Модель розподілу транспортних ресурсів.....	29
2.3.5 Модель прогнозування параметрів доставки .....	30
2.3.6 Модель на основі бізнес-правил .....	31
2.3.7 Гібридні моделі.....	32
2.3.8 Порівняльний аналіз формалізованих логістичних моделей.....	33
2.4 Висновки до розділу 2 .....	35
3 ОПИС ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ.....	38
3.1 Архітектура інформаційної системи .....	38
3.2 Інформаційна модель системи .....	40
3.3 Модель потоків даних.....	42
3.4 Структура бази даних та її елементи.....	45
3.5 Проєкт користувацьких сценаріїв роботи системи.....	47

3.6 Механізм інтеграції логістичних методів у систему .....	49
3.7 Висновки до розділу 3 .....	51
4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ .....	53
4.1 Методика оцінювання логістичних рішень .....	53
4.2 Експериментальні результати або моделювання .....	54
4.3 Порівняльний аналіз ефективності логістичних моделей .....	63
4.4 Висновки до розділу 4 .....	66
ВИСНОВКИ.....	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	70
Додаток А.....	72

DFD (Data Flow Diagram) – діаграма потоків даних, що використовується для графічного відображення руху інформації в системі.

ER (Entity–Relationship) – модель «сутність–зв’язок», що використовується для опису логічної структури даних.

VRP (Vehicle Routing Problem) – задача маршрутизації транспортних засобів, спрямована на оптимізацію черговості відвідування пунктів доставки.

GPS (Global Positioning System) – глобальна система супутникового позиціонування.

API (Application Programming Interface) – програмний інтерфейс, який забезпечує взаємодію між компонентами системи.

SQL (Structured Query Language) – мова структурованих запитів для роботи з базами даних.

ТЗ – транспортний засіб.

ПЗ – програмне забезпечення.

БД – база даних.

ID – ідентифікатор у системі.

ООП – об’єктно-орієнтоване програмування (використовується при описі моделювання або структури системи).

МС – методи логістичної системи.

КМ – критерії моделювання, застосовані у розрахунках ефективності.

ЧВ– часові вікна, що визначають інтервали, у які має бути виконана доставка.

ПП – пункт призначення.

ПО – пункт відправлення.

МР– маршрут, отриманий на основі прогнозної моделі.

МН маршрут, сформований за допомогою алгоритмів пошуку шляху.

## ВСТУП

Транспортно-логістична сфера відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку економіки, оскільки саме вона відповідає за безперербійне переміщення вантажів між виробничими, складськими та збутовими ланками. Зростання обсягів перевезень, ускладнення логістичних ланцюгів і підвищення вимог до термінів та надійності доставки зумовлюють необхідність пошуку ефективних підходів до управління транспортними процесами. За таких умов логістика перестає бути допоміжною функцією та перетворюється на один із ключових факторів конкурентоспроможності підприємств.

У практиці вантажоперевезень значна частина рішень щодо організації маршрутів, використання транспортних засобів і планування рейсів досі ґрунтується на спрощених розрахунках або суб'єктивному досвіді відповідальних фахівців. Такий підхід часто не враховує складність сучасних транспортних систем, вплив зовнішніх чинників і змінність умов перевезення. Як наслідок, виникають додаткові витрати, нерівномірне завантаження автопарку, порушення графіків доставки та зниження ефективності логістичних операцій у цілому.

Використання систем обліку вантажоперевезень створює інформаційну основу для підвищення якості управління логістичними процесами. Ці системи забезпечують накопичення та обробку даних про перевезення, маршрути, ресурси та часові параметри, що відкриває можливості для впровадження сучасних методів логістики й оптимізації. Проте наявність інформаційної системи сама по собі не гарантує ефективності: вирішальне значення має вибір і застосування логістичних методів, які використовуються для аналізу даних і підтримки управлінських рішень.

У цьому контексті особливої актуальності набуває дослідження різних підходів до логістичного планування та управління перевезеннями, а також

оцінювання їх ефективності за практично значущими показниками. Аналіз<sup>11</sup> і порівняння методів логістики дозволяє визначити, які з них є найбільш доцільними для використання в системах обліку вантажоперевезень за різних умов функціонування транспортних компаній.

Таким чином, магістерська робота спрямована на поглиблене вивчення логістичних підходів у сфері вантажоперевезень з акцентом на їх застосування в системах обліку. Отримані результати можуть бути використані як теоретичне підґрунтя для подальших досліджень, а також як практична основа для вдосконалення логістичних рішень у діяльності транспортних підприємств.

### 1.1 Аналіз предметної області вантажних перевезень та логістичних процесів

Сфера вантажних перевезень є однією з ключових складових сучасної економіки, оскільки вона забезпечує переміщення товарів між підприємствами, складами, логістичними центрами та кінцевими споживачами. Ефективність транспортних операцій безпосередньо впливає на витрати компаній, терміни поставок, якість обслуговування клієнтів та стабільність бізнес-процесів. У зв'язку з цим зростає потреба у створенні автоматизованих інформаційних систем, які здатні не лише фіксувати фактичні дані, але й підтримувати процеси планування, оптимізації та контролю перевезень [1].

Предметна область вантажоперевезень охоплює комплекс взаємопов'язаних елементів: транспортні засоби, маршрути, замовлення, клієнтів, водіїв, види вантажів, часові обмеження, операційні витрати та логістичні правила. Кожен із цих компонентів має власні характеристики, які впливають на прийняття рішень та формування оптимальної логістичної схеми. Наприклад, вибір маршруту залежить не лише від географічної відстані [2], але й від стану автомобіля, завантаженості доріг, вагових обмежень, потреб вантажу в особливих умовах транспортування та графіку доставки.

Традиційні підходи до організації вантажоперевезень базувалися на ручному плануванні, досвіді диспетчера та стандартних маршрутах. Проте сучасні умови характеризуються високою мінливістю — значною кількістю замовлень, динамічними змінами дорожньої ситуації, необхідністю швидкого перепланування та жорсткими вимогами до часу доставки. Це зумовлює потребу у застосуванні математичних та алгоритмічних методів логістики, які дозволяють автоматизувати складні процеси та зменшити вплив людського фактора.

У предметній області логістики ключовими задачами є оптимізація розподілу вантажів, визначення найкоротших або найвигідніших маршрутів, планування графіків руху, прогнозування показників доставки, розподіл транспортних ресурсів між потоками та дотримання специфічних нормативів для окремих видів вантажів. Усі ці процеси вимагають застосування формальних моделей: транспортної задачі, методів пошуку маршруту, VRP-моделей, моделей прогнозування, задачі призначення та моделей на основі бізнес-правил.

Особливістю предметної області є те, що дані, які використовуються в системі обліку вантажоперевезень, мають різну природу — статичну (наприклад, характеристики транспортних засобів) та динамічну (статуси виконання доставки, зміна маршруту, оновлення замовлень). Тому інформаційні системи повинні забезпечувати не лише зберігання даних, але й їх оперативне оновлення, синхронізацію між учасниками логістичного процесу та можливість інтеграції з зовнішніми службами (навігаційні сервіси, системи моніторингу транспорту тощо).

Таким чином, предметна область вантажоперевезень характеризується складністю, багатофакторністю та потребою у застосуванні сучасних методів логістики. Вона є базою для подальшої побудови математичних моделей, оптимізаційних алгоритмів та інформаційних технологій, які забезпечують ефективне функціонування системи обліку вантажоперевезень.

## 1.2 Класифікація логістичних задач у системах обліку вантажоперевезень

Логістичні процеси, які супроводжують вантажні перевезення, охоплюють широкий спектр задач різної складності — від простих операційних дій до багатофакторних оптимізаційних моделей. Для побудови ефективної системи обліку вантажоперевезень важливо виділити основні типи задач, що виникають у транспортній діяльності, а також визначити методи їхнього розв'язання. Класифікація логістичних задач надає можливість систематизувати процеси, виділити ключові елементи предметної області та встановити логічні зв'язки між окремими етапами перевезення вантажів.

До основних груп логістичних задач, характерних для систем обліку вантажоперевезень, належать:

1) Задачі планування та формування маршрутів - ця група включає процеси визначення оптимального шляху між пунктами відправлення та доставки. У межах цього класу вирішуються задачі пошуку найкоротшого маршруту, визначення маршруту з урахуванням обмежень, а також адаптації маршруту у динамічних умовах (зміни дорожньої обстановки, ремонтні роботи, аварії). Для таких задач застосовуються графові моделі, алгоритми Дейкстри, A\*, методи динамічного програмування та інші підходи до оптимізації маршрутів.

2) Задачі розподілу вантажів між транспортними засобами - ця група включає оптимізацію розподілу обсягів вантажу між доступними ресурсами. Найпоширенішим прикладом є транспортна задача — класична математична модель, яка дозволяє мінімізувати вартість доставки при наявності декількох пунктів відправлення та призначення. Такі задачі забезпечують економічно вигідне використання транспортної мережі та визначають ефективний розподіл логістичних потоків.

3) Задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP-типу) - маршрутизація є складнішим варіантом задачі побудови маршрутів, оскільки включає одночасне планування руху декількох транспортних засобів, врахування обмежень вантажопідйомності, часових вікон, вимог до режимів доставки та необхідності мінімізації порожніх пробігів. Моделі VRP мають високу практичну значущість для транспортних компаній, оскільки дозволяють оптимізувати використання автопарку та скоротити експлуатаційні витрати.

4) Задачі призначення транспортних ресурсів - цей тип задач пов'язаний із вибором конкретного транспортного засобу або водія для виконання конкретного замовлення. Задача призначення враховує вантажопідйомність автомобіля, технічний стан, відстань до місця завантаження, кваліфікацію водія та низку інших факторів. Формально задачі призначення можуть розв'язуватися за допомогою моделей лінійного та цілочисельного програмування.

5) Задачі прогнозування логістичних параметрів - у сучасних інформаційних системах важливу роль відіграє прогнозування часу доставки,

визначення ймовірності затримок, прогноз витрат на перевезення та оцінка сезонної динаміки. Для таких задач використовуються статистичні методи, регресійні моделі та методи машинного навчання. Прогностичні моделі дозволяють транспортним компаніям більш точно планувати графіки руху, оптимізувати використання ресурсів та підвищувати якість обслуговування клієнтів.

6) Задачі контролю та відстеження перевезень - до цієї групи належать задачі моніторингу статусів замовлень, фіксації етапів виконання рейсу, збору телематичних даних та аналізу фактичних параметрів доставки. Системи такого типу дозволяють швидко реагувати на відхилення, підвищують прозорість логістичних процесів та полегшують формування звітів.

7) Задачі, засновані на бізнес-правилах та нормативних вимогах - окрема група задач пов'язана з контролем дотримання правил транспортування, обмежень для небезпечних або специфічних вантажів, температурних режимів, вагових лімітів та інших нормативів. Такі задачі реалізуються за допомогою логічних моделей, експертних систем та наборів бізнес-правил.

Класифікація логістичних задач дозволяє сформуванню структурований підхід до їх моделювання та подальшого використання в інформаційній системі [3]. Розуміння особливостей кожної групи задач дає змогу правильно обирати методи розв'язання, формувати оптимізаційні алгоритми та забезпечувати ефективну автоматизацію процесів перевезення. У наступному підпункті буде проаналізовано методи логістики, що застосовуються для реалізації зазначених задач у системах обліку вантажоперевезень.

### 1.3 Методи логістики, що застосовуються в системах обліку вантажоперевезень

Ефективна організація процесів вантажоперевезень потребує використання спеціалізованих логістичних методів, які дозволяють оптимізувати маршрути, мінімізувати витрати, раціонально розподіляти ресурси та забезпечувати своєчасне виконання доставок. У системах обліку

вантажоперевезень методи логістики виконують не лише допоміжну роль, а й є основою для автоматизації прийняття рішень та підтримки ключових етапів логістичного циклу. У цьому підпункті наведено аналіз основних методів логістики, які застосовуються у сучасних інформаційних системах транспортних підприємств.

1) Методи математичної оптимізації - це група методів використовується для визначення оптимального розподілу логістичних потоків та мінімізації витрат на перевезення. Найбільш поширеним прикладом є транспортна задача, яка дозволяє знаходити економічно вигідний варіант доставки вантажу між кількома пунктами відправлення та призначення [4]. Моделі оптимізації включають цільові функції, обмеження, параметри вантажних потоків та матриці вартостей, що дає змогу виконувати точні обчислення для різних економічних сценаріїв.

Методи пошуку та побудови маршрутів - методи цієї категорії базуються на графових моделях та алгоритмах пошуку шляху, таких як алгоритм Дейкстри, A\*, алгоритми хвильового пошуку тощо [5]. Вони використовуються для визначення найкоротшого або найбільш ефективного маршруту з урахуванням відстані, часу, стану доріг або додаткових обмежень. У транспортних системах такі методи застосовуються для побудови оптимальних маршрутів доставки, підбору альтернативних шляхів та адаптивної навігації в умовах змін дорожньої ситуації.

Методи маршрутизації транспортних засобів VRP - у випадках, коли потрібно доставити вантаж у кілька точок або організувати роботу автопарку, використовуються моделі VRP. Ці методи враховують вантажопідйомність автомобілів, часові вікна, взаємне розташування точок доставки та інші логістичні фактори. VRP-моделі дозволяють оптимізувати маршрутну мережу підприємства, мінімізувати порожні пробіги та підвищити продуктивність транспортних засобів [6].

Методи призначення транспортних ресурсів - ця група методів використовується для вибору конкретного транспортного засобу або водія для виконання окремого замовлення. У межах таких задач застосовуються моделі

лінійного або цілочисельного програмування [7], жадібні алгоритми або моделі на основі вагових коефіцієнтів. Задачі призначення враховують технічний стан автомобіля, його вантажопідйомність, розташування, наявність водія та додаткові вимоги до перевезення.

1. Прогнозні методи - системи обліку вантажоперевезень використовують прогнозування для оцінки часу доставки, виявлення можливих затримок, аналізу сезонних коливань та визначення витрат на перевезення. Прогноз базується на статистичних моделях, регресійних методах або методах машинного навчання. Наявність прогнозного модуля дозволяє ухвалювати більш точні логістичні рішення та планувати роботу автопарку на довгострокову перспективу [8].
2. Методи, засновані на бізнес-правилах - для окремих видів вантажів діють специфічні нормативні вимоги, обмеження або правила. Методологія бізнес-правил дозволяє автоматизувати перевірку відповідності вантажу вимогам, визначати необхідні обмеження під час маршрутизації або контролювати дотримання стандартів. Такі методи особливо важливі для перевезення небезпечних, тендітних або швидкопсувних вантажів.
3. Гібридні методи логістики - гібридні методи поєднують у собі елементи математичної оптимізації, алгоритмів пошуку, методів прогнозування та бізнес-логіки. Завдяки цьому система може враховувати великий набір змінних та забезпечувати високу точність оптимізації. Гібридні підходи використовуються у складних транспортних системах, де потрібно одночасно оптимізувати витрати, маршрути, ресурси та часові обмеження. [10]

З огляду на значну різноманітність логістичних задач, що виникають у сфері вантажоперевезень, важливим етапом дослідження є порівняння методів, які застосовуються для їх розв'язання. Кожен метод має власні переваги, обмеження та сферу застосування, що визначає його ефективність у конкретних умовах функціонування транспортного підприємства.

