

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної,
інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра транспортних систем і логістики

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему **Механізм оцінки сталості проектів вантажних
велосипедів для доставки «останньої милі» в містах**

Виконав: студент 2 курсу,
групи М РозТранс 2024-1
спеціальності 275 «Транспортні технології»,
освітньо-наукової програми «Розумний
транспорт і логістика для міст»

Винник О. В.

Керівник Галкін А. С.

Рецензент Давідіч Ю. О.

Харків – 2026 року

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Транспортних систем і логістики

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Магістр

Спеціальність 275 «Транспортні технології»

Освітньо-наукової програми «Розумний транспорт і логістика для міст»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н. проф. Куш Є. І.

“ ” 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Винник Олександр Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Механізм оцінки сталості проектів вантажних велосипедів для
доставки «останньої милі» в містах

керівник проекту (роботи) д.т.н., проф. Галкін Андрій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від № 184-03 від 27.02.2026

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

21.05.2026 р

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Статистика з підприємства

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; Дослідження теоретичних положень; Методологія дослідження; Результати
дослідження; Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Підготовка
презентації у електронному вигляді за основними результатами проекту

Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Антиплагіат (інж. Толмачов І.О.)		

7. Дата видачі завдання 2.03.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційну роботу	Строк виконання етапів роботи (роботи)	Примітка
1.	Дослідження теоретичних положень	15.03.2026	
2.	Методологія дослідження	11.04.2026	
3.	Результати дослідження	14.05.2026	
4.	Оформлення пояснювальної записки	17.05.2026	

Студент


(підпис)

О. В. Винник

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

А. С. Галкін

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з 60 сторінок машинописного тексту, містить 12 ілюстрацій, 8 таблиць і 50 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: транспортна система вантажних перевезень у міському середовищі.

Мета роботи: дослідження нових сталих методів доставки хлібобулочних виробів у міських вантажних системах.

Методи дослідження: аналітичний, статистичний, математичний.

Отримані результати: проаналізовано сучасні підходи до організації сталої доставки хлібобулочних виробів у містах, визначено основні чинники, що впливають на ефективність вантажних перевезень, та обґрунтовано доцільність впровадження екологічно орієнтованих логістичних рішень для підвищення ефективності міської системи доставки.

Рекомендації з впровадження: запропоновано практичні рекомендації щодо використання сталих транспортних рішень для доставки хлібобулочних виробів у міських умовах з урахуванням особливостей маршрутної мережі, характеристик попиту та вимог до підвищення екологічності й ефективності перевезень.

СТАЛА МІСЬКА ЛОГІСТИКА, ВАНТАЖНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ, ДОСТАВКА,
ОСТАННЯ МИЛЯ, ЕКОЛОГІЧНИЙ ТРАНСПОРТ, МІСЬКА ТРАНСПОРТНА
СИСТЕМА

ЗМІСТ

ВСТУП..... 5

РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ..... 7

1.1 Концептуальні засади екологічних вантажних ініціатив у міській логістиці..... 7

1.2 Ключові показники ефективності як інструмент оцінювання зелених вантажних ініціатив..... 12

1.3. Електричні вантажні велосипеди як цільова ініціатива для міської доставки «останньої милі»..... 16

1.4 Висновки по розділу..... 19

РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ..... 20

2.1 Дизайн дослідження та формування вхідних даних..... 20

2.2. Оптимізаційна модель, маршрутизація та формування сценаріїв..... 24

2.3 Оцінювання КРІ та ранжування сценаріїв..... 28

2.4 Висновки по розділу..... 31

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ..... 33

3.1 Серед дослідження..... 33

3.2 Опис даних і параметрів моделювання 36

3.3 Результати сценарного аналізу і порівняння альтернатив..... 42

3.4 Практична імплементація та рекомендації..... 47

3.5 Транспортна політика і цілі сталого розвитку..... 49

3.6 Висновки по розділу..... 50

ВИСНОВКИ..... 52

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 54

ДОДАТКИ..... 60

Додаток А..... 60

ННІЕІТІ ТСЛ МРозТранс2024-1 РозТранс XXX...Х ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Винник О. В.		
Перевір.		Галкин А. С.		
Н.ж.оупр.		Бурко Д. Н.		
Затв.		Куш С. І.		

Пояснювальна записка

Літера	Аркуш	Аркушів
М	р	д

ХНУМГ

ВСТУП

Зростаюча потреба у формуванні сталого міського середовища вимагає інноваційних рішень для зменшення екологічного впливу міської логістики.

Електричні вантажні велосипеди (е-СВ) стають перспективним видом транспорту для доставки «останньої милі», оскільки мають потенціал зменшувати викиди вуглецю, транспортні затори та шумове забруднення.

Окрім прямої логістики, вантажні велосипеди також розглядаються як цінний ресурс для виконання зворотної логістики [1] та сервісних поїздок [2], зокрема для забору повернутих товарів і матеріалів для переробки. Дослідження, такі як [3] і [4], підкреслюють подвійну роль е-СВ як у процесах доставки, так і в процесах повернення, демонструючи їхню корисність для оптимізації міських логістичних систем. Багато сучасних моделей не дають змоги порівнювати суперечливі змінні (наприклад, вантажопідйомність і енергоспоживання) під час вибору екологічних вантажних ініціатив. Крім того, залишаються суттєві прогалини у створенні комплексних рамок, які б задовольняли ці потреби.

Ключова прогалина полягає у недостатньому розумінні оптимальних операційних параметрів систем доставки «останньої милі» на базі е-СВ. Хоча праці [5], [6] і [7] містять важливі ідеї щодо інтеграції логістичних сервісів і принципів Logistics-as-a-Service (LaaS), все ще бракує цілісної рамки, адаптованої саме до е-СВ. Крім того, взаємозв'язок між типами транспортних засобів, логістичними стратегіями та конфігураціями мереж, досліджений у [8] та [9], потребує подальшого вивчення в контексті е-СВ.

Центральне дослідницьке питання полягає в такому: «Як можна оптимізувати параметри системи е-СВ для підвищення ефективності, сталості та загальної придатності міського середовища для життя?» Для відповіді на це запитання стаття має на меті оцінити сервіс доставки на базі е-СВ з використанням емпіричного аналізу даних операцій у Черкаси. Методологія охоплює оптимізацію маршрутів і моделювання.

Отримані результати дають цінні висновки для міських планувальників, політиків і логістичних операторів. Зрештою, це дослідження покликане сприяти розробленню планів сталої міської логістики (SULPs) і підвищенню загальної придатності міського простору для життя.

Структура цієї статті проводить читача крізь особливості «зеленої» міської логістики: від сучасних тенденцій і огляду літератури щодо екологічних вантажних ініціатив, які демонструють важливість е-SV для сталих міських вантажних перевезень, через методологію та результати кейс-стаді до обговорення наслідків дослідження для міського планування та формування політики. Такий комплексний підхід, підкріплений посиланнями на ключові праці у цій галузі, робить внесок у дискурс щодо сталої міської логістики. Він також пропонує цінні висновки й рекомендації для міст усього світу щодо розвитку їхніх стратегій «зеленої» дистрибуції відповідно до Цілей сталого розвитку (SDGs).

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ

1.1. Концептуальні засади екологічних вантажних ініціатив у міській логістиці

Міські вантажні перевезення сьогодні слід розглядати не лише як операційну функцію постачання, а як важливу складову якості міського життя.

Це пов'язано з тим, що транспортна діяльність одночасно забезпечує доступ до товарів і послуг та породжує зовнішні ефекти у формі викидів, шуму,

заторів, зайняття міського простору й ризиків для здоров'я населення. У

міських умовах, де більшість населення вже проживає в урбанізованих територіях, питання екологізації вантажних потоків стає складовою ширшого порядку денного сталої мобільності та міської придатності до життя [4, 11, 21].

У цьому контексті екологічні вантажні ініціативи доцільно визначати як сукупність технічних, організаційних, управлінських і просторово-

регуляторних рішень, спрямованих на зменшення негативного впливу міської логістики без втрати її функціональної спроможності. Таке розуміння

виходить за межі простого переходу на «чистіші» транспортні засоби і

включає питання конфігурації мережі, взаємодії учасників, ролі споживача,

правил доступу та узгодження логістики з міським плануванням. Саме тому green freight initiatives варто аналізувати як багатовимірну систему, а не як окремих технологічний захід [9, 11, 15, 19], наведено в табл 1.1.

Першу групу таких ініціатив утворюють технологічні рішення, пов'язані з вибором транспортного засобу. До них належать електрифікація міського

автопарку, використання легких електричних вантажних транспортних засобів, а також електричних вантажних велосипедів. Їхня перевага полягає у зниженні

локальних викидів і шуму, однак практична результативність залежить від запасу

ходу, вантажопідйомності, інфраструктурної готовності та відповідності типу транспортного засобу конкретному профілю доставки [12–14, 29, 33].

Власність ХНУМГ імені О. М. БекетоваТаблиця 11 Суперечливі цілі та виклики при виборі вантажних ініціативВласність ХНУМГ імені О. М. Бекетова

Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Конфлікт цілей	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Опис	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Виклики	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Посилання
Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Скорочення викидів vs. операційна ефективність	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Використання транспортних засобів з низьким рівнем викидів та електричних фургонів потребує інвестицій і змін інфраструктури, а технологічні обмеження можуть впливати на операційну ефективність.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Потрібно збалансувати початкові витрати та інфраструктурні потреби з показниками операційної ефективності, такими як дальність поїздки та вантажопідйомність; короткострокові та довгострокові вигоди.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	[12–14]
Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Інноваційні технології vs. масштабованість і доступність	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Передові логістичні рішення, такі як спільні платформи доставки та е-СВ, спрямовані на підвищення ефективності й зменшення заторів, але стикаються з проблемами масштабованості та доступності в різноманітних міських умовах.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	Необхідно забезпечити адаптивність і доступність інноваційних технологій у різних міських інфраструктурах та регуляторних середовищах.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова	[15–17]

Продовження табл 1.1
Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова

Конфлікт цілей	Опис	Виклики	Посилання
Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Використання міського простору	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Зелені міські простори та вантажні села підвищують комфорт міського середовища, але конкурують за обмежений міський простір з іншими функціями міста, що ускладнює ефективну організацію вантажних операцій.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Потрібно досягти балансу між оптимізацією вантажної діяльності та потребами житлового, комерційного й рекреаційного використання простору у міському плануванні.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова [18–20]
Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Регуляторні заходи та інтереси стейкхолдерів	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Регуляторні рамки, такі як зони з низьким рівнем викидів і часові обмеження доступу, вимагають балансування інтересів різних зацікавлених сторін, щоб оптимізувати вантажні операції без надмірного навантаження.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова Необхідно розробляти справедливі регуляції, які враховують потреби бізнесу, мешканців і логістичних провайдерів та водночас забезпечують ефективний вантажний потік.	Власність ХНУМГ імені О. М. Бекетова [21–23]