У системах обліку вантажоперевезень методи логістики мають різний ступінь складності та виконують різні функції: від побудови маршрутів до

розподілу транспортних ресурсів, прогнозування часу доставки або контролю дотримання нормативів. Саме тому їх систематизація дозволяє сформувати цілісне уявлення про логістичний інструментарій, що може бути використаний для автоматизації процесів перевезення.

Для впорядкування розглянутих методів у межах дослідження було сформовано класифікаційну таблицю, у якій наведено основні групи логістичних методів, їх призначення та приклади практичних задач. Така таблиця дозволяє швидко оцінити, які підходи найбільш доцільно застосовувати в конкретній ситуації, а також допомагає визначити роль кожного методу в структурі інформаційної системи.

Особливо важливою є можливість порівняти методи між собою за критеріями:

- рівень формалізації;
- потреба в точних даних;
- чутливість до зовнішніх факторів;
- складність реалізації;
- відповідність динамічним логістичним умовам;
- можливість інтеграції у гібридні моделі.

У подальших розділах роботи ці методи будуть використані для побудови математичних моделей, алгоритмічних рішень та інформаційної архітектури системи обліку вантажоперевезень. Таблиця 1.1 узагальнює ключові характеристики логістичних підходів, які є актуальними для предметної області даного дослідження.

Таблиця 1.1 - Класифікація логістичних методів, що застосовуються у системах обліку вантажоперевезень

№	Метод логістики	Основне призначення	Приклад задачі
1	Математична оптимізація	Мінімізація витрат, оптимальний розподіл	Транспортна задача
2	Пошук маршруту	Пошук найкоротшого або найшвидшого шляху	Алгоритм Дейкстри

3	VRP-моделі	Планування доставок у кілька точок	Розподіл замовлень між автомобілями
4	Призначення ресурсів	Вибір оптимального ТЗ або водія	Вибір авто для замовлення
5	Прогнозні моделі	Прогноз часу, витрат, затримок	Регресійні моделі
6	Бізнес-правила	Контроль нормативів	Обмеження для небезпечних вантажів
7	Гібридні методи	Комплексна оптимізація	Комбінована логістична система

#### 1.4 Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний аналіз предметної області вантажних перевезень та логістичних процесів, що лежать в основі функціонування сучасних транспортних систем. Розглянуто ключові елементи логістичної діяльності: транспортні засоби, маршрути, замовлення, клієнтів, часові обмеження, нормативні вимоги та специфіку роботи з різними видами вантажів. Показано, що ефективність організації перевезень значною мірою залежить від своєчасної обробки інформації, вибору оптимальних логістичних методів та здатності системи реагувати на зміни зовнішнього середовища.

Проаналізовано основні групи логістичних задач: планування маршрутів, розподіл вантажів, маршрутизація транспортних засобів, призначення ресурсів, прогнозування параметрів доставки, контроль виконання рейсів та задачі, що базуються на бізнес-правилах. Установлено, що ці задачі значно різняться за складністю, вимогами до даних та обчислювальних ресурсів, що визначає необхідність використання різних математичних та алгоритмічних підходів.

Також було здійснено огляд логістичних методів, які застосовуються у системах обліку вантажоперевезень, включаючи методи математичної оптимізації, алгоритми графового пошуку, VRP-моделі, методи призначення,

прогнозні моделі, бізнес-правила та гібридні підходи. Проведений аналіз<sup>20</sup> показав, що кожен метод має власні сильні сторони та обмеження, а вибір конкретного підходу визначається характеристиками транспортної мережі, динамікою роботи підприємства та вимогами до точності й швидкості прийняття рішень.

Таким чином, результатом аналізу предметної області є формування системного розуміння структури логістичних процесів та визначення набору логістичних методів, які доцільно застосовувати в інформаційних системах обліку вантажоперевезень. Отримані висновки створюють основу для подальшої формалізації моделей, розробки архітектури системи та проведення порівняльного аналізу ефективності логістичних методів у наступних розділах роботи.

### 2.1 Постановка задачі дослідження методів логістики в системі обліку вантажоперевезень

Організація вантажоперевезень охоплює комплекс взаємопов'язаних процесів, що включають планування маршрутів, розподіл транспортних ресурсів, прогнозування часу доставки, контроль виконання рейсів та облік логістичних операцій. Ефективність цих процесів залежить від того, які саме методи логістики застосовуються та наскільки вони узгоджені з інформаційною системою підприємства. У сучасних умовах значні обсяги даних, динамічні зміни дорожньої ситуації, сезонні коливання попиту, а також різноманітність вантажів зумовлюють необхідність дослідження логістичних моделей з метою визначення найбільш ефективних підходів до їх застосування в системах обліку.

Постановка задачі дослідження полягає у визначенні набору логістичних методів, які можуть бути інтегровані у систему обліку вантажоперевезень, а також у порівнянні їх ефективності, придатності та впливу на ключові показники роботи транспортної компанії. Дослідження має встановити, які моделі забезпечують найкраще співвідношення між точністю розрахунків, швидкістю прийняття рішень і практичною реалізацією в інформаційному середовищі.

Для цього необхідно сформулювати і проаналізувати такі множини даних:

- множина логістичних задач  $L$ , що включає маршрутизацію, розподіл ресурсів, оцінку витрат, планування графіків;
- множина логістичних методів  $M$ , серед яких математичні моделі, евристичні алгоритми, методи прогнозування, бізнес-правила;
- множина параметрів перевезення  $P$ , що визначають обсяг вантажу, тип транспорту, вимоги до доставки, часові обмеження;
- множина інформаційних даних системи  $D$ , що містить статуси замовлень, характеристики транспортних засобів, географічну інформацію та історичні записи.

Така постановка задачі дозволяє розділити дослідження на кілька ключових напрямів:

- Визначення логістичних задач, які підлягають формалізації в системі обліку.
- Вибір і аналіз методів логістики, які можуть бути застосовані до кожної задачі.
- Дослідження можливості інтеграції методів у інформаційну систему (співставлення вимог методів і можливостей даних).
- Порівняння методів між собою за критеріями ефективності, такими як тривалість розрахунку, точність, масштабованість, практичність впровадження.
- Побудова узагальненої логістичної моделі, яка включає найбільш раціональні методи для використання у системі обліку.

З математичної точки зору дослідження передбачає аналіз моделей різного типу — від класичних оптимізаційних задач до алгоритмів штучного інтелекту. Метою є не тільки формальне описання цих моделей, але й виявлення їх сильних і слабких сторін у контексті реальних транспортних процесів.

Таким чином, сформульована задача дослідження включає:

- систематизацію логістичних методів, що використовуються у сфері вантажоперевезень;
- їх формальне представлення у вигляді моделей;
- оцінювання можливості використання цих моделей у системі обліку;
- вибір найбільш ефективних методів для інтеграції;
- обґрунтування доцільності їх застосування в конкретних умовах.

Методи логістики, що використовуються у системах обліку вантажоперевезень, охоплюють широкий спектр моделей і алгоритмів, спрямованих на підвищення ефективності перевезень, раціональне використання транспортних ресурсів та зменшення витрат. У сучасних транспортних системах логістичні методи відіграють ключову роль, оскільки забезпечують можливість аналізу великих обсягів інформації, оперативного прийняття рішень та оптимізації процесів доставки вантажів.

Однією з найважливіших груп методів є методи математичної оптимізації. Вони базуються на строгих формальних моделях, які дозволяють визначати оптимальні значення параметрів системи за заданих обмежень. Класичним прикладом є транспортна задача, яка використовується для оптимального розподілу вантажів між пунктами відправлення та пунктами призначення з метою мінімізації витрат на перевезення. Такі моделі є ефективними, коли параметри транспортної мережі стабільні, обсяги перевезень прогнозовані, а вимоги до виконання доставки — чітко визначені. Проте значним недоліком математичних моделей є їх обмежена здатність враховувати динамічні фактори, що характерні для реальних перевезень: зміну дорожньої ситуації, затори, погодні умови чи раптові коригування замовлень.

Важливим компонентом логістичного забезпечення є методи пошуку оптимальних маршрутів. У їх основі лежать графові моделі, у яких транспортна мережа розглядається як система вершин і ребр. Алгоритми пошуку найкоротшого шляху, такі як алгоритм Дейкстри чи алгоритм  $A^*$ , дозволяють швидко будувати маршрути на основі відстані, часу руху або інших параметрів. Такі методи широко застосовуються у навігаційних системах, і їх інтеграція в систему обліку перевезень дає змогу швидко адаптувати маршрути залежно від змін на дорогах. Однак класичні алгоритми переважно оптимізують один критерій, тоді як логістичні задачі потребують багатокритеріального підходу, де важливими є не лише час доставки, але й собівартість, пропускна здатність дороги, технічні обмеження транспортних засобів та інші фактори.

Однією з найскладніших і найважливіших логістичних задач є маршрутизація транспортних засобів. Вона охоплює формування маршрутів для декількох транспортних засобів, які мають обслуговувати множину клієнтів з різними вимогами. На відміну від задачі пошуку одного найкоротшого маршруту, VRP враховує обмеження вантажопідйомності, часові вікна, вимоги щодо повернення в депо, а також необхідність дотримання технологічних правил для окремих вантажів. Для розв'язання VRP використовуються як точні методи, так і евристичні алгоритми: генетичні, мурашині, табу-пошук та інші. Евристичні методи забезпечують високу швидкість отримання прийнятних рішень навіть у випадку дуже великих транспортних мереж, що робить їх особливо цінними для автоматизованих систем обліку перевезень.

У системах обліку важливу роль відіграють також методи розподілу транспортних ресурсів. Вони забезпечують вибір оптимального транспортного засобу для виконання певного замовлення з урахуванням обмежень щодо вантажопідйомності, технічного стану автомобіля, вимог до умов перевезення та віддаленості транспортного засобу від місця завантаження. Задача розподілу ресурсів часто формується як задача призначення, де необхідно зіставити транспортні засоби та замовлення таким чином, щоб забезпечити мінімальні витрати та високу ефективність використання автопарку. У багатьох випадках застосовуються методи лінійного та цілочисельного програмування, а в умовах реального часу — швидкі жадібні алгоритми.

В умовах зростання обсягів даних набувають значення методи аналізу даних. Статистичні моделі, регресійний аналіз, прогнозні алгоритми та методи машинного навчання дають змогу передбачати час доставки, виявляти сезонні закономірності, оцінювати ризики затримок та визначати оптимальні параметри експлуатації транспортних засобів. Такі методи значно підвищують точність планування, оскільки базуються на історичних даних і дозволяють враховувати нестандартні ситуації, що виникали у минулому.

Особливу групу складають методи, засновані на бізнес-правилах. Вони відображають нормативні вимоги, галузеві стандарти та експертні рекомендації щодо транспортування окремих видів вантажів. Наприклад, перевезення

небезпечних вантажів може бути заборонено певними ділянками, швидкокопсувні товари потребують температурного контролю, а великовагові транспортні засоби не можуть пересуватися у визначені години. [9] Такі правила забезпечують безпечність та відповідність перевезень нормативам, хоча їх застосування часто призводить до зниження гнучкості системи.

Найбільш перспективними у сучасних логістичних системах є гібридні методи, які поєднують елементи математичної оптимізації, евристичних алгоритмів, прогнозних моделей та бізнес-правил. Вони дозволяють одночасно враховувати широкий спектр чинників та адаптувати рішення до зміни умов у реальному часі. Гібридні методи забезпечують високу якість результатів у складних транспортних мережах і найчастіше впроваджуються в інформаційні системи обліку вантажоперевезень.

Таким чином, методи логістики, що застосовуються у системах обліку вантажоперевезень, утворюють багатокomпонентну систему підходів, кожен з яких вирішує свою специфічну задачу, а їх поєднання забезпечує комплексну оптимізацію логістичних процесів. Застосування цих методів у межах інформаційної системи дозволяє підвищити ефективність перевезень, зменшити витрати та забезпечити стабільність роботи транспортної компанії.

## 2.3 Формалізація моделей обліку вантажоперевезень

### 2.3.1 Модель транспортної задачі

Транспортна задача є базовою моделлю оптимізації вантажопотоків, яка широко використовується у логістиці, системах постачання та управлінні виробничими процесами. Формально вона визначається множинами пунктів відправлення  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  та пунктів призначення  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ . Кожному пункту відправлення відповідає запас вантажу  $a_i$ , а кожному пункту призначення — потреба  $b_j$ . Міститься також матриця вартостей

транспортування  $C = (c_{ij})$ , де  $c_{ij}$  — вартість перевезення одиниці вантажу з пункту  $s_i$  у пункт  $d_j$ .

Задачею є мінімізація сумарних логістичних витрат формула 2.3.1:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.3.1)$$

при обмеженнях:

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

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

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

У системі обліку вантажоперевезень ця модель дозволяє визначити економічно вигідний спосіб розподілу вантажів між складами, логістичними центрами та пунктами доставки. Вона є основою для побудови оптимального плану перевезень, забезпечує прозорість прийняття рішень і дає змогу знизити витрати на транспортування.

Разом із тим, класична транспортна задача має певні обмеження: вона не враховує динамічні зміни умов на дорогах, можливі затримки, сезонні коливання попиту, транспортні ризики та інші чинники, які часто мають суттєве значення у реальних логістичних системах. Саме тому на практиці транспортна задача нерідко доповнюється більш складними моделями або застосовується у поєднанні з методами імітаційного моделювання та системами підтримки прийняття рішень.

### 2.3.2 Модель пошуку оптимального маршруту

Процес знаходження маршруту між двома логістичними точками може бути описаний графом  $G = (V, E)$ , де  $V$  — множина транспортних вузлів, а  $E$  —

множина ребер, що представляють дороги. Кожному ребру присвоюється вага  $w(e)$ , що може відповідати відстані, часу або вартості руху.

Оптимальний маршрут визначається по формулі 2.3.2:

$$\min \sum_{e \in P} w(e), \quad (2.3.2)$$

де  $P$  — послідовність ребер, що утворюють шлях від початкової до кінцевої точки.

У системі обліку вантажоперевезень така модель дозволяє:

- обчислювати найкоротші або економічно найвигідніші маршрути з урахуванням вартості, відстані чи часу;
- оперативно перебудовувати маршрут у разі зміни умов, таких як аварії, погодні фактори чи зміна доступності доріг;
- визначати альтернативні шляхи при виникненні заторів, тимчасових перекриттів або обмеження руху;
- оптимізувати розподіл транспортних засобів між напрямками залежно від їхньої завантаженості, технічного стану та доступності;
- аналізувати ефективність використання транспортного парку та прогнозувати витрати на перевезення при різних сценаріях роботи;
- забезпечувати узгодженість між плануванням маршрутів і бізнес-правилами компанії, що регламентують порядок обслуговування клієнтів або пріоритетність доставок.

Модель може включати додаткові обмеження: заборону руху певними ділянками, обмеження ваги транспортних засобів, часові вікна для заїзду на територію об'єкта, пріоритетні маршрути або вимоги до максимально допустимої тривалості доставки. За необхідності можуть враховуватися й інші фактори, наприклад сезонні зміни інтенсивності руху, обмеження для великогабаритних вантажів чи специфіка перевезення небезпечних товарів.

У результаті така система стає точнішою, краще адаптованою до реальних умов експлуатації та здатною забезпечити більш ефективно планування логістичних процесів, знижуючи витрати та підвищуючи якість обслуговування.

### 2.3.3 Модель маршрутизації транспортних засобів

Модель маршрутизації транспортних засобів (VRP) розширює графову модель, оскільки враховує множину транспортних засобів  $V$ , множину клієнтів  $C$ , матрицю відстаней  $D$  та обмеження вантажопідйомності  $Q$ . Формально вона формується як задача мінімізації сумарної довжини маршрутів зображено на формулі 2.3.3:

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i, j \in C} d_{ij} x_{ijk}, \quad (2.3.3)$$

Де  $x_{ijk} = 1$ , якщо транспортний засіб  $k$  здійснює доставку з точки  $i$  в точку  $j$ .

Додаткові обмеження включають:

- вантажопідйомність автомобіля формула 2.3.4:

$$\sum_{i \in C} q_i x_{ik} \leq Q_k; \quad (2.3.4)$$

Де  $q_i$  обсяг вантажу для клієнта  $i$

- часові вікна, що регламентують допустимий час прибуття до клієнтів та необхідність дотримання часових інтервалів обслуговування;
- вимоги щодо повернення у депо, тобто кожний маршрут повинен починатися і завершуватися на складі;
- умову одноразового обслуговування клієнта, що гарантує, що кожен клієнт буде включений лише в один маршрут;
- заборону субтурів, щоб уникнути утворення замкнених циклів, не пов'язаних з основним маршрутом;
- обмеження щодо максимального часу або довжини маршруту, що застосовується у перевезеннях із жорсткими логістичними вимогами.

Модель VRP є однією з найскладніших задач у галузі логістики, оскільки належить до NP-складних проблем. Повний перебір можливих маршрутів стає неможливим уже при невеликій кількості клієнтів та транспортних засобів. Тому для її розв'язання зазвичай застосовують евристичні методи або метаевристики

Завдяки VRP можливо планувати маршрути реального автопарку, оптимізувати завантаження, скорочувати витрати та підвищувати якість логістичного сервісу навіть у складних і динамічних умовах експлуатації.

### 2.3.4 Модель розподілу транспортних ресурсів

Ця модель формується як задача призначення, у якій необхідно зіставити транспортні засоби  $V$  із замовленнями  $O$ . Для цього формується матриця витрат  $C = (C_{ij})$ , де  $C_{ij}$  — вартість або доцільність виконання замовлення  $o_j$  транспортним засобом  $v_i$ .

Мета — мінімізувати :

$$Z = \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1}^{|O|} c_{ij} x_{ij}. \quad (2.3.5)$$

Обмеження забезпечують:

- виконання кожного замовлення одним транспортним засобом, що спрощує контроль і знижує ризик помилок під час перевезення;
- відповідність вантажопідйомності, тобто недопущення перевищення максимально допустимого завантаження автомобіля чи іншого транспортного засобу;
- дотримання технічних, регіональних або нормативних обмежень, включно з обмеженнями руху у міських зонах, екологічними вимогами, заборонаю на проїзд у певні години або на окремі ділянки дороги;
- можливість врахування специфічних вимог до вантажу (температурний режим, габарити, особливі умови зберігання тощо).

Завдяки таким обмеженням модель дозволяє автоматизувати вибір оптимального транспортного засобу для кожного перевезення, враховуючи як логістичні, так і технічні параметри. Це підвищує ефективність планування, зменшує витрати та забезпечує відповідність реальним умовам експлуатації транспортної мережі.

### 2.3.5 Модель прогнозування параметрів доставки

Прогнозування логістичних параметрів є одним із ключових інструментів підвищення ефективності системи обліку вантажоперевезень. Основна мета цього процесу — передбачення можливих змін у тривалості маршруту, витратах та впливі зовнішніх факторів ще до виконання рейсу. Це дає змогу своєчасно ухвалювати коригувальні рішення та оптимізувати логістичні операції.

У рамках системи прогнозування можуть застосовуватися як прості статистичні методи, так і сучасні алгоритми машинного навчання. Найчастіше використовуються моделі часових рядів, регресійні моделі або їх комбінації.

Нехай:

$y_t$  — фактичний час доставки у момент часу  $t$ ;

$X_t$  — вектор незалежних чинників, до яких можуть входити погодні умови, рівень завантаженості доріг, день тижня, тип транспортного засобу, спосіб маршрутизації тощо.

Тоді загальна форма прогнозної моделі може бути записана як формула 2.3.6:

$$y_t = f(X_t) + \varepsilon_t. \quad (2.3.6)$$

Залежно від характеру даних можуть застосовуватися такі підходи:

- ARIMA-моделі, якщо часовий ряд стабільний та має чіткі закономірності.
- Лінійна або множинна регресія, коли важливо врахувати вплив специфічних факторів (погоди, типу вантажу, часу доби).
- Дерева рішень або градієнтний бустинг, які добре працюють із нелінійними залежностями.
- Нейронні мережі LSTM, якщо дані мають сезонність та складні довгострокові взаємозв'язки.

Застосування прогнозних моделей дозволяє системі автоматично оцінювати:

- очікуваний час прибуття вантажу (ETA), що є критичним для диспетчерів і клієнтів;
- ймовірність затримок, спричинених погодними умовами, дорожніми подіями або піковими навантаженнями;

- очікувані витрати на паливо, які залежать від тривалості маршруту та умов руху;
- сезонні та тижневі коливання, що впливають на час доставки в різні періоди року.

Крім того, система може будувати сценарні прогнози — наприклад, моделювати, як зміниться час доставки при виборі іншого логістичного методу або маршруту. Такий підхід підвищує точність планування та дозволяє оперативно реагувати на зміни у транспортному середовищі.

### 2.3.6 Модель на основі бізнес-правил

У системі обліку вантажоперевезень бізнес-правила відіграють роль механізму, який регламентує поведінку логістичних процесів у стандартних та нестандартних ситуаціях. Вони визначають, які дії необхідно виконувати за певних умов, і забезпечують автоматичне дотримання нормативних вимог, обмежень та внутрішньої логістичної логіки.

Формально бізнес-правила можна подати у вигляді множини умов формула 2.3.7:

$$R = \{r_1, r_2 \dots r_n\} \quad (2.3.7)$$

де кожне правило описує залежність між умовою та дією, що повинна бути виконана. Загальна форма запису:

*if condition → action*

Тобто система аналізує ситуацію відповідно до вхідних даних та активує відповідне правило у момент, коли його умови виконуються.

Приклади типових бізнес-правил у транспортній логістиці:

- якщо вантаж належить до категорії небезпечних, система автоматично виключає маршрути, що проходять через заборонені ділянки дороги;
- якщо склад або термінал працює до 18:00, система не дозволяє планувати прибуття транспортного засобу після зазначеного часу;
- якщо прогнозована температура опускається нижче допустимого порогу, система використовує лише транспорт, оснащений холодильним відсіком або температурним контролем;
- якщо сума замовлення перевищує вантажопідйомність обраної машини, система ініціює пошук альтернативного транспортного засобу або розподіляє вантаж на кілька рейсів;
- якщо для маршруту діють сезонні обмеження (ремонт, ожеледиця), система автоматично підбирає альтернативний шлях;
- якщо водій перевищує допустиму тривалість зміни, програма не допускає його призначення на новий рейс без відпочинку.

Бізнес-правила забезпечують логічну узгодженість роботи всієї системи, дозволяють уникати критичних помилок у плануванні та створюють передумови для автоматизації рутинних рішень у процесі доставки.

### 2.3.7 Гібридні моделі

Гібридні моделі логістичної оптимізації поєднують кілька різних методів, щоб використати їхні сильні сторони та компенсувати недоліки окремих підходів. У загальному вигляді комбіновану логістичну модель можна показати

на формулі 2.3.8 : 
$$F = \alpha M_1 + \beta M_2 + \gamma M_3, \quad (2.3.8)$$

де  $M_1, M_2, M_3$  — математичні, евристичні та прогнозні моделі, а  $\alpha, \beta, \gamma$  — вагові коефіцієнти.

Таке поєднання дозволяє враховувати одразу кілька критеріїв оптимізації: час доставки, витрати, завантаженість транспорту, затримки, ризики та сезонні фактори. Гібридний підхід працює ефективніше за одиничні моделі, оскільки: математичні методи забезпечують точність і строгість розрахунків;

евристики дозволяють швидко знаходити рішення у складних або нестандартних ситуаціях;

прогнозні моделі враховують динаміку трафіку, погоди, сезонність та інші змінні фактори.

Наприклад, система може спочатку застосувати модель короткого шляху для побудови базового маршруту, далі використати VRP для оптимізації розподілу замовлень, а потім скоригувати отриманий маршрут відповідно до прогнозованої затримки на окремих ділянках дороги.

У результаті гібридні моделі дають змогу:

- адаптувати маршрут у режимі реального часу;
- знижувати ризики, пов'язані з непередбачуваними подіями (трафік, аварії, погодні умови);
- підвищувати точність оцінки часу прибуття;
- оптимізувати загальні витрати перевезення;
- забезпечувати більш стабільне логістичне планування у змінних умовах.

Таким чином, гібридні методи є найбільш ефективним варіантом для складних транспортних систем, де необхідно враховувати різноманітні взаємозалежні фактори та обмеження.

### 2.3.8 Порівняльний аналіз формалізованих логістичних моделей

Для того щоб визначити, які саме логістичні моделі є найбільш придатними для використання у системі обліку вантажоперевезень, необхідно здійснити їх порівняльний аналіз за ключовими критеріями. Такий аналіз дозволяє оцінити сильні та слабкі сторони кожного підходу, а також визначити умови, у яких певна модель забезпечує найвищу ефективність.

У процесі функціонування транспортної компанії логістичні задачі можуть суттєво відрізнятися за структурою, складністю та вимогами до обчислювальних ресурсів. Наприклад, класичні оптимізаційні моделі забезпечують високу точність, однак потребують значного часу на розрахунок у випадку великих даних. Евристичні методи, навпаки, дозволяють отримати прийнятні результати

швидше, проте вони не гарантують знаходження глобального оптимуму. Моделі на основі бізнес-правил забезпечують відповідність нормативним вимогам, але не дають можливості урахування складних логістичних сценаріїв без додаткової алгоритмізації.

Таблиця 2.1 дає можливість узагальнити властивості кожної моделі та сформувані уявлення про їх практичну придатність. Вона включає такі критерії, як точність, швидкість обчислень, складність реалізації та сфери застосування. Це дозволяє обґрунтувати вибір методів, які надалі будуть інтегровані у розроблювану систему обліку вантажоперевезень.

Таблиця 2.1 – порівняльна характеристика формалізованих логістичних

Модель	Переваги	Недоліки	Область застосування
Транспортна задача	Висока точність; можливість отримання оптимального розв'язку; чітка математична формалізація	Не враховує динамічні зміни (затори, погодні умови); потребує повних даних	Планування перевезень між складами, оптимізація вантажопотоків
Пошук оптимального маршруту (графові моделі)	Швидкий розрахунок; можливість адаптації в навігаційних системах; враховує дорожню мережу	Оптимізує переважно один параметр (час/відстань); складно враховувати кілька критеріїв	Вибір найкоротших шляхів, побудова альтернативних маршрутів
Маршрутизація транспортних засобів (VRP)	Урахування вантажопідйомності, часових вікон, складних обмежень; гнучкість	Висока обчислювальна складність; потребує евристик при великій кількості точок	Доставка кільком клієнтам, управління автопарком
Розподіл транспортних ресурсів (модель призначення)	Ефективне використання автопарку; зменшення простоїв; швидке обчислення	Важко врахувати складні обмеження; застосовується при стабільних умовах	Призначення авто для виконання замовлень
Прогнозні моделі	Можливість передбачення затримок; аналіз ризиків; покращене планування	Потреба в історичних даних; залежність від точності моделі	Прогноз часу доставки, сезонність попиту
Моделі на основі бізнес-правил	Відповідність нормативам; простота реалізації; чіткі правила	Низька гнучкість; складність адаптації до змін	Перевезення небезпечних/спеціальних вантажів
Гібридні моделі	Найвища точність;	Складність розробки;	Великі логістичні

	комплексне врахування факторів; адаптивність	високі вимоги до даних	системи, ситуації з багатьма обмеженнями
--	---	---------------------------	---

## 2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено комплексне дослідження логістичних методів, що застосовуються в системах обліку вантажоперевезень, та сформовано формальний апарат для їх математичного опису. Розглянуті методи охоплюють широкий спектр задач — від оптимізації вантажопотоків і планування маршрутів до розподілу транспортних ресурсів, прогнозування часу доставки та застосування бізнес-правил, що регламентують специфічні вимоги до перевезення окремих видів вантажів. Проведений аналіз показав, що логістичні задачі різняться за складністю, вимогами до обчислювальних ресурсів та чутливістю до зміни зовнішніх умов, а отже вимагають використання різних моделей та алгоритмів.

Побудовані математичні моделі дозволили формалізувати основні логістичні процеси, які виникають у транспортних системах: оптимізацію перевезень між пунктами відправлення та призначення, вибір оптимальних маршрутів, маршрутизацію транспортних засобів з урахуванням обмежень, призначення ресурсів, прогнозування параметрів доставки та автоматизацію контролю на основі бізнес-правил. Формалізація дала змогу визначити структуру обмежень, цільові функції та основні вхідні параметри, необхідні для подальшого алгоритмічного опрацювання. Додатково було встановлено взаємозв'язки між окремими моделями, що дозволяє створювати інтегровані логістичні схеми та забезпечувати узгодженість рішень на різних рівнях управління.

Порівняльна характеристика моделей продемонструвала, що кожен підхід має свої переваги та недоліки. Математичні моделі забезпечують високу точність і надійність у стабільних умовах, але погано адаптуються до швидкозмінних ситуацій на дорогах. Методи пошуку маршрутів є швидкими й ефективними у локальних задачах, проте не враховують складних багатокритеріальних

залежностей, що виникають у великих транспортних системах. Маршрутизаційні моделі VRP добре підходять для реальних перевезень і дозволяють планувати завантаження автопарку, однак суттєво збільшують обчислювальні витрати при зростанні розмірності задачі. Прогнозні моделі забезпечують оцінку часу доставки та ймовірності затримок, але їхня точність суттєво залежить від обсягу та якості історичних даних. Моделі на основі бізнес-правил гарантують відповідність нормативам і політикам підприємства, проте є негнучкими в умовах складних логістичних сценаріїв, де потрібна адаптивність. Найвищу ефективність продемонстрували гібридні моделі, які поєднують переваги кількох підходів і забезпечують баланс між точністю, швидкістю опрацювання та адаптивністю до змінних зовнішніх факторів.