Продовження табл 1.1

Конфлікт цілей	Опис	Виклики	Посилання
Синхромодальні vs. інфраструктурна та координаційна складність	Синхромодальні ініціативи мають на меті оптимізувати використання різних видів транспорту, але стримуються потребою у значній інфраструктурі та складною координацією між стейкхолдерами.	Потрібно реалізовувати інфраструктурні вдосконалення та розвивати багатосторонню координацію для впровадження синхромодальних логістичних рішень.	[24–25, 14]
Фізичний доступ vs. цифровий доступ vs. просторовий доступ	Triple Access Planning координує вантажні перевезення з міським плануванням для врахування вантажних потреб у межах міської мобільності, що вимагає інтеграції вантажних аспектів у моделі транспортного попиту та плани міського розвитку відповідно до акценту Європейської комісії на сталому плануванні міської мобільності.	Реалізація Triple Access Planning стикається з труднощами через відсутність інтегрованих рамок між видами транспорту, обмежені дані про вантажопотоки, опір стейкхолдерів пріоритезації довгострокових цілей над короткостроковими вигодами та складність міського середовища з конкуруючими просторовими потребами.	[26–28]

Другу групу становлять організаційно-логістичні рішення, пов'язані з консолідацією потоків, спільним використанням ресурсів, цифровими платформами та новими сервісними моделями. Дослідження показують, що саме на цьому рівні виникає потенціал для поєднання економічної та екологічної ефективності, але водночас з'являються ризики координаційної складності, конфлікту інтересів між операторами і труднощів масштабування. Отже, інноваційність системи визначається не тільки технологією доставки, а й здатністю узгодити бізнес-моделі, інформаційні потоки та правила взаємодії учасників [7, 9, 17, 44].

Третім важливим виміром є просторовий аспект. Екологічна вантажна ініціатива не може бути ефективною, якщо вона не враховує розміщення логістичних вузлів, мікроконсолідаційних центрів, зон завантаження-розвантаження і доступність вуличної мережі. У цьому сенсі питання міського простору перетворюється на один із головних обмежувачів: навіть екологічно доцільне рішення може виявитися операційно слабким, якщо не вирішено проблему доступу, перевантаження вулиць або невдалого розташування міських хабів [18–20, 30].

Окремо слід виділити регуляторний і стейкхолдерський виміри. Міська вантажна політика рідко реалізується в умовах однорідних інтересів: муніципалітети, перевізники, мешканці, ритейл, кур'єрські служби та споживачі оцінюють одну й ту саму ініціативу по-різному. Саме тому успішність green freight initiatives залежить не лише від технічної оптимальності, а й від рівня участі стейкхолдерів, їхньої зрілості до співпраці та інституційної спроможності міста впроваджувати зміни на основі спільного бачення [21–23].

Подальший розвиток концепції сталих вантажних рішень пов'язаний із переходом від вузько транспортного підходу до інтегрованого бачення доступності. Зокрема, Triple Access Planning підкреслює, що доступ до товарів і послуг формується не лише фізичним переміщенням, а також просторовою близькістю та цифровою взаємодією. Для міської логістики це означає потребу

в ширшому плануванні, яке одночасно враховує транспорт, землекористування, цифрові сервіси та майбутні сценарії попиту [26–28].

Таким чином, конфлікти, наведені в таблиці І, не є випадковими чи тимчасовими. Вони відображають структурну складність міської логістики, де екологічний ефект, операційна надійність, масштабованість, справедливість регулювання і просторове вписування в місто мають розглядатися одночасно. Саме з цієї причини подальший аналіз потребує не лише класифікації ініціатив, а й системи показників, здатної фіксувати їхні багатомірні результати [12, 15, 19, 21].

1.2 Ключові показники ефективності як інструмент оцінювання зелених вантажних ініціатив

Після ідентифікації відповідної екологічної вантажної ініціативи постає питання її оцінювання. У цьому контексті Key performance indicators (KPI) виступають не просто набором технічних метрик, а інструментом управління, який забезпечує зв'язок між цілями політики, операційними рішеннями та фактичними результатами системи. Для міської логістики це особливо важливо, оскільки ефективність заходу має підтверджуватися не декларативно, а через вимірювані результати, релевантні і для операторів, і для органів влади [19, 21, 23].

Вибір KPI повинен узгоджуватися з ширшими рамками сталої мобільності та міського розвитку. SDG 11 прямо пов'язує сталий розвиток міст із транспортом, доступністю та якістю міського середовища, а європейська логіка планів сталоного розвитку міської мобільності та логістики SUMP/SULP вимагає врахування потреб як людей, так і бізнесу в містах. Тому система показників для зелених вантажних ініціатив (green freight initiatives) має фіксувати не лише внутрішню ефективність доставки, а й внесок у ширші цілі сталості, зокрема декарбонізацію, доступність і покращення якості життя [27, 35], наведено в табл. 1.2

Найбільш очевидною групою КРІ є екологічні показники, передусім викиди та енергоспоживання. Саме вони найчастіше використовуються для обґрунтування переходу до низьковуглецевих транспортних рішень. Водночас сучасні праці підкреслюють, що оцінювання має враховувати не лише формальний факт переходу до «зеленого» транспорту, а й реальне співвідношення між енергетичною та транспортною ефективністю, оскільки оптимізація за одним із цих критеріїв не завжди автоматично забезпечує покращення за іншим [8, 29, 32–35].

Не менш важливою є група операційних КРІ, що відображають часову й економічну результативність. Для міських операторів критичне значення мають тривалість доставки, дотримання часових вікон, вартість обслуговування замовлення, а також загальний пробіг транспортних засобів. Дослідження міської доставки стабільно показують, що екологічна доцільність рішення не може бути відірвана від сервісної надійності, інакше навіть перспективна ініціатива не буде масштабована ринком [4, 29, 44–47, 49–50].

Окрему аналітичну цінність мають показники використання місткості транспортного засобу: коефіцієнт завантаження, коефіцієнт завантаженого пробігу та вантажопідйомність. Для green freight initiatives саме ці показники часто виявляються вузьким місцем, оскільки зниження викидів може супроводжуватися зменшенням корисного об'єму чи маси перевезення. Для е-СВ це питання особливо важливе, адже надмірне навантаження впливає не тільки на перевізну спроможність, а й на швидкість руху, витрати енергії та виконання часових вікон [8, 36–43].

Водночас жоден окремий КРІ не є достатнім для всебічної оцінки green freight initiative. Зменшення пробігу може супроводжуватися зростанням витрат на консолідацію, покращення коефіцієнта завантаження, подовженням часу доставки, а мінімізація витрат, погіршенням екологічного профілю рішення. Саме тому оцінювання має спиратися на збалансований набір показників, що дозволяє виявляти компроміси і не підміняти системну ефективність досягненням одного локального максимуму [4, 19, 44].

Ще одна проблема пов'язана з доступністю та якістю даних. Для багатьох міст і операторів дані щодо вантажопотоків, фактичних маршрутів, завантаження транспортних засобів чи сервісних зупинок залишаються фрагментарними. У таких умовах відбір КРІ має враховувати не лише теоретичну важливість показника, а й можливість його стабільного вимірювання, а також рівень зрілості стейкхолдерської взаємодії, необхідної для обміну даними між учасниками системи [21, 23, 28].

Таблиця 1.2 – Визначені КРІ для екологічних вантажних ініціатив

Key performance indicators (KPI) та посилення	Опис	Значущість
Вуглецеві викиди [32–33]	Вимірює зменшення парникових газів (CO ₂ , NO _x , PM) завдяки використанню е-СВ.	Показує внесок у покращення якості повітря та зменшення впливу на зміну клімату.
Енергоспоживання [8, 34–35]	Оцінює використання палива / енергії, підкреслюючи енергоефективність дистрибуційної мережі.	Відображає потенціал енергозбереження «зелених» транспортних засобів порівняно з традиційними.
Коефіцієнт завантаження транспортного засобу [36–37]	Оцінює ефективність використання місткості транспортного засобу.	Вищий коефіцієнт завантаження зменшує кількість поїздок і дорожні затори.
Коефіцієнт завантаженого пробігу [38–40]	Оцінює частку використання місткості транспортного засобу в завантаженому стані під час перевезення відносно загальної відстані.	Вищі значення свідчать про ефективніше використання місткості, що веде до меншої кількості поїздок і нижчих викидів.

Продовження табл 1.2

Key performance indicators (KPI) та посиалання	Опис	Значущість
Вантажопідйомність транспортного засобу [41–43]	Вимірює максимальне навантаження, яке може перевозити транспортний засіб	Забезпечує здатність мережі ефективно працювати з різними розмірами та обсягами вантажів.
Кілометри пробігу транспортних засобів(VKT) [4, 44–45]	Загальна відстань, яку долають усі транспортні засоби в мережі.	Зменшення VKT свідчить про ефективну маршрутизацію та зниження транспортних заторів.
Час доставки [46–48]	Контролює своєчасність доставок у межах мережі.	Забезпечує ефективність мережі з погляду управління часом і задоволеності клієнтів.
Вартість доставки [29, 49–50]	Визначає економічну ефективність процесу доставки.	Нижчі операційні витрати є наслідком меншого споживання палива та менших потреб у технічному обслуговуванні.

Отже, таблиця 2 у цій роботі виконує подвійну функцію. З одного боку, вона систематизує найбільш уживані KPI у дослідженнях green freight initiatives; з іншого, формує аналітичне підґрунтя для вибору саме тих показників, які є релевантними для оцінювання е-СВ у середньому місті. Для подальшого емпіричного аналізу це означає необхідність одночасного врахування екологічних, енергетичних і логістичних критеріїв, а не орієнтацію лише на один із них [8, 33, 35].

1.3. Електричні вантажні велосипеди як цільова ініціатива для міської доставки «останньої милі»

Серед усіх green freight initiatives електричні вантажні велосипеди займають особливе місце, оскільки поєднують низький екологічний слід, маневреність у щільному міському середовищі та відносно невисокі бар'єри входу порівняно з частиною інших інноваційних рішень, рис. 1.1.

Узагальнювальний огляд досліджень показує, що e-cargo cycles мають найбільший потенціал там, де структура попиту відповідає коротким і частим міським поїздам, а умови мережі дозволяють використати переваги малогабаритного транспорту [29, 31, 33].



Рисунок 1.1 – Два приклади вантажних велосипедів. DHL [15] і UPS [29]
використовують вантажні велосипеди у своїх стратегіях розподілу посилок у Європі та США

17

Перевага е-СВ полягає також у функціональній гнучкості. На відміну від вузького трактування, за якого вантажний велосипед розглядається лише як інструмент прямої доставки дрібних посилок, сучасна література демонструє ширший спектр можливих застосувань. Зокрема, е-СВ можуть бути інтегровані у сервісні поїздки, процеси повернення товарів і елементи зворотної логістики, що суттєво підвищує їхню системну цінність у міських логістичних ланцюгах [1–4].

Для міст середнього розміру, подібних до Пардубице, е-СВ є особливо цікавими, оскільки вони потенційно дозволяють уникнути частини проблем великих агломерацій без втрати основних переваг cycle logistics. На відміну від мегаполісів, де критичними стають надскладні багаторівневі мережі та високий просторовий тиск, у середніх містах легше організувати короткі плечі доставки, локальні хаби та комбіновані схеми обслуговування. Водночас саме для таких міських контекстів емпіричних робіт усе ще недостатньо, тому переносити результати з дуже великих міст без адаптації було б методологічно ризиковано [29–31].

Разом із тим, потенціал е-СВ не є універсальним і залежить від конкретних операційних обмежень. До них належать допустиме навантаження, топографія маршруту, щільність зупинок, часові вікна доставки, погодні умови, потреба у перезавантаженні партій товару та характер попиту. Особливо важливо, що для вантажних велосипедів маса вантажу впливає не лише на вантажопідйомність як таку, а й на швидкість руху, а отже — на реальну часову ефективність маршруту [8, 29, 33].

Саме тому оптимізація е-СВ системи не може обмежуватися класичним підходом до маршрутизації. Праця Fontaine [8] показує, що ігнорування залежності часу руху від навантаження та ухилу вулиць здатне призводити до неефективних або навіть нереалістичних рішень. Для цього дослідження це означає, що оцінювання е-СВ має спиратися на реалістичні припущення про масу вантажу, характеристики вуличної мережі та вплив цих чинників на виконання доставки [8].

Не менш важливим є мережевий рівень організації. Результативність е-СВ значною мірою залежить від того, чи працює система напряму з одного депо, чи через мікроконсолідаційні центри, проміжні хаби або змішані схеми взаємодії з традиційними транспортними засобами. Дослідження щодо міських дистрибуційних центрів і mixed-fleet policies показують, що саме поєднання просторової організації та вибору типу транспорту визначає реальний баланс між витратами, покриттям зони обслуговування та екологічним ефектом [3, 30, 44].

Ще одним перспективним напрямом є інтеграція споживача у систему міської логістики. Концепція Logistics-as-a-Service демонструє, що поведінка отримувача може бути не лише зовнішнім обмеженням, а й активним елементом оптимізації: через вибір часових слотів, умов доставки та рівня сервісу споживач впливає на стійкість усієї системи. Для е-СВ це особливо важливо, адже такі системи найкраще працюють там, де можлива координація попиту і сервісних очікувань із реальними можливостями циклічної доставки [7].

Отже, ключова наукова прогалина полягає не в доведенні того, що е-СВ «загалом корисні», а у визначенні конкретних параметрів, за яких вони стають справді ефективними для певного міського контексту. До таких параметрів належать місткість транспортного засобу, структура маршрутів, конфігурація мережі, роль хабів, профіль попиту, часові вікна і набір KPI, через які оцінюється результативність. Саме тому поєднання емпіричного аналізу з моделюванням і сценарною оцінкою виглядає найбільш доречним підходом для дослідження е-СВ у Черкасах [4, 8, 29–31].

У межах цієї логіки е-СВ слід розглядати не як універсальну заміну всіх міських вантажних транспортних засобів, а як спеціалізований елемент інтегрованої системи доставки «останньої милі». Їхня ефективність найімовірніше проявляється там, де міське середовище, попит і мережева організація створюють умови для коротких маршрутів, високої частоти зупинок і необхідності зменшення зовнішніх ефектів у центральних зонах. Це і визначає фокус подальшого методологічного аналізу в даній роботі [3, 4, 29, 31, 44].

1.4. Висновки до розділу

Проведений огляд показує, що екологічні вантажні ініціативи формують складне поле рішень, у якому технологічні, організаційні, просторові та регуляторні аспекти є взаємозалежними. Їх не можна оцінювати ізольовано, оскільки успішність міської логістичної політики визначається одночасно рівнем екологічного ефекту, операційної надійності, просторової придатності та прийнятності для стейкхолдерів. Саме тому конфлікти, відображені в таблиці 1, мають розглядатися як вихідна аналітична рамка подальшого дослідження [12, 19, 21, 23].

Другим ключовим висновком є те, що система KPI для green freight initiatives повинна бути багатовимірною. Екологічні індикатори, такі як викиди та енергоспоживання, є необхідними, але недостатніми без поєднання з показниками часу доставки, вартості, пробігу, завантаження та вантажопідйомності. У цьому сенсі таблиця 2 формує не лише огляд літератури, а й практичну основу для відбору показників, придатних для оцінювання е-СВ систем у конкретному міському контексті [8, 29, 33, 35, 44].

Нарешті, аналіз літератури підтверджує, що електричні вантажні велосипеди є однією з найбільш перспективних ініціатив для доставки «останньої милі», але їхній успіх визначається не загальним екологічним іміджем, а точним налаштуванням операційних параметрів. Це обґрунтовує необхідність переходу від загального опису переваг е-СВ до емпіричної перевірки сценаріїв їх використання у Черкасах, з урахуванням місткості, конфігурації маршрутів, KPI та характеристик мережі. Саме таке завдання і визначає зміст наступного методологічного розділу [4, 8, 29–31].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дизайн дослідження та формування вхідних даних

Методологія цього дослідження розроблена для комплексного

оцінювання доставки за допомогою електричних вантажних велосипедів (е-

СВ) у міському середовищі. Її загальна логіка поєднує емпіричні дані,

транспортно-логістичне моделювання, сценарний аналіз та

багатокритеріальне ранжування результатів. Такий підхід відповідає

сучасному розумінню сталої міської логістики, у якому рішення мають

спиратися на фактичні дані, інтегроване планування та вимірювані показники

ефективності в межах SUMP/SULP-підходів.

Процедура дослідження починається зі збору та підготовки вхідних

даних, які характеризують міську транспортну мережу, просторовий розподіл

попиту, технічні параметри транспортних засобів і можливі місця

розташування міського розподільчого хаба. На основі цих даних розв'язується

задача маршрутизації з обмеженнями за місткістю (CVRP) у поєднанні з

вибором розташування хаба. Далі формуються сценарії, що відрізняються

типом транспортного засобу, його вантажопідйомністю та місцем

розташування хаба. Отримані результати оцінюються за допомогою KPI, після

чого здійснюється нормування, зважування та підсумкове ранжування

сценаріїв. Така послідовність узгоджується з підходами, які поєднують

location-routing, сценарне моделювання та багатокритеріальну оцінку

альтернатив у міській логістиці.

Методологічну схему дослідження відображено на рис. 2.1. У межах цієї

схеми окремі блоки не є ізольованими: параметри мережі впливають на

маршрути, маршрути, на значення KPI, а результати KPI, на підсумковий

рейтинг сценарію. Саме тому методологія побудована як послідовність

взаємопов'язаних етапів, де кожен наступний етап використовує результати попереднього.



Рисунок 2.1 – Методична структура дослідження

Перший етап методології полягає у формуванні цілісної інформаційної бази для моделювання доставки «останньої милі». Для коректного порівняння традиційних транспортних засобів і е-СВ необхідно одночасно врахувати характеристики міської мережі, локалізацію отримувачів, параметри попиту, технічні особливості транспортних засобів і містобудівні обмеження щодо можливого розміщення хабів. У сучасних дослідженнях міської логістики саме така інтеграція даних розглядається як базова передумова для достовірної оцінки альтернативних схем доставки.

Першу групу вхідних даних становлять атрибути транспортної мережі. До них належать геометрія вуличної мережі, довжини ділянок, топологія зв'язків між вузлами, функціональна класифікація вулиць, а також наявності – характеристики, що впливають на часову та енергетичну ефективність руху, наприклад ухил або обмеження на використання певних ділянок. Для е-СВ цей блок є особливо важливим, оскільки в літературі

доведено, що маршрутні рішення для вантажних велосипедів суттєво залежать не лише від відстані, а й від навантаження та параметрів мережі, зокрема профілю місцевості.

Другу групу становлять дані про попит отримувачів. До цього блоку належать GPS-координати клієнтів, величина доставки для кожної точки та, за потреби, додаткові характеристики замовлення. Саме цей масив даних дозволяє перейти від абстрактної мережі до реального набору зупинок, які мають бути включені в маршрути. У контексті CVRP попит на кожній точці є одним із ключових параметрів, оскільки саме він визначає момент вичерпання місткості транспортного засобу та впливає на кількість маршрутів, довжину розвезення і загальний транспортний обсяг роботи.

Третю групу даних формує база транспортних засобів. Її створення передбачає ідентифікацію моделей, доступних на локальному ринку або потенційно придатних для використання в досліджуваному міському середовищі. Для кожного транспортного засобу доцільно фіксувати тип енергоживлення, вантажопідйомність, масу, дальність руху або характерну експлуатаційну автономність, а також інші технічні параметри, здатні впливати на маршрутизацію, час доставки та витрати енергії. Огляд літератури з electric cargo cycles підтверджує, що операційні, технічні та інфраструктурні фактори повинні розглядатися разом при виборі конфігурації флоту.

У цій роботі база транспортних засобів включає як традиційний транспортний засіб з дизельним двигуном, так і набір моделей е-СВ із різною вантажопідйомністю. Такий підхід дозволяє не обмежувати дослідження одним «середнім» велосипедом, а перевірити, як зміна місткості впливає на придатність е-СВ до міської доставки. Це узгоджується з висновками досліджень, у яких підкреслюється, що для e-cargo bikes вибір флоту та конфігурації мережі має вирішальне значення для підсумкових логістичних і екологічних результатів.

Четвертий блок становлять дані про землекористування та можливі місця розташування міського розподільчого центру. До нього належать зонування, містобудівні обмеження, вимоги органів місцевої влади, а також набір допустимих локацій, які можуть виступати як urban distribution hub. У дослідженнях щодо локації міських розподільчих центрів наголошується, що вибір хаба не може здійснюватися лише за геометричною близькістю: він має узгоджуватися з політикою міста, транспортною доступністю та загальною логікою сталого міського планування.