У межах другого розділу було систематизовано широкий спектр логістичних задач, що виникають під час організації перевезень, а також розглянуто різні моделі та підходи, які застосовуються для їх розв'язання. Однак не всі перелічені методи стали предметом детального подальшого аналізу. Для практичної реалізації інформаційної системи та проведення експериментальних досліджень у розділах 3 та 4 були відібрані лише ті підходи, що безпосередньо впливають на процес формування маршруту та забезпечують можливість порівняльної оцінки їх ефективності в реальних умовах роботи системи.

До таких методів увійшли: пошук найкоротшого маршруту як базовий орієнтовний підхід; маршрутизація з урахуванням трафіку, що дозволяє враховувати змінність транспортної мережі; модель VRP, яка розглядається у спрощеному варіанті для багатоточкових маршрутів; метод мінімізації витрат палива, орієнтований на економічну складову; маршрути з уникненням ризикових зон, що моделюють безпекові обмеження; а також маршрутизація з часовими вікнами, яка дозволяє враховувати регламентовані часові умови. Саме ці шість методів стали основою для проєктних рішень у третьому розділі та були використані для експериментального порівняння у четвертому.

Такий вибір обумовлений практичною спрямованістю дослідження: усі інші моделі, розглянуті в теоретичній частині, мають важливе методологічне значення, але не потребували безпосередньої імплементації в рамках

створюваної системи. Обрані ж методи дозволили провести повноцінне<sup>37</sup> порівняння різних підходів до маршрутизації, оцінити їхню продуктивність, чутливість до змін умов та придатність для інтеграції в інформаційну систему.

### 3.1 Архітектура інформаційної системи

Логістичний процес вантажоперевезень складається з послідовності взаємопов'язаних етапів, кожен з яких потребує використання певних логістичних методів для забезпечення ефективного управління перевезеннями. Для узагальнення взаємозв'язків між етапами та відповідними методами була побудована структурна схема, наведена на рисунку 3.1. Вона відображає логічний ланцюжок транспортування вантажу — від моменту отримання замовлення до завершення доставки — та показує, які саме методи логістики доцільно застосовувати на кожному етапі.



Рисунок 3.1 – Узагальнена схема логістичного процесу вантажоперевезень

Першим етапом є обробка замовлення, на якому формується початкова інформація про вантаж, умови транспортування, часові вимоги та маршрути. На цьому етапі використовуються методи математичної оптимізації, що дозволяють визначити базові параметри доставки, оцінити можливі варіанти виконання та сформулювати початкові рішення щодо розподілу ресурсів.

Другий етап — планування маршруту, де застосовуються методи пошуку оптимального шляху. Вони забезпечують побудову найкоротшого або найшвидшого маршруту відповідно до дорожніх умов. У випадках, коли кількість пунктів доставки є значною, а перевезення виконується кількома транспортними засобами, на цьому етапі доцільно застосовувати методи

маршрутизації транспортних засобів (VRP), які дають змогу оптимізувати сукупні витрати та мінімізувати порожні пробіги.

Наступним є етап розподілу транспортних ресурсів, на якому визначається, який транспортний засіб має виконати конкретне замовлення. Тут застосовуються методи призначення та методи розподілу ресурсів, що враховують вантажопідйомність, технічний стан автомобіля, наявність водія, регламентні обмеження та особливості вантажу.

Під час фактичного виконання доставки використовуються прогнозні моделі, що дозволяють оцінити очікуваний час прибуття, ймовірність затримок та вплив зовнішніх факторів (погода, ситуація на дорогах). Ці моделі забезпечують можливість оперативного коригування маршруту та графіка руху.

Завершальний етап — оцінка виконання доставки, на якому застосовуються аналітичні методи, спрямовані на аналіз ефективності маршруту, порівняння фактичних і планових показників, виявлення причин відхилень та формування рекомендацій для майбутніх логістичних рішень.

Окремо слід зазначити, що на схемі також відображено методи, засновані на бізнес-правилах, та гібридні методи. Ці дві групи методів мають ширший характер і не прив'язані до конкретного етапу логістичного процесу. Методи, що базуються на бізнес-правилах, застосовуються протягом усього процесу виконання перевезення, оскільки регламентують нормативні обмеження, правила транспортування небезпечних, швидкопсувних або великогабаритних вантажів, а також вимоги безпеки. Гібридні методи поєднують можливості кількох логістичних моделей — оптимізаційних, маршрутизаційних, прогнозних — і можуть застосовуватися на будь-якому етапі для отримання більш точних або адаптивних рішень. Саме тому на рисунку вони подані як окремі блоки, які логічно “накладаються” на загальний процес і підтримують його у цілому.

Таким чином, рисунок 3.1 відображає взаємозв'язок між логістичними етапами та методами, що забезпечують їх ефективне виконання. Така схема дозволяє зрозуміти, де саме в процесі транспортування доцільно впроваджувати кожен з методів, описаних у другому розділі, та формує основу для подальшого аналізу ефективності комбінованих логістичних підходів.

### 3.2 Інформаційна модель системи

Для систематизації основних етапів організації вантажоперевезень та визначення місць застосування відповідних логістичних методів була побудована узагальнена схема логістичного процесу, наведена на рисунку 3.2. На ній відображено послідовність ключових логістичних операцій — від моменту отримання замовлення до завершення доставки, а також показано, які саме методи логістики забезпечують виконання кожного з цих етапів. Схема також містить два додаткові блоки, що представляють методи, засновані на бізнес-правилах, та гібридні методи, оскільки вони не прив'язані до одного конкретного етапу, а підтримують логістичний процес у цілому. [11]

Логістичний процес вантажоперевезень включає низку взаємопов'язаних операцій, кожна з яких відіграє важливу роль у формуванні ефективної системи доставки. Першим етапом є обробка замовлення, де формується вихідна інформація про вантаж, часові параметри та вимоги клієнта. На цьому етапі застосовуються методи математичної оптимізації, які дозволяють оцінити можливі сценарії доставки та визначити базові параметри логістичного планування.

Другий етап — планування маршруту, де використовуються методи пошуку оптимального шляху. Вони дають можливість побудувати маршрут із мінімальними витратами часу чи відстані, враховуючи дорожню ситуацію, обмеження руху та логістичні особливості перевезення. Якщо перевезення включає кілька точок доставки або виконується кількома транспортними засобами, на даному етапі застосовуються також методи маршрутизації транспортних засобів (VRP).

Наступним етапом є розподіл транспортних ресурсів, під час якого визначається відповідність транспортного засобу вимогам конкретного замовлення. Тут використовуються методи призначення та розподілу ресурсів, які враховують вантажопідйомність, технічний стан автомобілів, їхню доступність та відповідність параметрам вантажу.

Під час етапу доставки застосовуються прогнозні моделі, що дозволяють визначати очікуваний час прибуття, ризики затримок та необхідність коригування маршруту. Завдяки цим моделям можна оперативно реагувати на зміну умов, забезпечуючи точність і стабільність перевезень.

Завершальним етапом логістичного процесу є оцінка виконання доставки, де використовуються аналітичні методи. Вони дають можливість зіставити планові та фактичні показники, визначити причини можливих відхилень, оцінити ефективність застосованих логістичних рішень та підготувати рекомендації для подальшого вдосконалення перевезень.

Окреме місце на схемі займають методи, засновані на бізнес-правилах, а також гібридні методи логістики. Перші забезпечують відповідність перевезень нормативним та галузевим вимогам, регулюючи транспортування небезпечних, великогабаритних або швидкопсувних вантажів. Гібридні методи поєднують можливості кількох логістичних підходів — оптимізаційних, маршрутизаційних, прогнозних — та застосовуються на будь-якому етапі процесу для підвищення точності та гнучкості прийняття рішень. Саме через універсальний характер ці два методи відображено на рисунку окремими блоками, що взаємодіють з усім логістичним процесом.

Таким чином, схема на рисунку 3.2 відображає місця застосування основних методів логістики у процесі вантажоперевезень та демонструє логічну структуру послідовних етапів транспортування. Це дозволяє визначити оптимальні точки впровадження кожного методу та створює основу для подальшого аналізу їх ефективності.

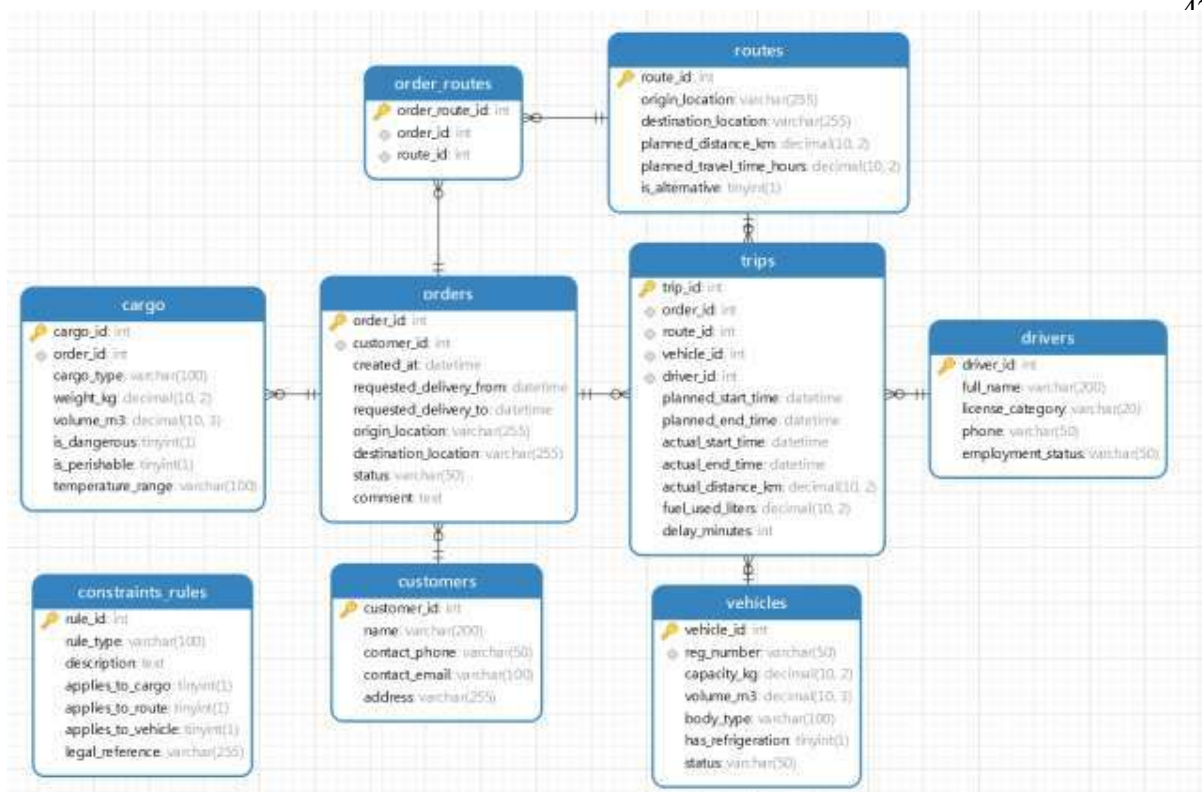


Рисунок 3.2 – ER-діаграма

### 3.3 Модель потоків даних

У процесі обліку вантажоперевезень циркулює значна кількість інформації, яку необхідно структурувати та пов'язати між собою. Для відображення того, як саме рухаються дані між учасниками логістичного процесу, використовується модель потоків даних DFD. Така діаграма наочно демонструє взаємодію між зовнішніми суб'єктами, внутрішніми процесами та інформаційними сховищами, що дозволяє глибше проаналізувати структуру логістичної системи.

Модель потоків даних зображена на рисунку 3.3 у контексті дослідження методів логістики не є програмною або технічною моделлю. Вона використовується для аналітичної візуалізації, тобто для показу того, як інформація переміщується між ключовими етапами логістичного процесу. Така схема допомагає зрозуміти, у яких точках застосовуються різні логістичні методи, де виникають додаткові обмеження, а де — можливі точки оптимізації.

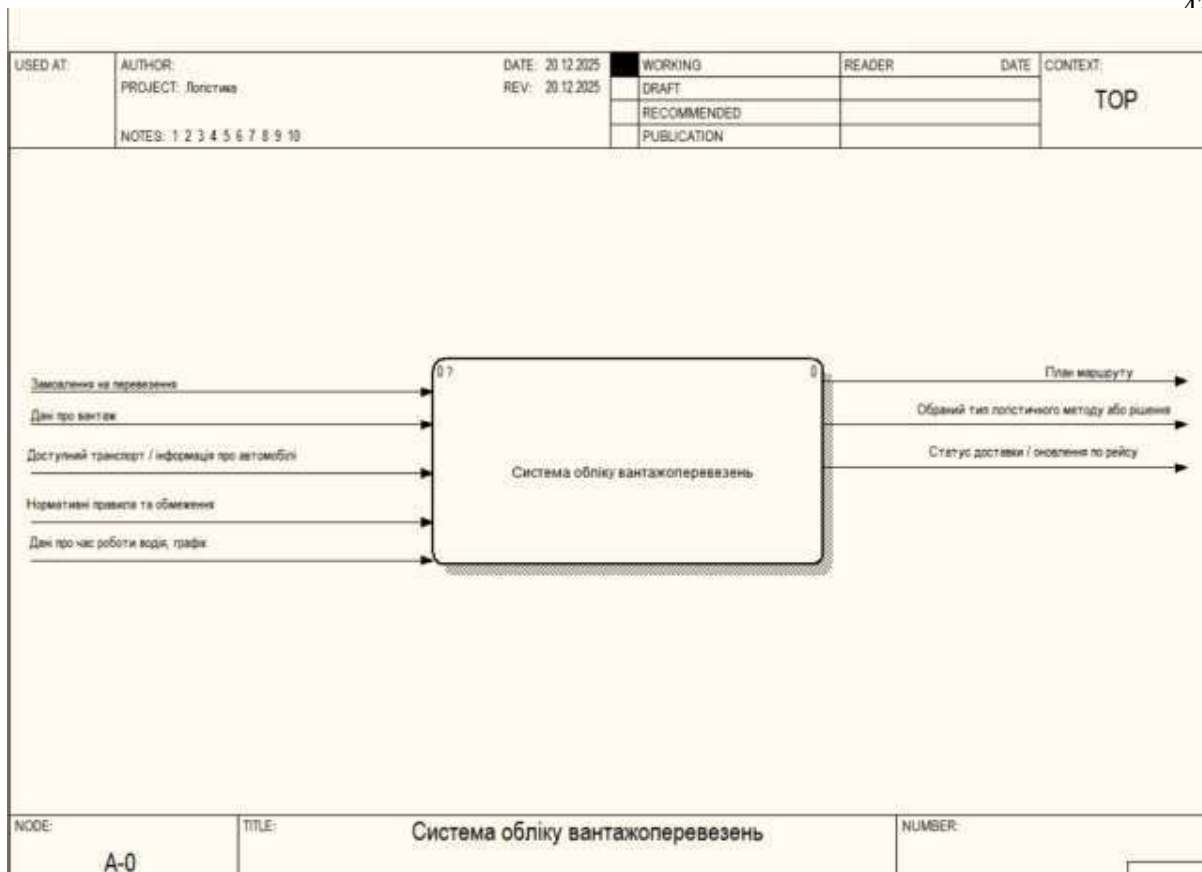


Рисунок 3.3 – Контекстна діаграма потоків даних

Контекстна діаграма відображає логістичну систему як єдиний процес, який отримує вхідні дані: замовлення, характеристики вантажу, доступний транспорт, нормативні обмеження та генерує вихідні дані: план доставки, маршрут, обраний метод логістики, статус виконання. На цьому рівні система взаємодіє з клієнтом, водієм, диспетчером та іншими зовнішніми учасниками.