На основі перелічених вхідних даних формуються похідні аналітичні об'єкти, необхідні для моделювання. До них належать граф транспортної мережі, матриця походження-призначення, попит між елементами системи, множина допустимих місткостей транспортних засобів та множина потенційних локацій хаба. У такому вигляді вихідна інформація стає придатною для постановки задачі location-routing і подальшого порівняння сценаріїв.

Окремо слід зазначити, що в більшості сценаріїв відстані розраховуються на основі транспортної мережі, оскільки саме вони краще відображають реальні умови доставки. Водночас для окремих спрощених сценаріїв можуть використовуватися евклідові відстані як умовний базовий орієнтир для порівняння. Такий підхід є виправданим лише як технічний benchmark, оскільки сучасні роботи з маршрутизації e-SV показують, що спрощення мережі може занижувати складність реальної експлуатації, особливо коли важливими стають навантаження, ухил і обмеження дорожньої інфраструктури.

Таким чином, перший етап дослідження створює інформаційну основу для подальшого оптимізаційного моделювання. Його результатом є не просто набір вихідних даних, а структурована база, що дозволяє послідовно аналізувати взаємозв'язок між простором, попитом, транспортними технологіями та містобудівними обмеженнями. У межах Sulp-підходу саме такий формат даних є передумовою для фактологічно обґрунтованого вибору рішень у сфері міської логістики.

2.2. Оптимізаційна модель, маршрутизація та формування сценаріїв

Після формування вхідної бази даних наступним етапом є розв'язання

задачі оптимізації доставки. У цій роботі як основну постановку використано

Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), поєднану з вибором місця

розташування міського розподільчого хаба. Така комбінація є логічною,

оскільки маршрути доставки, тип транспортного засобу, його місткість і

позиція хаба взаємно впливають один на одного. У сучасній літературі подібні

постановки широко застосовуються для задач міської логістики, а для e-cargo

bike systems CVRP є однією з базових моделей опису процесу доставки.

Загальна схема доставки посилок з використанням міського хабу (MX)

наведена на рис. 2.2.



Після формування вхідної бази даних наступним етапом є розв'язання

задачі оптимізації доставки. У цій роботі як основну постановку використано

Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), поєднану з вибором місця

розташування міського розподільчого хаба. Така комбінація є логічною,

оскільки маршрути доставки, тип транспортного засобу, його місткість і

позиція хаба взаємно впливають один на одного. У сучасній літературі подібні

постановки широко застосовуються для задач міської логістики, а для e-cargo bike systems CVRP є однією з базових моделей опису процесу доставки.

У запропонованій постановці цільова функція орієнтована на мінімізацію транспортної роботи в тонно-кілометрах. Обрання саме цього критерію обґрунтовується тим, що він поєднує просторовий компонент маршруту з величиною перевезеного вантажу. На відміну від простої мінімізації довжини шляху, показник tkm краще відображає реальне навантаження на систему доставки та дозволяє точніше пов'язати маршрутні рішення з енергетичними й екологічними наслідками перевезення. Така логіка узгоджується з роботами, у яких навантаження та залежні від нього часові або витратні характеристики мають принципове значення для міської маршрутизації.

Цільову функцію можна подати у вигляді:

$$P_{zi}^{route} = \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U Q_{mu}^{zi} l_{mu}^{zi} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де P_{zi}^{route} – транспортна робота в міській системі доставки при використанні z-го хаба та i-го транспортного засобу, т-км;

Q_{mu}^{zi} – обсяг вантажу на ділянці маршруту m при використанні z-го хаба та i-го транспортного засобу, т;

l_{mu}^{zi} – довжина ділянки u маршруту m , км;

M – кількість маршрутів;

U – кількість ланок у маршруті.

Система обмежень забезпечує реалістичність розв'язку. Насамперед це обмеження місткості транспортного засобу, яке не допускає перевищення допустимого навантаження в межах окремого маршруту. Друге базове обмеження – повне задоволення попиту, тобто кожний клієнт має бути обслугований рівно один раз. Третє обмеження стосується вибору хаба: він повинен належати до множини допустимих локацій, визначених з урахуванням містобудівних і

планувальних умов. У логіці location-routing саме поєднання цих обмежень забезпечує придатність моделі до практичного міського застосування.

Відповідні обмеження можуть бути формалізовані так:

$$\sum_{j \in N} Q_j \leq Q_b; \sum_i x_{ij} = 1; h \in H, \quad (2.2)$$

де N – множина зупинок у маршруті;

Q_j – попит у точці j , кг;

Q_b – вантажопідйомність транспортного засобу, кг;

x_{ij} – бінарна змінна, що відображає факт обслуговування клієнта;

h – вибране розташування хаба;

H – множина допустимих місць для розміщення хаба.

У цій роботі модель використовується не для отримання одного-єдиного рішення, а для сценарного аналізу. Такий підхід є особливо доречним для е-СВ, оскільки ефективність цих систем істотно залежить від технічних параметрів велосипеда, просторової організації мережі та конфігурації попиту. Крім того, нові дослідження з cargo bike routing показують, що ігнорування залежності часу та енерговитрат від навантаження може призводити до зростання витрат або навіть до появи неадекватних маршрутних рішень, тому тестування кількох сценаріїв є методично виправданим.

У наборі сценаріїв цієї роботи змінюються три основні параметри: місце розташування міського розподільчого хаба, тип транспортного засобу та його вантажопідйомність, представлено в табл. 2.1. Два варіанти хаба дають змогу перевірити, наскільки просторове положення центру розподілу впливає на маршрути, транспортну роботу та часові витрати. Варіювання типу транспортного засобу дозволяє порівняти традиційну дизельну доставку з green freight alternative у вигляді е-СВ. Нарешті, зміна місткості е-СВ дає змогу простежити компроміс між кількістю рейсів, довжиною маршрутів, навантаженням і потенційною енергоефективністю.

Сценарії 1 і 9 виконують роль еталонних benchmark-сценаріїв, оскільки відображають чинну або близьку до чинної схему доставки дизельним транспортом великої місткості. Сценарії 2–8 і 10–16 репрезентують green initiative scenarios, у яких використовується е-СВ з вантажопідйомністю від 150 до 275 кг. Саме таке порівняння дозволяє оцінити не лише екологічний потенціал е-СВ, а й межі їхньої практичної придатності в різних конфігураціях мережі та попиту.

Таблиця 2.1 – Опис сценаріїв

Номер сценарію	Міський розподільчий хаб	Вантажопідйомність е-СВ	Абревіатура сценарію
1	A	2500*	2500A
2	A	200**	200A
3	A	150	150A
4	A	170	170A
5	A	200	200A
6	A	225	225A
7	A	250	250A
8	A	275	275A
9	B	2500*	2500B
10	B	200**	200B
11	B	150	150B
12	B	170	170B
13	B	200	200B
14	B	225	225B
15	B	250	250B
16	B	275	275B

* транспортний засіб із двигуном внутрішнього згоряння

** спрощені маршрути з використанням евклідової відстані

У результаті розв'язання CVRP для кожного сценарію формується набір маршрутів, з якого далі обчислюються ключові логістичні та ресурсні показники: кількість маршрутів, довжина маршрутів, загальна транспортна робота, час операції, а на основі параметрів транспортного засобу витрати енергії та вартість доставки. Отже, оптимізаційний блок виконує роль центрального аналітичного ядра методології: саме він перетворює початкові дані на кількісні результати, придатні для міжсценарного порівняння.

2.3. Оцінювання KPI та ранжування сценаріїв

Після розв'язання кожного сценарію наступним кроком є оцінювання його результативності за системою ключових показників ефективності. У межах цієї роботи до таких показників належать кількість маршрутів, загальна довжина маршруту, пройдена відстань, тонно-кілометри, тривалість операції, а також розрахункові енергетичні витрати та вартість доставки. Такий набір показників дозволяє одночасно оцінити операційну, ресурсну та економічну сторони функціонування системи доставки. У сучасних дослідженнях міської логістики саме багатокритеріальне оцінювання розглядається як необхідний інструмент для порівняння альтернатив, оскільки жоден одиничний показник не відображає повної ефективності рішення.

Потреба в інтегральному підході до оцінювання особливо важлива для е-СВ. Наприклад, сценарій із меншою відстанню не обов'язково буде найкращим за часом, а сценарій із нижчими енергетичними витратами не завжди забезпечить належний рівень сервісної ефективності. Саме тому результати кожного сценарію не можуть інтерпретуватися ізольовано; вони мають бути приведені до порівнюваного вигляду та зведені до єдиної рейтингової оцінки. Такий підхід відповідає базовій логіці багатокритеріального аналізу, де альтернативи оцінюються за кількома критеріями з урахуванням їхньої відносної важливості.

Для цього на першому кроці всі КРІ нормуються. Нормування потрібне тому, що показники мають різні одиниці виміру й різну бажану спрямованість:

одні критерії є стимуляторами (чим більше, тим краще), інші,

дестимуляторами (чим менше, тим краще). У літературі з мультикритеріальних

методів прийняття рішень (MCDM) наголошується, що саме розрізнення

benefit/cost criteria є ключовим для коректного ранжування альтернатив, а

вибір схеми нормування впливає на отримані результати.

Для критеріїв, де більші значення є більш бажаними, нормоване

значення визначається за формулою:

$$Z_i = \frac{F_i}{F_{i\max}}, \quad (2.2)$$

Для критеріїв, де менші значення є більш бажаними, використовується

формула:

$$Z_i = \frac{F_{i\min}}{F_i}, \quad (2.3)$$

де Z_i – нормоване значення показника для i -го сценарію;

F_i – фактичне значення відповідного КРІ для i -го сценарію;

$F_{i\max}$ – максимальне значення даного КРІ серед усіх сценаріїв;

$F_{i\min}$ – мінімальне значення даного КРІ серед усіх сценаріїв.

Після нормування для кожного показника застосовується ваговий коефіцієнт, що відображає його відносну важливість. Ваги критеріїв

визначаються на основі експертного оцінювання. Така процедура є типовою

для прикладного багатокритеріального аналізу, коли різні КРІ мають

неоднакове значення для дослідницької мети або для практичних потреб

замовника, міської влади чи логістичного оператора. Згідно з логікою weighted

sum method, інтегральна оцінка формується через адитивне поєднання

нормованих значень із вагами, які, як правило, підсумовуються до 1.

Щоб запис рейтингової моделі був математично послідовним, доцільно розділити часткову зважену оцінку та підсумковий рейтинг. Часткова оцінка за p -м КРІ для i -го сценарію обчислюється так:

$$R_{ip} = Z_{ip} \cdot W_p, \quad (2.4)$$

де R_{ip} – часткова рейтингова оцінка i -го сценарію за p -м показником;

Z_{ip} – нормоване значення p -го КРІ для i -го сценарію;

W_p – вага p -го КРІ.

Після цього формується інтегральний рейтинг сценарію як сума всіх часткових зважених оцінок:

$$R_i = \sum_{p=1}^P R_{ip}, \quad (2.5)$$

де R_i – загальний рейтинг i -го сценарію;

P – кількість КРІ, що враховуються в оцінюванні.

Оптимальним вважається той сценарій, для якого інтегральний рейтинг є максимальним:

$$R^* = \max_i [R_i], \quad (2.6)$$

де R^* – максимальне значення інтегрального рейтингу серед усіх розглянутих сценаріїв.

Такий підхід дозволяє перейти від множини розрізнених КРІ до єдиної узагальненої оцінки, придатної для прямого порівняння сценаріїв. Ранжування

здійснюється у спадному порядку значень R_i : перше місце посідає сценарій із найбільшим інтегральним рейтингом, останнє – сценарій із найменшим.

З методичної точки зору це забезпечує прозорий зв'язок між окремими

характеристиками сценарію та підсумковим рішенням щодо його доцільності.

При цьому сучасні праці з MCDM додатково підкреслюють, що нормування і вибір ваг можуть впливати на ранги, тому така процедура має бути чітко

задокументована.

Отже, третій етап методології перетворює результати маршрутизації на інструмент підтримки рішення. Якщо оптимізаційна модель відповідає на питання, як працює той чи інший сценарій, то система KPI та рейтингування дозволяє відповісти, який із них є кращим з урахуванням одночасно операційних, економічних і ресурсних критеріїв. Саме така багаторівнева логіка є необхідною для обґрунтованого вибору конфігурації е-СВ системи у прикладному міському контексті.

2.4. Висновки до розділу

Запропонована методологія поєднує чотири взаємопов'язані блоки: формування вхідних даних, оптимізацію доставки через CVRP і вибір хаба, сценарне моделювання та багатокритеріальне ранжування результатів. Така структура дозволяє перейти від простого опису е-СВ як перспективного виду транспорту до формалізованого аналізу умов, за яких його використання є операційно та економічно доцільним. У ширшому контексті міської логістики цей підхід відповідає принципам інтегрованого, фактологічно обґрунтованого планування, які просуваються в межах SULP/SUMP.

Ключовою перевагою цієї методології є те, що вона враховує не лише просторове розташування клієнтів і технічні характеристики транспортних засобів, а й взаємозв'язок між місткістю, конфігурацією маршруту, розташуванням хаба та підсумковими KPI. Це особливо важливо для е-СВ, для яких навантаження, параметри мережі та організація доставки мають суттєвий вплив на результативність системи. Саме тому сценарний аналіз у поєднанні з нормуванням і зважуванням KPI створює надійну основу для подальшого емпіричного порівняння альтернатив у Черкасах.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Середина дослідження

Черкаси доцільно розглядати як репрезентативний приклад середнього українського міста для оцінювання систем доставки «останньої милі» на базі електричних вантажних велосипедів. Місто є адміністративним центром області, розташоване на правому березі Кременчуцького водосховища на Дніпрі, має площу близько 7,8 тис. га та населення близько 264 тис. осіб. За офіційним інвестиційним паспортом міста, Черкаси є логістичним центром регіону, де функціонують річковий порт, аеропорт, пасажирська і вантажна залізнична інфраструктура, а також електричний і автомобільний транспорт.

З погляду міської логістики Черкаси мають виразний промислово-комерційний профіль. Офіційні міські матеріали відносять до провідних секторів хімічну, деревообробну, харчову, машинобудівну промисловість, а також торгівлю й будівництво. Це означає, що міський простір одночасно формує значний попит на B2C-доставку, кур'єрські перевезення та сервісні поїздки, а також генерує локальні конфлікти між вантажним рухом, пасажирською мобільністю та екологічними цілями міста.

Природно-просторовий контекст Черкас є особливо важливим для оцінки е-СВ. Місто лежить на високому правому березі Дніпра вздовж Кременчуцького водосховища, а його морфологія має виражений лінійний характер. Довга прибережна форма, перепади рельєфу правобережної частини та орієнтація основних транспортних зв'язків уздовж міської осі означають, що питання довжини маршруту, кількості зупинок і розміщення хабів для Черкас є не менш важливими, ніж власне тип транспортного засобу.

Окремим просторовим обмеженням виступають природні та інфраструктурні бар'єри. З одного боку, місто безпосередньо межує з Черкаським бором, великим природним лісовим масивом, який відіграє екологічну та рекреаційну роль і водночас обмежує частину потенційних транспортно-складських рішень у північно-західному секторі. З іншого боку, зовнішній зв'язок через Дніпро концентрується на Черкаській дамбі – довгій переправі через Кременчуцьке водосховище, що замикає значну частину автомобільного доступу на один коридор. Для міської логістики це створює ризик концентрації потоків на обмеженій кількості підходів і посилює значення правильно обраного місця міського розподільчого хаба.

Транспортна система Черкас є мультимодальною, що є важливою перевагою для впровадження міської логістики нового типу. Офіційні джерела міста підкреслюють наявність автомобільних, водних, залізничних і повітряних зв'язків, а також електротранспорту. На рівні внутрішньоміського сполучення ключову роль відіграють тролейбус і автобус, причому офіційний сайт КП «Черкасиелектротранс» показує, що маршрутна мережа напрядує такі точки, як залізничний вокзал, річковий вокзал, вантажний порт, аеропорт, промислові зони та тролейбусний парк. Це робить Черкаси особливо цікавими для е-СВ, оскільки логістична система тут може бути пов'язана не лише з дорожньою мережею, а й з уже сформованою структурою міських транспортних коридорів.

Важливою передумовою є й те, що Черкаси вже мають інституційний досвід розвитку електричної мобільності. У 2025 році ЄБРР схвалив фінансування для комунального оператора «Черкасиелектротранс», яке передбачає закупівлю нових тролейбусів і коригування частини маршрутної мережі. Хоча цей проєкт не стосується вантажних велосипедів безпосередньо, він свідчить про політичну та інституційну готовність міста до електрифікації мобільності, що є сприятливим середовищем для впровадження е-СВ як елемента сталої логістики.

Додатковим індикатором готовності міського середовища є розвиток зарядної екосистеми для електротранспорту. Публічні карти операторів ТОКА та EcoFactor, а також загальні каталоги зарядних точок, відображають Черкаси як місто з наявною мережею електрозарядної інфраструктури. Для е-СВ це не означає прямої залежності від швидкісних автомобільних зарядок, однак свідчить про сформовану екосистему електромобільності, наявність сервісних операторів і вищу ймовірність інтеграції хабового заряджання в міський енергетичний контекст. Це є радше інституційною та інфраструктурною перевагою, ніж прямою технічною вимогою для вантажних велосипедів.

З огляду на транспортну структуру Черкас, у межах моделювання доцільно розглядати два типи потенційних міських розподільчих хабів.

Перший хаб (МХ А) логічно орієнтувати на західно-центральный сухопутний коридор міста, пов'язаний із залізничним вокзалом, магістраллю Смілянського напрямку та центральною віссю міського руху. Другий хаб (МХ Б) доцільно розміщувати в прибережно-портовій зоні, пов'язаній з річковим вокзалом, вантажним портом та нижньодніпровською логістикою.

Таке двовузлове припущення впливає з мультимодальної структури Черкас і дозволяє оцінити, який тип просторової організації є ефективнішим для e-commerce доставки «останньої милі». Це є аналітичним сценарним припущенням, заснованим на фактичній наявності в місті залізничних, портових і транспортних вузлів.

Отже, Черкаси формують складний, але перспективний контекст для впровадження е-СВ. Поеднання середнього масштабу міста, виражених природних бар'єрів, мультимодальної транспортної системи та наявної електромобільної інфраструктури створює умови, за яких правильне конфігурування хаба, маршруту та вантажопідйомності може мати вирішальний вплив на загальну ефективність міської доставки.

3.2 Опис даних і параметрів моделювання

Для апробації методології у Черкасах було сформовано комплексний набір даних, який охоплює транспортну мережу, просторовий розподіл попиту, технічні параметри транспортних засобів і можливі локації міських розподільчих хабів. Така побудова вхідної бази відповідає логіці попереднього методологічного розділу і дає змогу оцінити не лише окремі маршрути, а повну конфігурацію системи доставки «останньої милі» в межах міського простору.

Перший блок становили мережеві атрибути. Для дослідження було проаналізовано карту міської транспортної мережі Черкас, вузли, зв'язки та ключові експлуатаційні характеристики. Середня швидкість руху на мережі була прийнята на рівні 24 км/год, а загальна довжина мережі, використаної для моделювання, становила 128,6 км. У контексті Черкас ці параметри є принциповими, оскільки просторово витягнута форма міста вздовж Дніпра робить часову чутливість маршрутів важливим фактором для будь-якої доставки малими партіями.

Другий блок охоплював дані про попит отримувачів, представлено на рис. 3.1. Для моделювання було використано координати клієнтів і добові обсяги доставок. Загалом у базі було оброблено 135 клієнтів. Максимальна вага окремої доставки становила 88,7 кг, мінімальна – 0,1 кг. Просторовий розподіл попиту використовувався для моделювання системи доставки в умовах пікового навантаження. Вибір найбільш завантаженого дня спостереження дозволив змодельовати систему в умовах пікового навантаження, що є доцільним для перевірки меж ефективності e-SB.