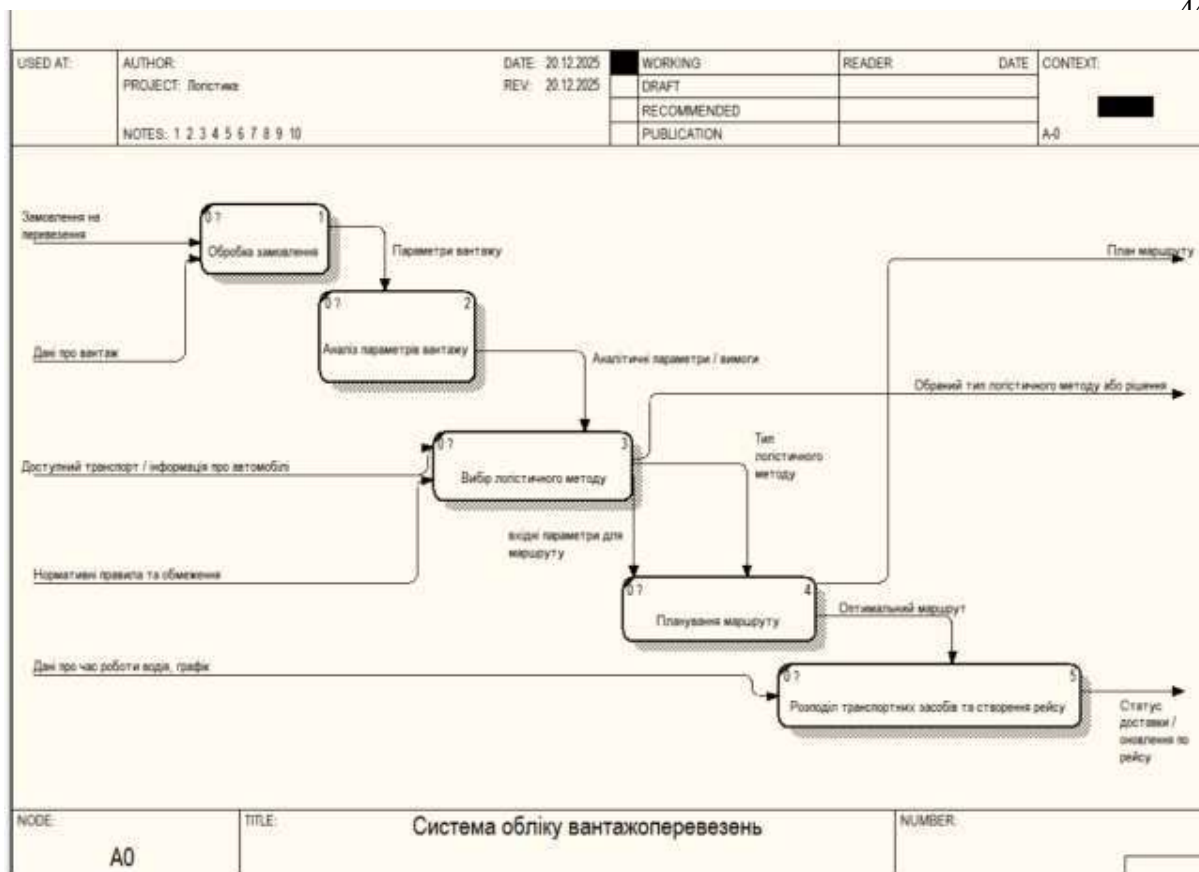


Рисунок 3.4 – Діаграма декомпозиції потоків даних

На діаграмі декомпозиції рисунок 3.4 логістичний процес розбивається на окремі функції: обробка замовлення, планування маршруту, розподіл транспортних засобів, контроль транспортування та оцінка результатів. Кожен із цих процесів оперує своїми наборами даних, що зберігаються у відповідних інформаційних підсистемах (реєстр вантажів, каталог транспортних засобів, історія маршрутів тощо).

Побудова DFD дозволяє:

- продемонструвати логічну структуру інформаційних потоків;
- визначити місця, де застосовуються конкретні логістичні методи;
- виділити етапи, що потребують оптимізації;
- забезпечити узгодженість аналітичної моделі з процесами реальних перевезень.

Таким чином, модель потоків даних є важливою складовою теоретичного аналізу системи обліку вантажоперевезень, оскільки вона формує основу для

подальшого опису алгоритмів, методів оптимізації та загальної логістичної моделі, що була сформована у попередніх підрозділах.

### 3.4 Структура бази даних та її елементи

Для забезпечення коректної роботи логістичних методів та можливості їх інтеграції у процес обліку вантажоперевезень необхідно мати впорядковану інформаційну модель системи. Така модель визначає, які дані використовуються в процесі прийняття рішень, як вони взаємодіють між собою та які сутності є ключовими для логістичних розрахунків. [12]

На рисунку 3.5 представлена логічна модель даних системи обліку вантажоперевезень. Вона відображає основні сутності, що беруть участь у логістичному процесі, а також інформаційні зв'язки між ними. Модель не є фізичною або програмною реалізацією бази даних, а виступає концептуальною схемою, яка показує логічну структуру та взаємодію даних у межах системи.

У структурі моделі виділено такі основні групи інформації:

- **Замовлення (orders)** — містять базові відомості про запит на перевезення, включаючи клієнта, місце відправлення, місце доставки та статус виконання.
- **Вантаж (cargo)** — описує характеристики вантажу, зокрема тип, вагу, об'єм та спеціальні вимоги. Ця інформація є критичною при виборі логістичного методу та плануванні маршруту.
- **Маршрути (routes)** — включають інформацію про доступні шляхи, їх довжину та час проходження, що необхідно для методів оптимізації маршруту.
- **Транспортні засоби (vehicles)** — визначають технічні характеристики автопарку, що впливають на розподіл транспортних ресурсів.
- **Водії (drivers)** — містять відомості про персонал, який бере участь у виконанні доставки.
- **Рейси (trips)** — формуються на основі замовлення, маршруту, транспортного засобу та водія й описують фактичне виконання перевезення.

– Обмеження та правила (`constraints_rules`) — включають нормативні та логістичні вимоги, що впливають на маршрутизацію та вибір методів доставки.

Усі сутності поєднані між собою інформаційними зв'язками, що відображають логічні залежності між елементами системи. Так, вантаж прив'язаний до замовлення, замовлення — до клієнта, маршрут — до рейсу, а транспортний засіб і водій — до конкретного виконання перевезення. Це дозволяє відтворити повну картину процесу доставки та забезпечити можливість застосування різних логістичних методів (оптимізаційних, маршрутизаційних, аналітичних тощо).

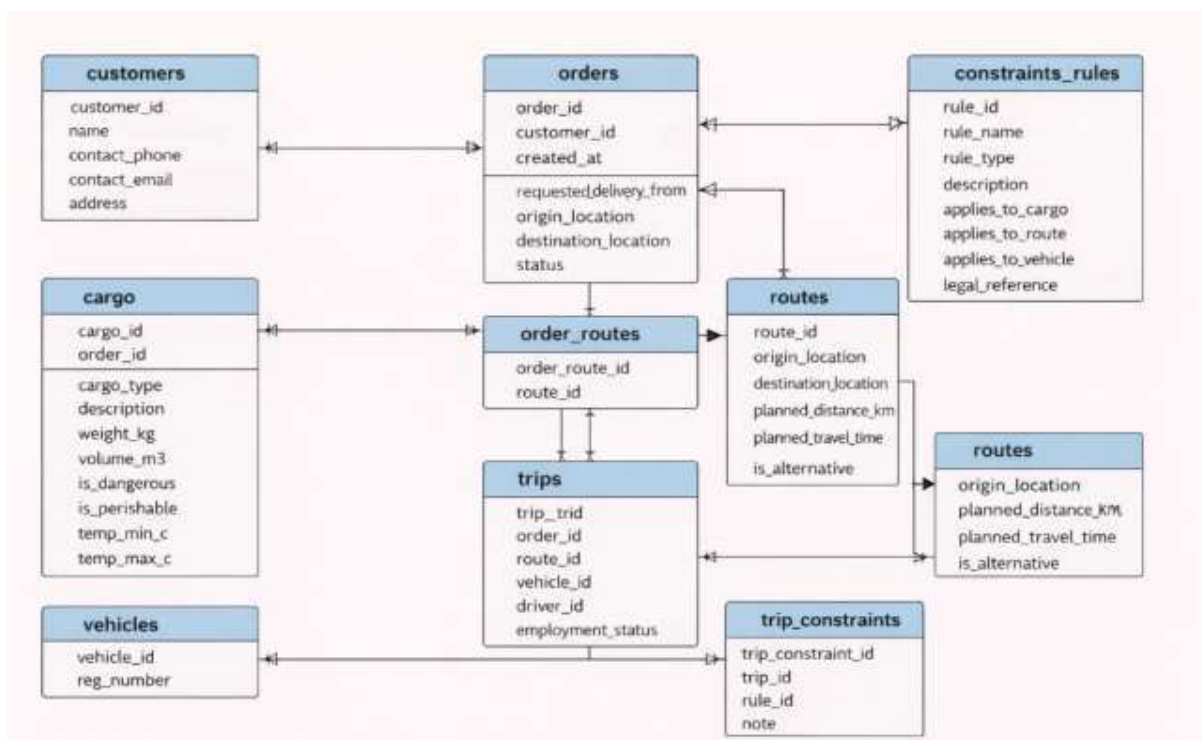


Рисунок 3.5 – Логічна модель даних системи обліку вантажоперевезень

Представлена схема є основою для подальшого формування логістичних алгоритмів, оскільки на її базі визначається, які саме дані доступні для аналізу та які структурні залежності потрібно враховувати при моделюванні. Така модель також забезпечує узгодженість між теоретичними логістичними методами та фактичними інформаційними процесами у системі.

Для опису взаємодії користувачів із системою обліку вантажоперевезень сформовано діаграму прецедентів, яка дає змогу визначити основні ролі та їх функціональні можливості у межах логістичного процесу. Діаграма відображає ключові операції, що виконуються в системі, та демонструє логічні зв'язки між користувачами та функціональними модулями.

На рисунку 3.6 подано діаграму прецедентів системи обліку вантажоперевезень. У структурі системи виділено чотири основні актори: Клієнт, Логіст, Диспетчер та Водій, кожен з яких взаємодіє з системою відповідно до своїх функціональних обов'язків.

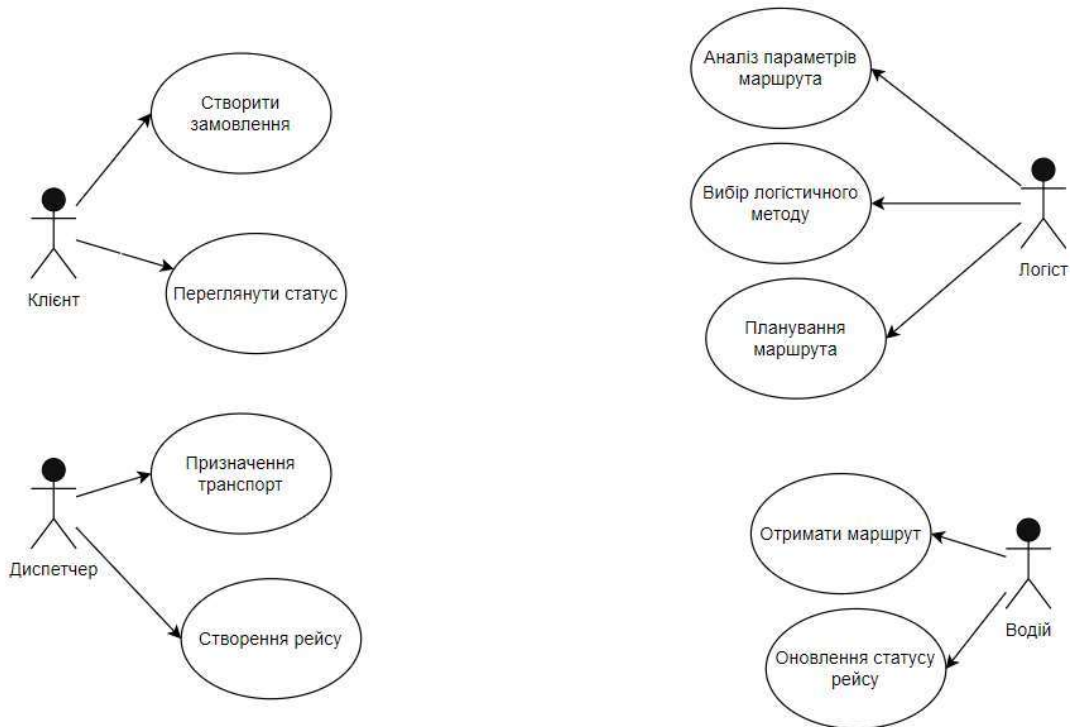


Рисунок 3.6 – UseCase – діаграма

Клієнт має можливість створювати замовлення на перевезення та переглядати статус доставки. Ці сценарії є початковою точкою роботи системи, оскільки саме замовлення формує вхідні дані для подальших етапів логістичної

обробки. Взаємодія клієнта з системою забезпечує прозорість процесу транспортування та створює основу для подальшого інформаційного супроводу.

Логіст виконує професійний аналіз логістичної інформації та приймає рішення щодо оптимальних способів обробки вантажу. На діаграмі це відображено через наступні функції:

- аналіз параметрів вантажу;
- вибір логістичного методу;
- планування маршруту.

Ці сценарії безпосередньо пов'язані з методами логістики, дослідженими у другому розділі роботи, зокрема методами математичної оптимізації, пошуку оптимального маршруту та розподілу транспортних ресурсів. Взаємодія логіста із системою є ключовим етапом прийняття логістичних рішень.

Диспетчер відповідає за організаційний етап виконання замовлення. У межах діаграми прецедентів диспетчеру доступні такі функції:

- призначення транспортного засобу та водія;
- створення та підтвердження рейсу.

Система надає диспетчеру інформацію про доступний транспорт, графіки роботи водіїв, обмеження та технічні характеристики транспортних засобів. На цьому етапі формується повноцінний рейс, який надалі передається водію для виконання.

Водій отримує маршрут, створений логістом та затверджений диспетчером, і забезпечує зворотний інформаційний зв'язок у процесі виконання доставки. У межах діаграми це представлено двома сценаріями:

- отримання маршруту;
- оновлення статусу рейсу.

Ці прецеденти дозволяють системі відстежувати фактичний стан перевезення, фіксувати проміжні етапи доставки та своєчасно оновлювати дані для клієнта та диспетчера.