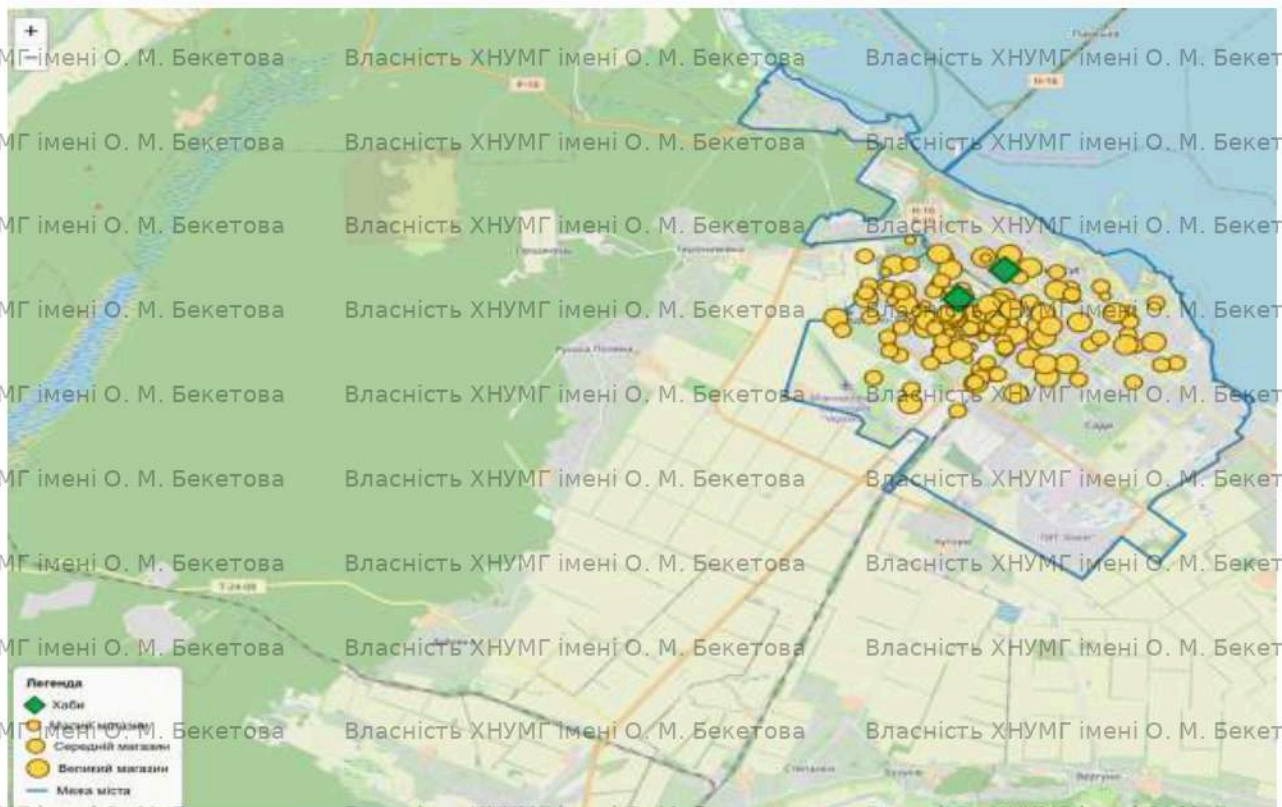


Рисунок 3.1 – Карта розміщення точок збуту та мікрохабів

На рис. 3.2 подано гістограму розподілу обсягів завою до торгових точок у межах досліджуваної вибірки. Розподіл має виражену правосторонню асиметрію: найбільша кількість торгових точок зосереджена в інтервалі малих і середніх обсягів завою, тоді як зі зростанням ваги поставки частота спостережень поступово зменшується. Це свідчить про переважання у системі доставки невеликих партій вантажу, що є характерним для міської логістики останньої милі. Водночас наявність невеликої кількості точок із високими обсягами завою формує “довгий хвіст” розподілу та вказує на існування окремих торгових об’єктів, які потребують більших партій постачання. Така структура розподілу підтверджує доцільність використання диференційованого підходу до вибору параметрів доставки, зокрема вантажопідйомності транспортного засобу та конфігурації маршрутів.

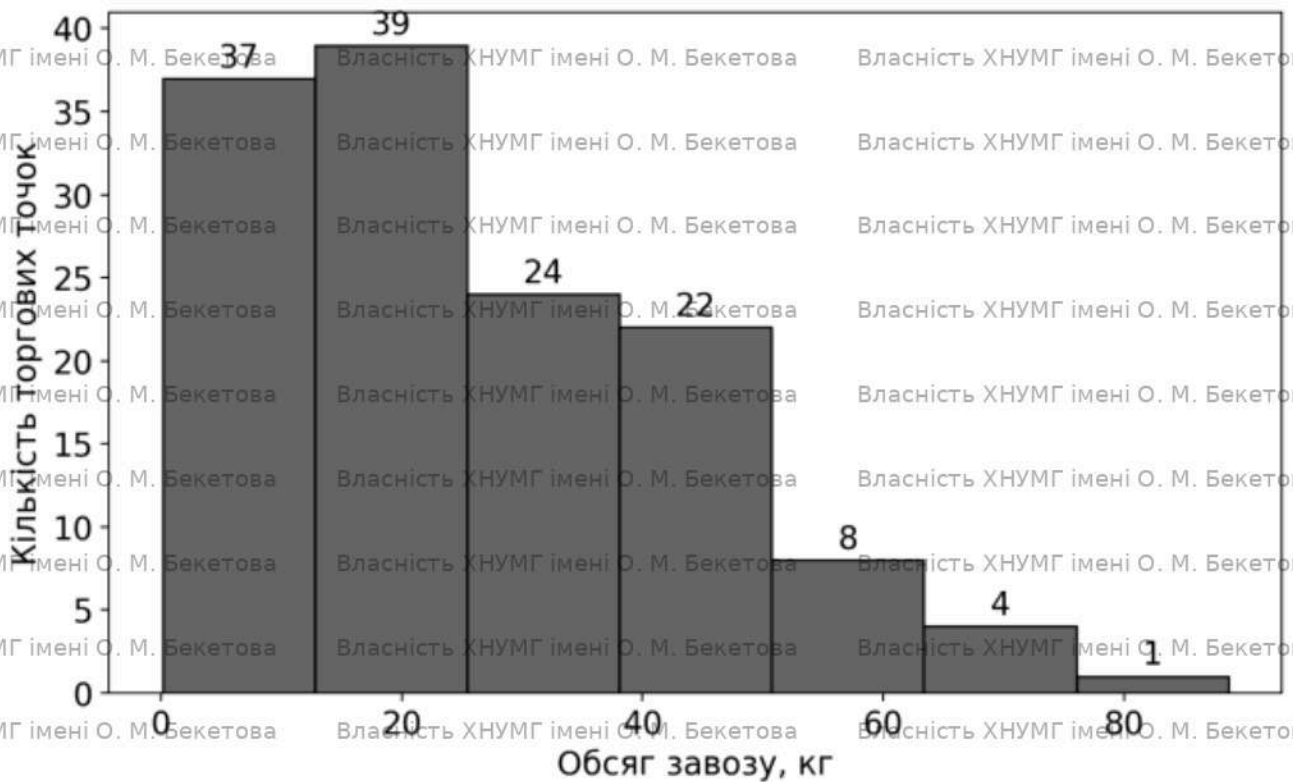
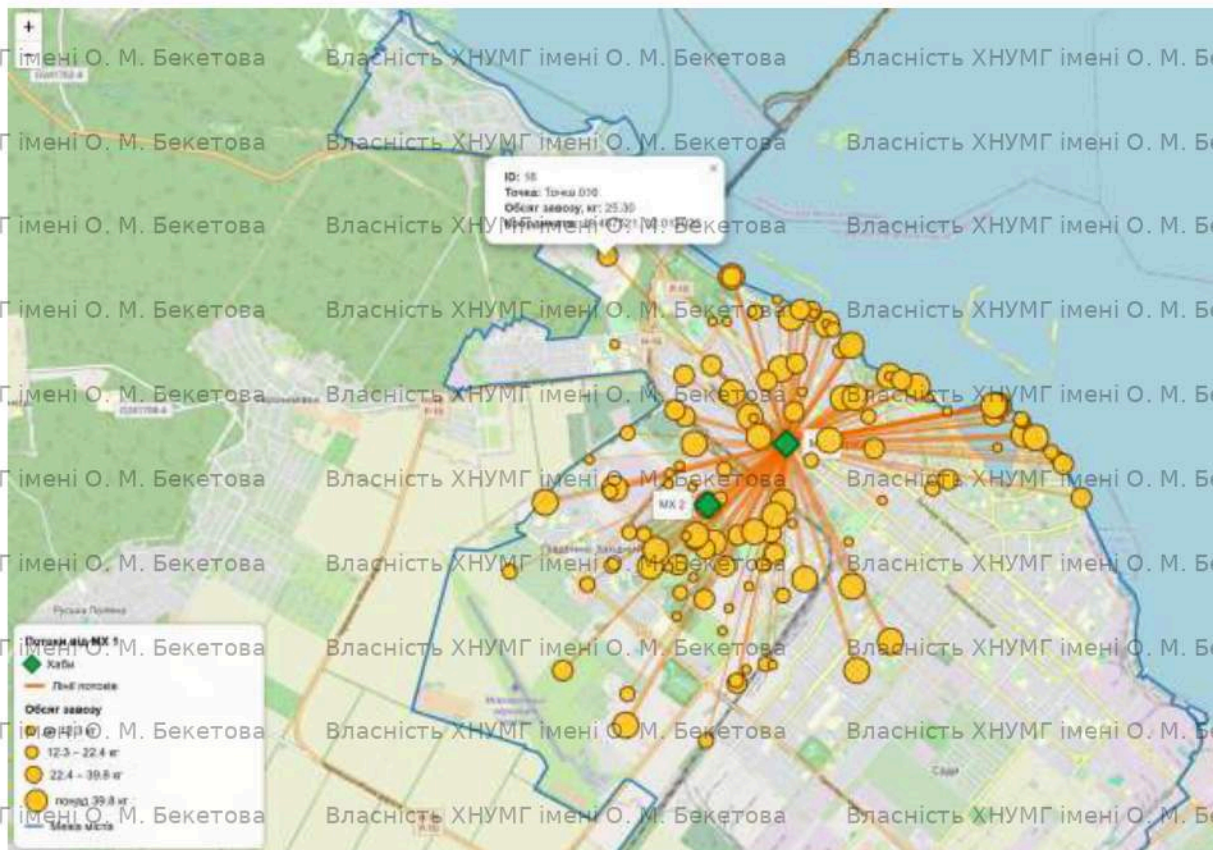


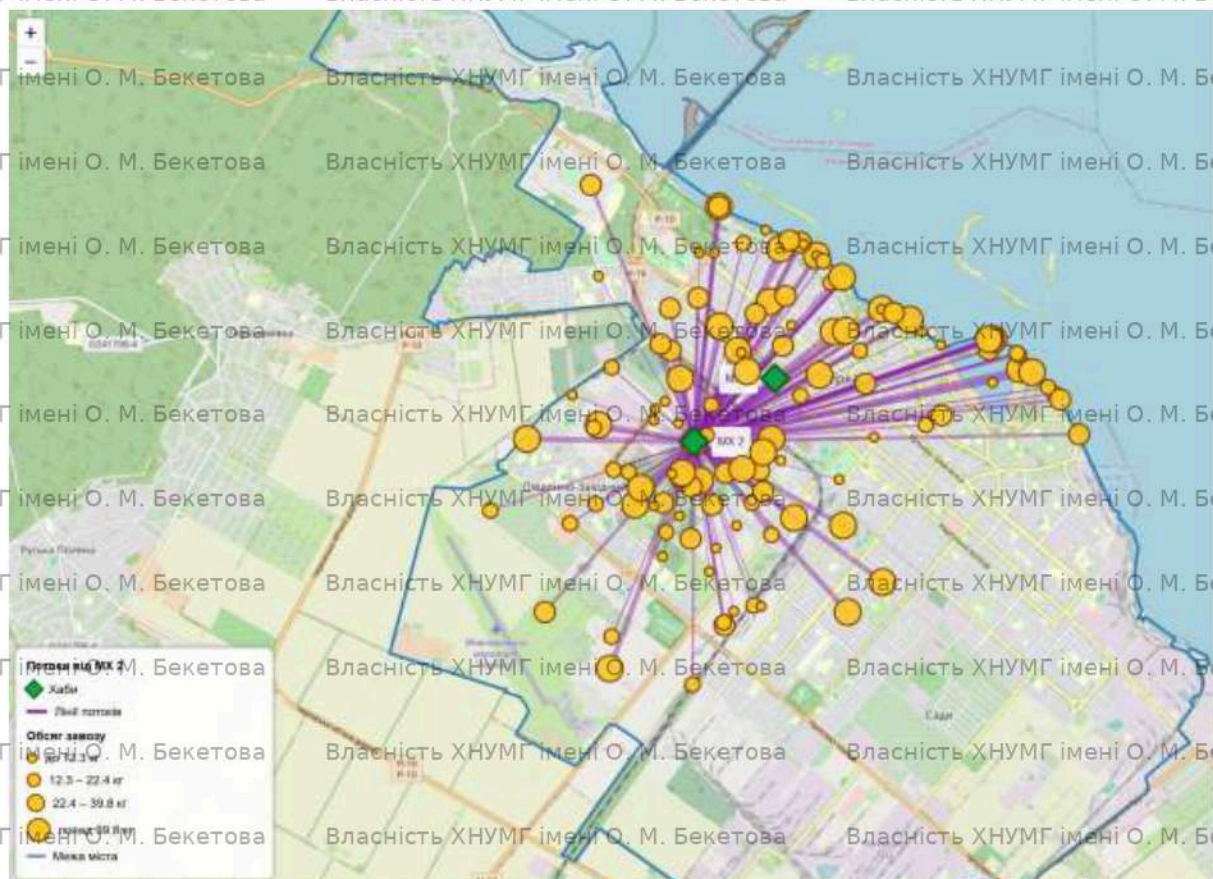
Рисунок 3.2 – Гістограма розподілу обсягів заведення до торгових точок

Просторовий розподіл попиту в Черкасах виявився нерівномірним (рис. 3.3), що відповідає типовому профілю середнього міста з поєднанням центральних комерційних зон, житлових кварталів і периферійних точок заведення (рис. 3.4). Для міської логістики це означає, що ефективність е-СВ визначається середньою відстанню доставки, концентрацією клієнтів, щільністю зупинок та часткою коротких маршрутів у межах центральної та прилеглої забудови. Власне тому сценарне тестування різних вантажопідйомностей є тут методично виправданим.

Третій блок становила база транспортних засобів. До аналізу було включено як дизельний фургон для еталонного порівняння, так і кілька типів е-СВ, поширених на ринку, з різною вантажопідйомністю, масою та запасом ходу, наведені в табл. 3.1. Це дозволило оцінити, як зміна технічних параметрів впливає на кількість маршрутів, довжину пробігу, тривалість операцій та загальний рейтинг сценарію.



А) MX A



А) MX B

Рисунок 3.3 – Вантажні потоки від MX до точок збуту (за евклідовою відстанню)

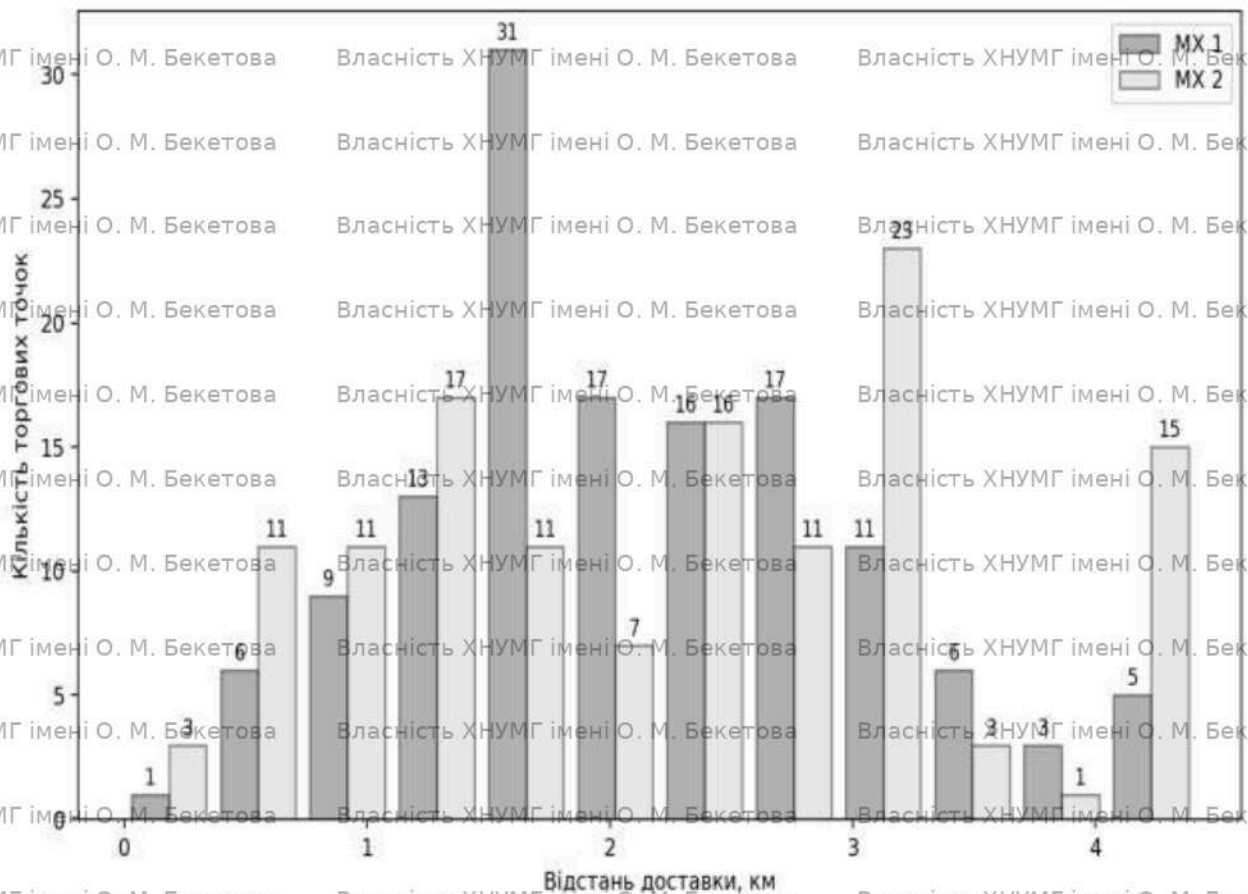


Рисунок 3.4 – Гістограма відстань доставки від кожного хабу

Таблиця 3.1 – Параметри вантажних транспортних засобів, використаних у дослідженні

№	Тип транспортного засобу	Пробіг на одному заряді батареї, км	Вантажопідйомність, кг	Вага з батареєю, кг	Ємність батареї, Wh
0	Diesel Van	—	2500	—	—
1	e-CB	30	150	22	320
2	e-CB	130	170	26	400
3	e-CB	250	200	34	400
5	e-CB	45	225	43	500
6	e-CB	100	250	64	250
7	e-CB	45	275	52	500

Четвертий блок охоплював дані про землекористування та локації хабів. Для Черкас було розглянуто два потенційні варіанти міського розподільчого хаба: МХ А у західно-центральної частині міста, орієнтований на сухопутний доступ і магістральний коридор, та МХ Б у прибережній портовій зоні, ближчій до річкової та вантажної інфраструктури. Відстані між учасниками мережі обчислювалися на основі географічних координат і транспортних зв'язків, а для окремих спрощених сценаріїв використовувалася евклідова відстань як контрольний варіант.

У межах екологічного зіставлення сценаріїв основна увага приділялася не лише транспортній роботі, а й ресурсним витратам, енергетичній вартості доставки та операційним параметрам. Це дозволило перевести результати CVRP у систему практично значущих KPI. Отримані маршрути дали змогу оцінити відстань руху, кількість рейсів, час виконання та споживання ресурсів для кожної комбінації «МХ – транспортний засіб – вантажопідйомність».

Сценарний набір повністю відповідає постановці задачі з попереднього розділу. Для кожного з двох хабів було розглянуто один дизельний benchmark-сценарій і сім е-СВ-сценаріїв з вантажопідйомністю від 150 до 275 кг, включно зі спрощеним варіантом для 200 кг на основі евклідової відстані. Це дозволило одночасно оцінити вплив просторового розміщення МХ, місткості транспортного засобу та типу мережевого розрахунку на підсумкову ефективність доставки.

3.3 Результати сценарного аналізу і порівняння альтернатив

Результати моделювання для Черкас наведені в табл. А1 у дод. А. Вони охоплюють транспортну роботу, коефіцієнт завантаження, коефіцієнт завантаженого пробігу, операційний час, пройденої відстань, кількість сформованих маршрутів, середню кількість зупинок, споживання ресурсів, енергетичну вартість та підсумковий рейтинг кожного сценарію. Разом із рис. 3.5 та 3.6 ці результати дозволяють перейти від опису альтернатив до

їхнього кількісного порівняння. Характеристика екстремумів показників наведена в табл. 3.1.