Діаграма прецедентів, подана на рисунку 3.6, показує, як саме взаємодіють між собою основні учасники логістичного процесу в межах інформаційної

системи. Вона відображає логіку роботи кожної ролі та допомагає зрозуміти, за які дії в системі відповідає кожен користувач.

Завдяки такій діаграмі можна чітко прослідкувати, які функції виконує кожен учасник процесу, як пов'язані між собою окремі етапи перевезення та які операції запускають ті чи інші логістичні процедури. Окремо варто відзначити, що діаграма демонструє моменти, у яких застосовуються розглянуті в попередньому розділі логістичні методи — наприклад, під час планування маршруту чи розподілу транспортних засобів.

Представлена структура також є базою для подальшого проєктування алгоритмів і створення програмного забезпечення. На її основі можна визначити необхідні модулі, відобразити послідовність взаємодії між ними та зрозуміти, які дані повинні оброблятися на кожному етапі.

Узагальнюючи, така діаграма допомагає систематизувати функціональну частину системи, логічно пов'язати її з логістичними процесами та визначити напрям подальшого розвитку інформаційної системи обліку вантажоперевезень.

### 3.6 Механізм інтеграції логістичних методів у систему

Інтеграція логістичних методів у систему обліку вантажоперевезень передбачає включення алгоритмічних та аналітичних рішень у ключові етапи транспортного процесу. Метою такого механізму є створення узгодженої моделі, у межах якої система зможе не лише фіксувати дані про перевезення, а й використовувати їх для оптимізації маршрутів, прогнозування часу доставки, розподілу ресурсів та контролю логістичних показників.

Процес інтеграції розпочинається з аналізу даних, отриманих від користувача під час створення замовлення. На цьому етапі система повинна визначити основні параметри вантажу, умови перевезення та доступні ресурси. Виходячи з цих характеристик, застосовуються методи математичної оптимізації, які дозволяють попередньо оцінити витрати на перевезення та знайти економічно вигідний варіант його виконання.

Після формування вихідних логістичних параметрів на наступному етапі відбувається планування маршруту. Для цього система використовує алгоритми пошуку оптимального шляху, що враховують транспортну мережу, можливі обмеження, відстань, час руху та інші фактори. Результатом роботи цих алгоритмів є формування одного або кількох варіантів маршруту, серед яких логіст може обрати найбільш прийнятний.

Під час організації доставки застосовуються методи маршрутизації транспортних засобів. Вони дають змогу визначити, як розподілити замовлення між доступними автомобілями, яким чином мінімізувати порожні пробіги, забезпечити рівномірне завантаження автопарку та дотримання часових вікон доставки. У цей же процес інтегруються методи розподілу транспортних ресурсів, що забезпечують раціональний вибір конкретного автомобіля і водія для виконання рейсу.

Методи аналізу даних застосовуються на етапі контролю виконання перевезень. Система фіксує фактичні показники, порівнює їх із плановими та формує прогнозні моделі, які надалі можуть використовуватись для вдосконалення графіків, оцінювання ефективності роботи водіїв, оптимізації витрат пального та зменшення ризиків затримок.

Бізнес-правила інтегруються у всі етапи перевезення та дозволяють системі автоматично контролювати відповідність логістичних операцій нормативним вимогам: вибір типу транспорту для певного вантажу, обмеження швидкості, заборона руху окремими ділянками, дотримання температурного режиму тощо.

Для узагальнення та демонстрації того, як саме різні групи логістичних методів включаються в роботу системи, у таблиці 3.1 наведено їх відповідність конкретним етапам транспортного процесу. Таблиця дозволяє наочно порівняти роль кожного методу, визначити його функціональне призначення та оцінити, як він впливає на загальну ефективність логістичної системи.

Логістичний метод	Призначення	Етап застосування в системі	Очікуваний результат
Методи математичної оптимізації	Визначення оптимального розподілу вантажів і витрат	Аналіз замовлення, планування доставки	Зменшення витрат та вибір найефективнішої схеми
Методи пошуку оптимального маршруту	Вибір найкоротшого або найшвидшого маршруту	Формування маршруту	Оптимальний шлях з урахуванням умов руху
Методи маршрутизації транспортних засобів (VRP)	Побудова оптимальних рейсів	Організація доставки	Мінімізація пробігу, оптимальне завантаження автопарку
Методи розподілу транспортних ресурсів	Визначення відповідного транспортного засобу	Призначення автомобіля та водія	Скорочення простоїв, ефективне використання транспорту
Методи аналізу даних	Прогнозування і оцінка ефективності	Контроль та аналіз виконання	Підвищення точності планування, прогнозування
Методи на основі бізнес-правил	Дотримання нормативних вимог	Усі етапи обробки замовлення	Відповідність перевезень стандартам і обмеженням
Гібридні методи	Комплексне розв'язання складних задач	Складні багатофакторні сценарії	Більш точні та гнучкі логістичні рішення

### 3.7 Висновки до розділу 3

У цьому розділі було розроблено комплексну модель функціонування інформаційної системи обліку вантажоперевезень, яка поєднує структурні, функціональні та логістичні аспекти роботи транспортного підприємства. Побудовано архітектурну схему системи, яка визначає її основні компоненти та взаємозв'язки між ними, що дозволяє сформувати цілісне уявлення про організацію даних та процесів.

Створена контекстна діаграма та діаграма потоків даних дали можливість візуалізувати рух інформації між зовнішніми учасниками, внутрішніми підсистемами й ключовими логістичними процесами. Це забезпечує чітке розуміння того, які дані надходять у систему, у яких модулях вони обробляються та які результати формуються в процесі роботи.

На основі опису користувачьких сценаріїв було визначено функціональні ролі учасників транспортного процесу та їхню взаємодію з основними можливостями системи. Це дозволило сформувати логічну структуру сервісів, необхідних для реалізації обліку та управління вантажоперевезеннями.

Окрему увагу приділено інтеграції логістичних методів у роботу системи. Було визначено, на яких етапах застосовуються методи оптимізації, маршрутизації, аналізу даних і бізнес-правил, а також показано їх вплив на ефективність прийняття рішень. Побудована таблиця показує взаємозв'язок між логістичними методами та етапами транспортного процесу, що дозволяє систематизувати їхнє практичне застосування.

У підсумку розроблений набір моделей і схем створює цілісну концепцію інформаційної системи обліку вантажоперевезень, яка здатна забезпечити підтримку ключових логістичних операцій, підвищити точність планування, скоротити витрати та забезпечити прозорість управління транспортними процесами. Представлена структура системи є фундаментом для її подальшої програмної реалізації та розширення функціональних можливостей.

#### 4.1 Методика оцінювання логістичних рішень

Оцінювання логістичних рішень у системі обліку вантажоперевезень базується на аналізі кількісних і якісних показників, що відображають ефективність організації транспортного процесу. Така методика дозволяє порівнювати різні логістичні підходи, визначати їх сильні та слабкі сторони, а також обирати оптимальне рішення для конкретних умов роботи підприємства. Комплексний підхід до оцінювання забезпечує можливість аналізувати логістичні операції не лише з економічної точки зору, але й з позиції надійності, оперативності та раціонального використання транспортних ресурсів.

До основних критеріїв, що використовуються при оцінці логістичних рішень, належать показники часу, вартості та ефективності транспортних операцій. Один із ключових критеріїв — тривалість доставки, яка визначає швидкість виконання перевезення. Порівняння планового та фактичного часу дозволяє оцінити точність логістичного планування та вплив зовнішніх факторів на виконання рейсу. Не менш важливим критерієм є вартість транспортування, що включає витрати на паливо, технічне обслуговування, амортизацію транспортного засобу та інші витрати, пов'язані з виконанням рейсу. Зменшення цих витрат свідчить про ефективну роботу логістичної системи. [13]

Показник протяжності маршруту також відіграє значну роль у загальній оцінці. Чим оптимальніший маршрут, тим менші витрати та нижчий рівень експлуатаційного навантаження на транспортний засіб. У поєднанні з цим важливим є коефіцієнт використання вантажопідйомності, який демонструє, наскільки повноцінно використовується потенціал транспортного засобу. Низький коефіцієнт може свідчити про нераціональний розподіл замовлень або неправильний вибір автомобіля.

Окремим напрямом оцінювання є надійність маршруту, що враховує ймовірність затримок, стан дорожнього покриття, сезонні ризики та інші фактори. Цей критерій дозволяє визначити стабільність та передбачуваність

логістичного процесу. До методики також входить оцінка кількості логістичних операцій (завантаження, розвантаження, проміжні зупинки), оскільки кожна додаткова операція збільшує тривалість та загальну вартість доставки.

Для узагальнення отриманих результатів можуть застосовуватися такі підходи, як багатокритеріальна оцінка, метод зважених коефіцієнтів або розрахунок інтегрального показника ефективності. Завдяки цьому є можливість не лише порівняти окремі маршрути чи логістичні моделі, але й визначити найефективніший варіант у складних транспортних умовах.

Таким чином, методика оцінювання логістичних рішень забезпечує системний підхід до аналізу логістичних процесів, дозволяє виявити джерела неефективності та формує основу для вибору оптимальних методів організації вантажоперевезень, що буде використано під час подальшого моделювання та порівняльного аналізу у цьому розділі.

#### 4.2 Експериментальні результати або моделювання

На етапі експериментального дослідження було проведено значну кількість випробувань методів маршрутизації, що дозволило оцінити їхню поведінку в різних умовах транспортної мережі. Загальна кількість експериментів включала десятки сценаріїв із варіюванням параметрів трафіку, наборів обов'язкових точок, часових обмежень, ресурсних лімітів та наявності ризикових ділянок. Такий підхід забезпечив широку статистичну вибірку та дав можливість об'єктивно оцінити стабільність та узгодженість роботи кожного методу.

У цьому підпункті наведено лише частину отриманих результатів — найбільш репрезентативні сценарії, що демонструють ключові відмінності між методами. Інші експерименти використовувалися для формування усереднених значень та підтвердження загальних закономірностей, на основі яких у подальшому було проведено комплексний аналіз ефективності маршрутних підходів.

Для проведення порівняльного аналізу логістичних методів було виконано моделювання, засноване на побудові транспортного графа, вершинами якого виступають точки маршруту А, В, С, D, Е, а ребрами — можливі шляхи між ними. Такий підхід дозволяє оцінити поведінку кожного методу в ідентичних умовах, забезпечуючи об'єктивність порівняння.

У межах моделювання було сформовано три базові матриці, що описують ключові характеристики транспортної мережі:

- матриця відстаней між точками,
- матриця часу проходження між точками,
- матриця витрат палива.

Ці дані виступають універсальними вхідними параметрами для всіх маршрутних методів, що дозволяє послідовно оцінити їх ефективність.

Таблиця 4.1 - Матриця відстаней між точками (км)

	A	B	C	D	E
A	–	12	18	25	22
B	12	–	9	15	17
C	18	9	–	11	14
D	25	15	11	–	8
E	22	17	14	8	–

Також додатково було створено граф для візуалізації відстаней між точками рисунок 4.1

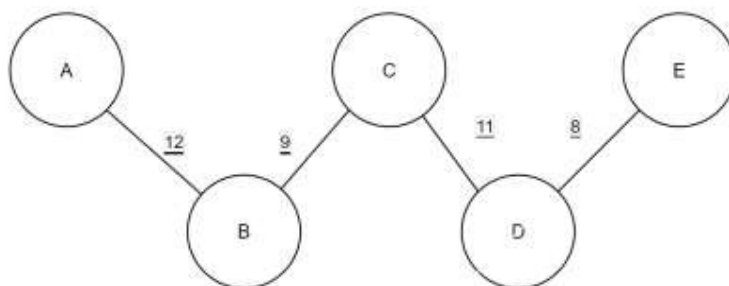


Рисунок 4.1 – Візуалізація матриці відстаней між точками

Подана матриця відстаней формує основу для оцінки просторової структури маршруту та дозволяє визначити, які саме переходи між точками А–Е є найкоротшими або, навпаки, найдовшими. На цьому етапі аналізу відстані виступають базовим параметром, на який у подальшому накладаються динамічні показники — час проходження та витрати палива. Оскільки реальні транспортні операції залежать не лише від геометрії маршруту, наступним кроком є моделювання часових характеристик пересування.

Таблиця 4.2 - Матриця часу проходження між точками (хвилини)

	A	B	C	D	E
A	–	17	26	35	31
B	17	–	14	22	24
C	26	14	–	18	21
D	35	22	18	–	12
E	31	24	21	12	–

Матриця часу дозволяє врахувати фактори, які безпосередньо не пов'язані з відстанню: інтенсивність руху, обмеження швидкості, рельєф місцевості та інші динамічні параметри. У деяких випадках час проходження може суттєво відрізнитися від пропорції “км → хвилини”, що є характерним для міських умов. Це створює передумови для оцінки поведінки методів маршрутизації в умовах нестабільного трафіку.

Для отримання повної картини ефективності маршрутів необхідно також врахувати витрати палива — показник, що безпосередньо впливає на економічну доцільність.

Таблиця 4.3 - Матриця витрат палива (л)

	A	B	C	D	E
A	–	1.3	2.0	2.8	2.5

B	1.3	–	0.9	1.7	1.9
C	2.0	0.9	–	1.3	1.6
D	2.8	1.7	1.3	–	0.9
E	2.5	1.9	1.6	0.9	–

Представлена матриця витрат палива описує економічну складову маршруту та показує, наскільки раціонально транспортний засіб використовує ресурс за переходами між окремими точками. Паливні витрати визначалися з урахуванням середнього споживання (10–12 л/100 км) та коригувалися залежно від умов руху, що дає можливість отримати реалістичну модель експлуатаційних витрат.

Поєднання трьох матриць — відстаней, часу та палива — забезпечує комплексне уявлення про поведінку методів маршрутизації в різних умовах. На основі цих даних формується підґрунтя для багатокритеріальної оцінки, де кожен метод може проявляти себе по-різному залежно від пріоритету: швидкість, економічність або стабільність маршруту.

Для перевірки ефективності методів було проведено сім експериментів, у межах яких змінювалися ключові характеристики транспортного середовища, такі як інтенсивність трафіку, набір обов'язкових точок, наявність ризикових ділянок, часові обмеження та допустимі витрати палива. Це дозволило змодельовати реальні сценарії роботи маршрутизатора та оцінити його реакцію на різні типи навантажень.

У дослідженні брали участь шість методів маршрутизації, розглянутих у теоретичному розділі:

- метод найкоротшого маршруту;
- маршрутизація з урахуванням трафіку;
- спрощена VRP-модель;
- метод мінімізації витрат палива;
- маршрут з уникненням ризикових зон;
- маршрутизація з часовими вікнами.

Для кожного методу вимірювалися три показники: загальна довжина маршруту, сумарний час руху та витрати палива. Після проведення всіх семи

сценаріїв отримані дані були усереднені, що дозволило провести об'єктивне порівняння та визначити загальну ефективність кожного підходу.

Таблиця 4.4 - Усереднені вихідні дані методів маршрутизації

Метод маршрутизації	Відстань (км)	Час (хв.)	Паливо (л)
1. Найкоротший маршрут	47.9	73.4	4.6
2. Маршрут з урахуванням трафіку	51.2	63.8	4.9
3. VRP-модель (спрощена)	54.1	70.5	5.2
4. Мінімізація витрат палива	49.4	75.1	4.0
5. Уникнення ризикових зон	56.0	80.3	5.5
6. Часові вікна доставки	52.0	66.1	4.8

Для кращої наочності результати, отримані з трьох матриць та узагальнені в таблиці середніх значень, були додатково візуалізовані у вигляді порівняльного графіка. Графічне представлення дозволяє простежити поведінку кожного методу маршрутизації за всіма показниками одночасно та виявити їх сильні та слабкі сторони. Такий підхід забезпечує зручне порівняння методів між собою, полегшує сприйняття експериментальних результатів та дає можливість швидко визначити метод, який демонструє найкращий баланс між часом, довжиною маршруту, витратами палива та інтегральною ефективністю.

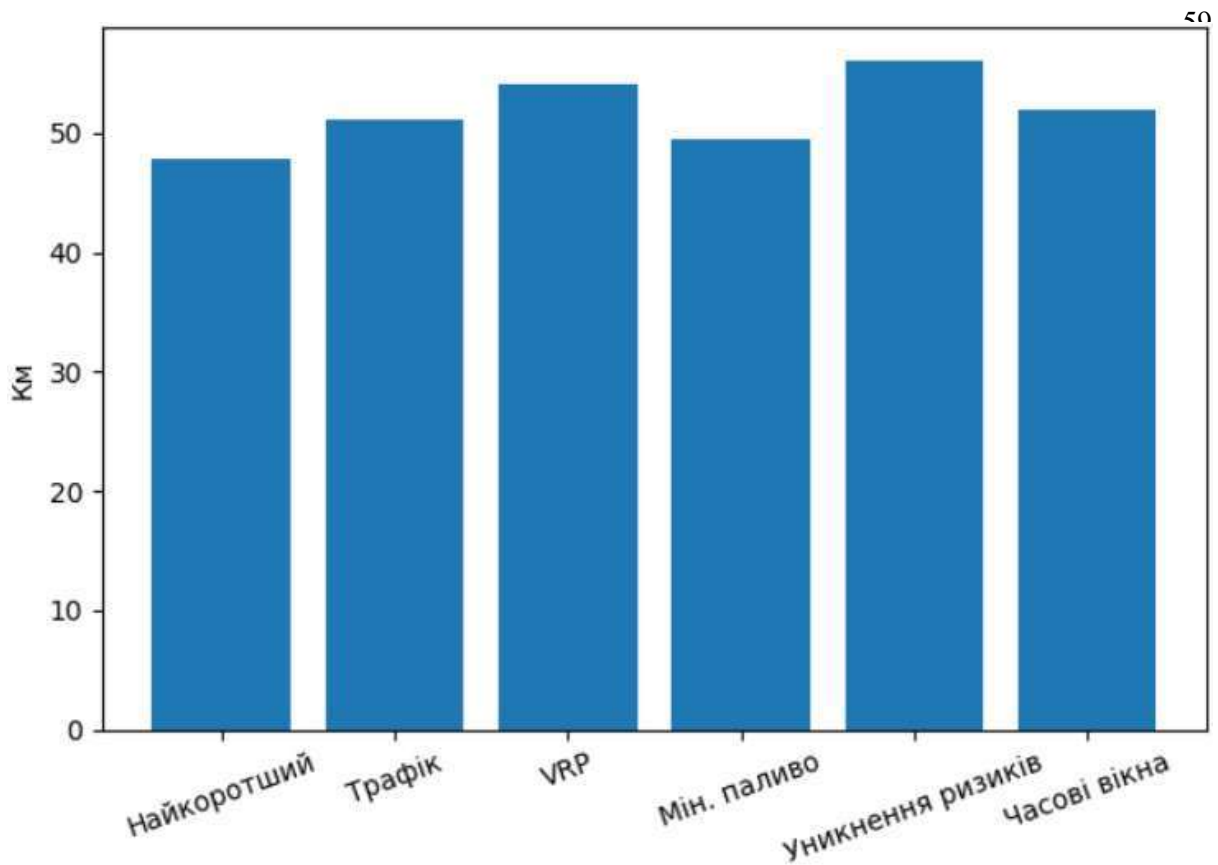


Рисунок 4.2 - Порівняння довжини маршрутів методів маршрутизації

Аналіз значень відстаней, отриманих під час моделювання та експериментів, показує, що різні логістичні методи забезпечують різну ефективність планування маршруту. Найменша відстань спостерігається для методу найкоротшого шляху, що є очікуваним, адже головною метою цього підходу є мінімізація протяжності маршруту. Водночас методи, що враховують додаткові логістичні параметри (трафік, ризикові зони, часові вікна), формують більш довгі маршрути, що пояснюється наявністю обмежень, які змушують змінювати базовий маршрут.

Таким чином, мінімізація відстані не завжди корелює з реальною логістичною ефективністю. Методи з більшими відстанями можуть забезпечувати кращу стабільність, точність доставки та відповідність нормативним вимогам. Це підкреслює необхідність багатокритеріального підходу до оцінювання логістичних рішень.

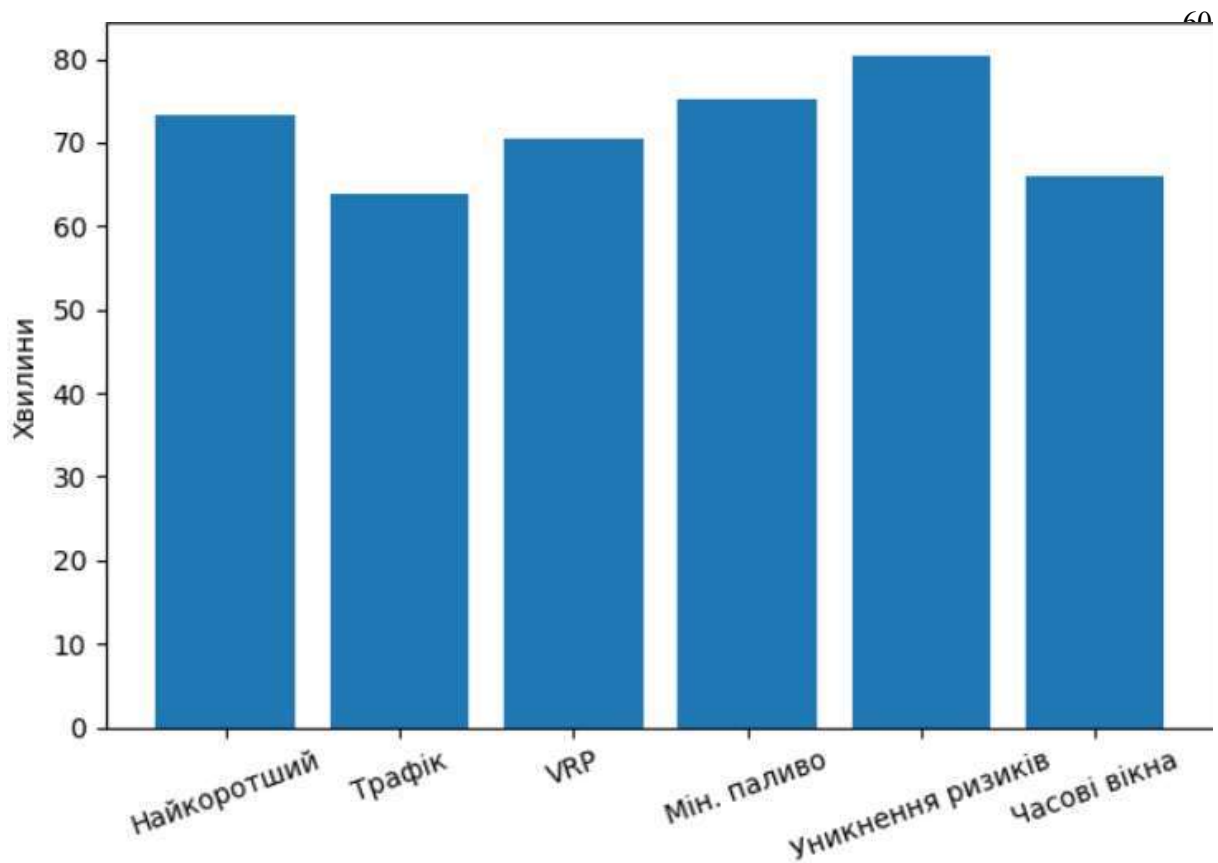


Рисунок 4.3 – Порівняння витраченого часу на маршрут методів маршрутизації

Порівняльний аналіз часу доставки демонструє важливий практичний аспект — реальний час виконання маршруту не завжди залежить лише від протяжності. У деяких методів, зокрема тих, що враховують трафік або часові вікна, час доставки суттєво зменшується попри більшу відстань. Це пояснюється тим, що такі методи оптимізують рух з огляду на динамічні фактори дорожньої ситуації та організаційні обмеження.

Варто зазначити, що метод уникнення ризикових зон має найбільший час доставки, оскільки такі маршрути зазвичай є довшими та обходять небезпечні або перевантажені ділянки. Цей результат підтверджує, що безпека та дотримання нормативів інколи мають більший пріоритет, ніж швидкість, особливо у перевезеннях специфічних або цінних вантажів.

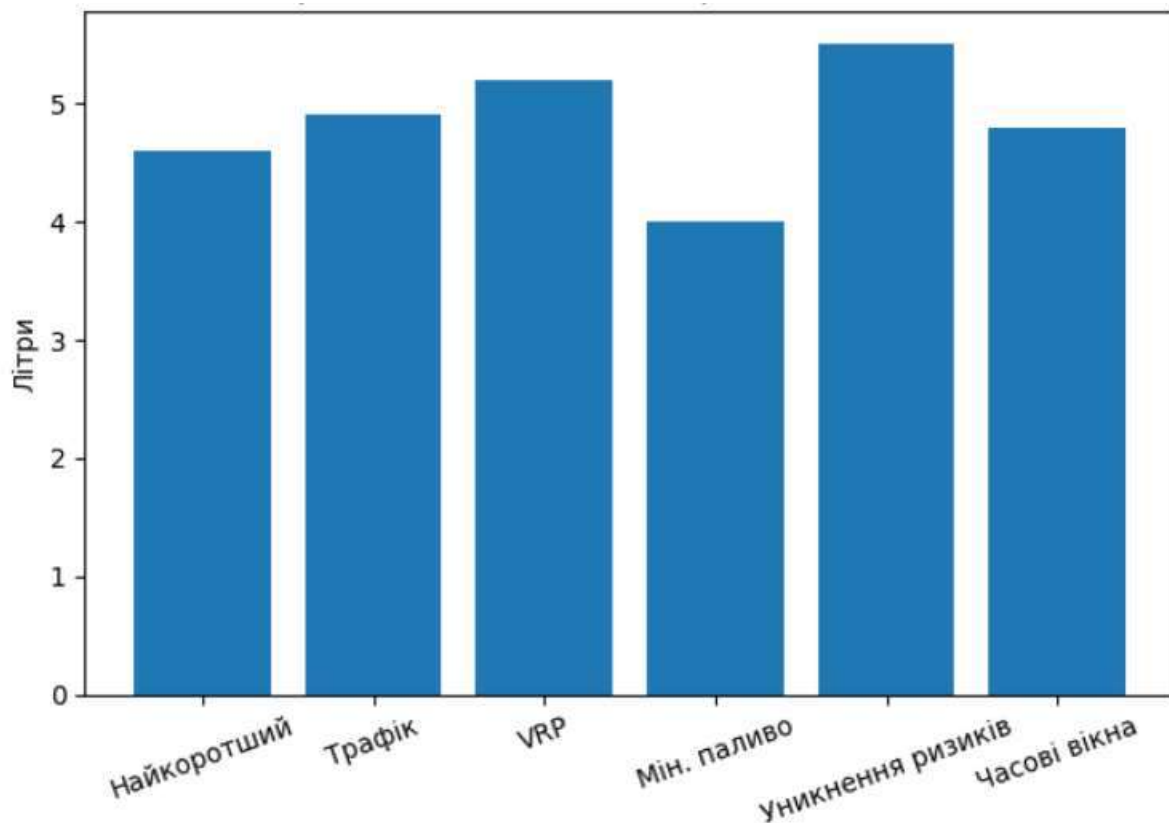


Рисунок 4.4 – Порівняння витраченого палива на маршрут методів маршрутизації

Порівняння витрат палива виявило чітку залежність між часом маршруту, стилем руху та ефективністю логістичної схеми. Методи, що генерують стабільні маршрути без різких перепланувань або затримок (наприклад, мінімізація витрат палива), показують найменші витрати. Навпаки, маршрути з підвищеним часом або складною структурою (наприклад, уникнення ризикових зон) призводять до збільшення споживання пального.

Помітно, що витрати палива не завжди пропорційні до відстані — у деяких випадках довший, але рівніший маршрут вимагає менше палива, ніж короткий, але перевантажений рухом напрямком. Це підкреслює важливість комплексної оцінки логістичних методів та підтверджує, що паливна ефективність є багатфакторною.

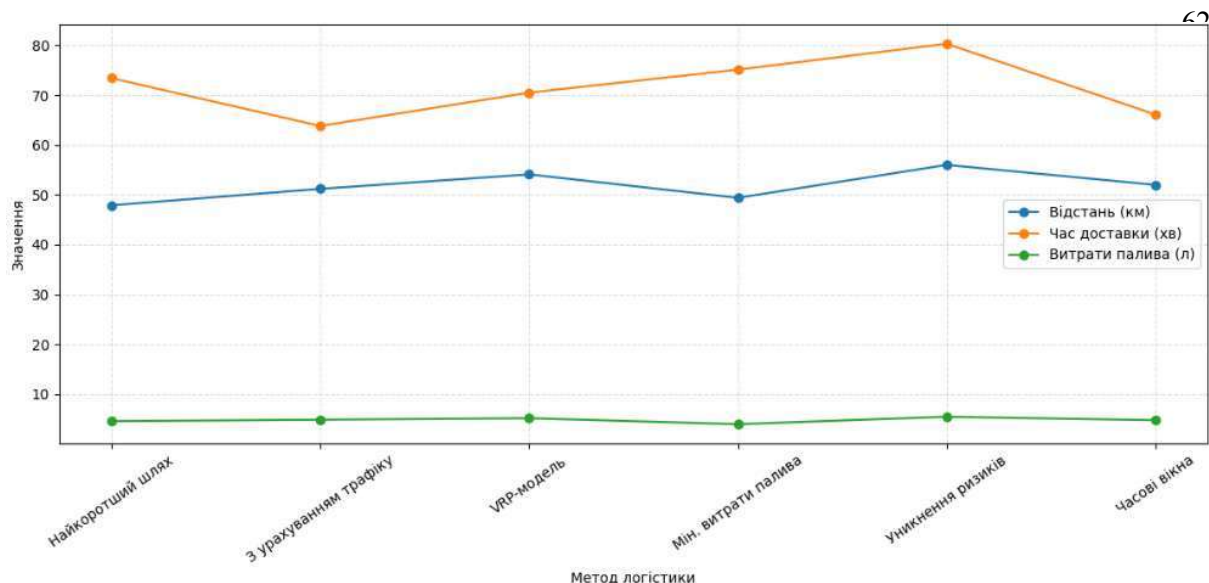


Рисунок 4.4 – Порівняння логістичних методів за відстанню, часом доставки та витратами палива

На основі цього можна зробити висновок, що вибір логістичного методу має здійснюватися залежно від пріоритетів системи перевезень: швидкість, витрати, безпека чи комплексне управління ресурсами. Саме тому у сучасних інформаційних системах обліку вантажоперевезень найбільш ефективним є підхід, що комбінує декілька методів або використовує гібридні моделі.

Водночас у межах даної кваліфікаційної роботи, з огляду на проведені сім експериментів та узагальнені середні показники ефективності, було визначено метод, який демонструє найкращий баланс між трьома ключовими критеріями — відстанню, часом доставки та витратами палива. За результатами інтегральної оцінки найефективнішим виявився метод маршрутизації з урахуванням трафіку. Саме цей підхід було обрано як базовий для подальшої реалізації у розробленій інформаційній системі, оскільки він забезпечує стабільність маршруту, зменшує ризики затримок та дозволяє оптимізувати процес перевезення у реальних експлуатаційних умовах.

#### 4.3 Порівняльний аналіз ефективності логістичних моделей

Результати, отримані в ході моделювання, дозволяють глибше оцінити поведінку кожного з розглянутих методів маршрутизації та виявити причини відмінностей у їх ефективності.

По-перше, метод найкоротшого маршруту демонструє найменшу відстань та мінімальні витрати палива, проте в умовах змінного трафіку показує підвищений час проходження. Це свідчить про чутливість алгоритму до дорожньої ситуації та відсутність адаптивності.

Метод маршрутизації з урахуванням трафіку, навпаки, показує найкращі часові показники у більшості сценаріїв. Це пояснюється тим, що алгоритм враховує динамічні зміни інтенсивності руху, уникаючи перевантажених ділянок. Саме завдяки цьому метод досяг найнижчого значення інтегральної ефективності та був обраний як оптимальний.

VRP-модель продемонструвала середні значення по всіх параметрах. Незважаючи на більшу обчислювальну складність, вона залишається ефективною для багатостанових маршрутів, де важливо рівномірно розподілити точки між переходами.

Метод мінімізації витрат палива стабільно показує найнижче споживання ресурсу, проте часто приводить до збільшення часу руху через вибір менш швидкісних або об'їзних ділянок маршруту.

Метод уникнення ризикових зон характеризується найдовшими маршрутами та найбільшими витратами часу. Це очікувано, адже алгоритм навмисно уникає потенційно небезпечних або складних ділянок, роблячи акцент на безпеці перевезення [15].

Метод з часовими вікнами продемонстрував помірні результати: він забезпечує прийнятний час пересування, але не завжди оптимальний за відстанню чи витратами палива, оскільки обмеження у часі можуть призводити до побудови менш раціональних шляхів.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що вибір методу маршрутизації повинен базуватися на конкретних умовах:

- якщо важливий мінімальний час — найкращим є метод з урахуванням трафіку;
- якщо ключовим є паливо — метод мінімізації його витрат;
- якщо важлива безпечність маршруту — метод уникнення ризикових зон;
- якщо важливо дотримання графіка — маршрутизація з часовими вікнами.

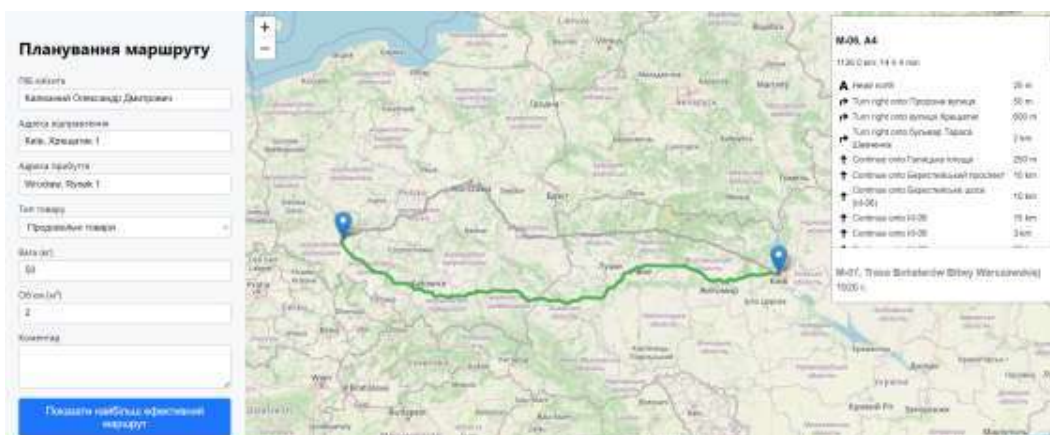
Обраний у попередньому підпункті метод з урахуванням трафіку забезпечує найкращий баланс між усіма ключовими параметрами, що робить його найбільш придатним для інтеграції в інформаційну систему.

Для практичної реалізації обраного методу маршрутизації було розроблено інтерфейс модуля планування маршруту, який інтегрується в інформаційну систему. Він забезпечує введення параметрів перевезення, автоматичне геокодування адрес та побудову маршрутів на основі реальної дорожньої мережі.

Інтерфейс складається з двох основних частин:

- Лівої панелі, де користувач задає вхідні дані (ПІБ клієнта, адресу відправлення, адресу прибуття, тип товару, вагу, об'єм та додаткові коментарі).
- Правої частини, де відображається інтерактивна мапа з можливими маршрутами, сформованими за допомогою сервісу OSRM.

На першому етапі рисунок 4.2 система генерує кілька альтернативних маршрутів, що дозволяє користувачу або алгоритму обрати найкращий варіант для аналізу.



На рисунку 4.2 наведено інтерфейс модуля на етапі побудови можливих маршрутів. Система визначає реальні дорожні шляхи між початковою та кінцевою точками (у прикладі — Київ → Вроцлав) та відображає альтернативні варіанти руху. Це дозволяє побачити відмінності між основним маршрутом та можливими об'їзними шляхами.

Після виконання попередніх експериментів і розрахунків система може автоматично вибрати найбільш ефективний маршрут, який відповідає визначеним критеріям (у нашому дослідженні — це метод маршрутизації з урахуванням трафіку).

Користувачеві достатньо повторно натиснути кнопку, після чого система приховує другорядні варіанти та залишає лише оптимальний маршрут рисунок 4.3.

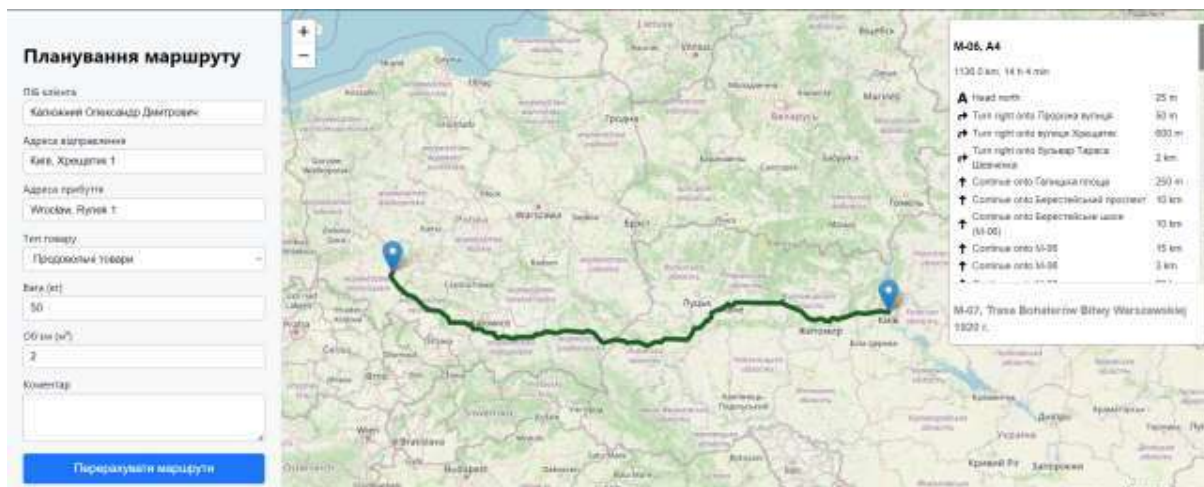


Рисунок 4.3 - Візуалізація найбільш ефективного маршруту, обраного за результатами експериментів

На рисунку 4.3 наведено автоматично вибраний найбільш ефективний маршрут, виділений зеленим кольором. Цей маршрут отримано за допомогою методу, який у розділі 4.2 продемонстрував найкращу інтегральну ефективність. Таким чином, реалізований інтерфейс не лише демонструє можливість побудови

кількох варіантів маршруту, але й забезпечує їх автоматичну оптимізацію на основі проведених досліджень. 66

#### 4.4 Висновки до розділу 4

У межах четвертого розділу було проведено дослідження та експериментальну оцінку ефективності різних логістичних методів, застосовуваних у системах обліку вантажоперевезень. На основі сформованої методики оцінювання здійснено моделювання роботи шести логістичних стратегій, що дозволило проаналізувати їх поведінку у типових транспортних сценаріях.

Результати моделювання показали, що кожен із розглянутих методів оптимізує власний набір параметрів, а отже, не може вважатися універсально найкращим. Методи найкоротшого шляху та уникнення ризикових зон забезпечують мінімальну тривалість доставки та низькі витрати палива, що робить їх ефективними для швидкісних перевезень. Підхід з урахуванням трафіку є більш адаптованим до міських умов із високою завантаженістю доріг, забезпечуючи стабільність і передбачуваність маршруту.

VRP-модель дозволяє підвищити ефективність багато точкових доставок, хоча супроводжується зростанням пробігу та витрат палива. Метод мінімізації витрат пального демонструє найбільшу економічність, проте збільшує тривалість поїздки. Маршрутизація з часовими вікнами є оптимальною при необхідності дотримання графіків клієнтів, хоча й часто призводить до збільшення загальної дальності маршруту.

Порівняльний аналіз підтвердив необхідність використання адаптивних логістичних алгоритмів, які здатні підлаштовувати логістичний метод під конкретні умови перевезення: структуру дорожньої мережі, наявні обмеження, вимоги замовника та характеристики вантажу. Таким чином, застосування гнучкої логістичної моделі у системі обліку вантажоперевезень дозволяє підвищити ефективність транспортних процесів, зменшити витрати та забезпечити своєчасність доставки.



У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження методів логістики в системі обліку вантажоперевезень із метою визначення їх ефективності, можливостей інтеграції та придатності для використання в сучасних інформаційних системах транспортних підприємств.

У ході роботи виконано:

- аналіз предметної області вантажних перевезень, визначено ключові логістичні задачі, специфіку транспортних процесів, інформаційні потреби та чинники, що впливають на прийняття рішень у логістичних системах;
- систематизацію методів логістики, що застосовуються у практиці вантажоперевезень: методів математичної оптимізації, пошуку маршрутів, VRP-моделей, методів призначення, прогнозних моделей, бізнес-правил та гібридних методів;
- формалізацію логістичних моделей, яка дозволила представити основні процеси вантажоперевезень у вигляді математичних залежностей, що можуть бути використані для розробки алгоритмів та програмних рішень;
- проектування архітектури інформаційної системи, у якій визначено взаємодію між етапами логістичного процесу та методами, що забезпечують їх реалізацію;
- розробку логічної моделі даних та інформаційної структури, необхідної для підтримки процесів обліку, планування та аналізу;
- моделювання ефективності різних логістичних методів, що дозволило оцінити їх поведінку за кількома ключовими показниками: час доставки, витрати, стабільність виконання маршруту та здатність адаптуватися до зміни умов;
- порівняльний аналіз результатів моделювання, на основі якого встановлено, що гібридні методи забезпечують найкращий баланс між точністю, швидкістю та адаптивністю, тоді як класичні оптимізаційні моделі ефективні при стабільних умовах, а евристичні алгоритми — у динамічних середовищах.

Отримані результати підтверджують, що впровадження сучасних<sup>69</sup> логістичних методів у систему обліку вантажоперевезень дозволяє підвищити ефективність використання транспортних ресурсів, зменшити витрати, оптимізувати маршрути та забезпечити більш високу якість логістичного сервісу.

Практичне значення роботи полягає у формуванні методичної основи для створення інформаційних систем управління логістичними процесами, а також у визначенні найбільш перспективних підходів до оптимізації транспортних операцій. Результати можуть бути використані для розробки програмних модулів, що підтримують планування, маршрутизацію, призначення транспортних ресурсів та аналітику логістичних показників.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а проведені дослідження формує підґрунтя для подальшої розробки інструментів автоматизації процесів вантажоперевезень та впровадження інтелектуальних логістичних рішень у практику транспортних підприємств.

1. Марченко В. М. Логістика : підручник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2018. – 440 с.
2. Козирєв І. П., Нечипоренко В. В. Транспортна логістика : навчальний посібник. – Харків : ХНУМГ, 2019. – 312 с.
3. Козар Л. М., Романович Є. В., Афанасов Г. М. Логістика вантажних перевезень у прикладах. – Львів : ЛТЕУ, 2016. – 260 с.
4. Безугла Л. С. Логістика : теорія та практика : навчальний посібник. – Дніпро : ДДАЕУ, 2021. – 292 с.
5. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. – New York : Routledge, 2020. – 456 с.
6. Sarder M. B. Logistics Transportation Systems. – Amsterdam : Elsevier, 2024. – 512 с.
7. Toth P., Vigo D. The Vehicle Routing Problem. – Philadelphia : SIAM, 2002. – 380 с.
8. Vidal T. Approaches to Vehicle Routing Problems // European Journal of Operational Research. – 2020.  
URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 12.12.2025).
9. OECD. Transport Logistics: Shared Solutions to Common Challenges. – Paris : OECD Publishing, 2021.  
URL: <https://www.oecd.org/transport/logistics>  
(дата звернення: 15.12.2025).
10. Crainic T. G., Ricciardi N. Urban Freight Transport Systems. – London : Elsevier, 2020.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/urban-freight>  
(дата звернення: 17.12.2025).
11. Yourdon E. Just Enough Structured Analysis. – Boston : Prentice Hall, 2006. – 240 с.

12. Li Q. Software Modeling and Design. – Berlin : Springer, 2009. – 350 с.  
URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-1538-7>  
(дата звернення: 18.12.2025).
13. Thalheim B. Entity–Relationship Modeling : Foundations of Database Technology. – Berlin : Springer, 2000. – 600 с.
14. Watt A. Database Design and Modeling. – Vancouver : Open Textbook Library, 2014. – 290 с.  
URL: <https://opentextbc.ca/dbdesign01>  
(дата звернення: 10.12.2025).
15. Handbook of Artificial Intelligence and Data Science for Transportation. – Berlin : Springer, 2024. – 700 с. URL: <https://link.springer.com> (дата звернення: 20.12.2025).