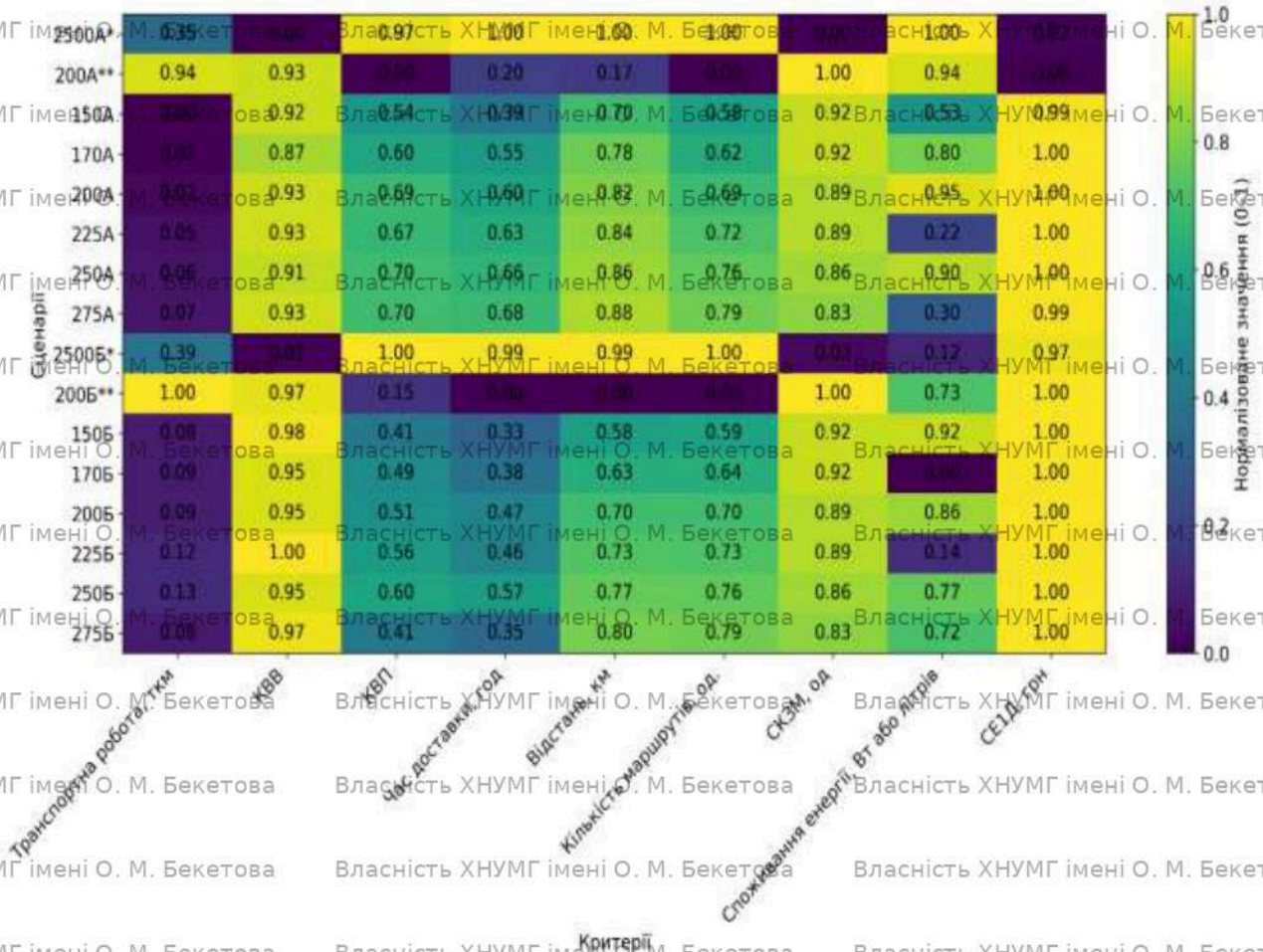


Рисунок 3.4 – Порівняльна теплова карта сценаріїв за критеріями

Найкращий інтегральний результат у Черкасах показав сценарій 5 (200A) з підсумковим рейтингом 4,660 і першим місцем у загальному ранжуванні. Це означає, що за умов хаба А вантажний велосипед вантажопідйомністю 200 кг забезпечив найкращий баланс між довжиною маршрутів, транспортною роботою, операційним часом, кількістю рейсів і вартістю енергії. Саме цей результат є головним аргументом на користь того, що для Черкас найефективнішим виявляється не максимальна місткість е-СВ, а помірна вантажопідйомність, яка краще узгоджується з конфігурацією міста та просторовою структурою попиту.

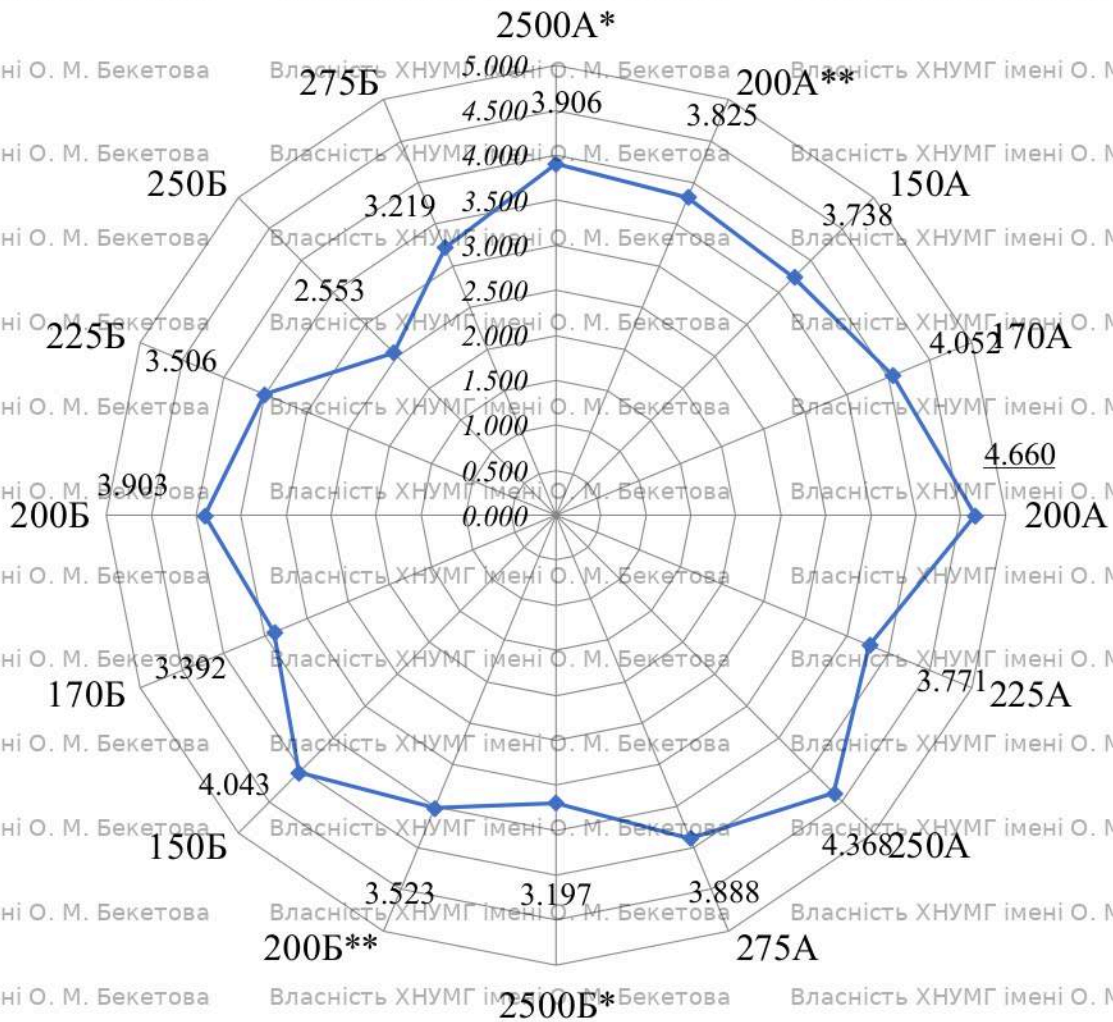


Рисунок 3.5 – Радарна діаграма нормалізованих критеріїв за сценаріями

Другу позицію посів сценарій 7 (250A) з рейтингом 4,368, а третю – сценарій 4 (170A) з рейтингом 4,052. Це показує, що в межах хаба А досить широкий інтервал вантажопідйомностей е-СВ демонструє конкурентоспроможні результати, проте саме 200 кг дає найкраще поєднання ресурсної та операційної ефективності. Цікаво, що навіть дещо вища вантажопідйомність 250 кг, попри меншу кількість маршрутів і менший загальний пробіг, не змогла перевершити 200 кг за інтегральною оцінкою. Отже, в Черкасах діє ефект нелінійного компромісу: збільшення місткості не гарантує зростання загальної ефективності.

Таблиця 3.1 – Характеристика екстремумів показників

Показник	Оптимум	Мін	Макс
Транспортна робота, ткм	max	84,000	424,000
Коефіцієнт використання вантажопідйомності (КВВ)	max	0,5200	0,8900
Коефіцієнт використання пробігу (КВП)	max	0,5100	0,9770
Час доставки, год	min	37,000	129,000
Відстань, км	min	584,00	2760,00
Кількість маршрутів, од.	min	16,000	349,000
Середня кількість заїздів за маршрутов (СКЗМ), од.	min	1,0000	37,0000
Споживання енергії, Вт або літрів	min	1020,0	12990,0
Грошовий вираз споживання енергії на одну доставку (СЕІД), грн	min	8,4800	1240,10
Рейтинг	max	2,5530	4,6600
Ранг	min	1,0000	16,0000

Якщо порівнювати хаби між собою, видно чітку перевагу МХ А. Із десяти найкращих позицій більшість належить сценаріям саме з МХ А, а перші три місця взагалі посідають лише А-сценарії. Це дозволяє зробити висновок, що в Черкасах більш вигідним є розташування хаба у західно-центральному сухопутному коридорі, ближчому до головної міської осі, ніж у прибережно-портовій зоні. У контексті лінійної структури міста вздовж Дніпра та концентрації зовнішніх зв'язків на окремих підходах такий результат виглядає логічним: внутрішньоміське розподілення посилок потребує коротших і більш рівномірних плечей доставки, ніж ті, які може забезпечити периферійніший портовий вузол. Це є інтерпретацією отриманих результатів з урахуванням транспортно-просторової будови Черкас.

Найкращий сценарій серед конфігурацій із МХ Б – це сценарій 11 (150В) з рейтингом 4,043, який посів четверте місце в загальному списку. Далі йдуть 13 (200В) із рейтингом 3,903 і 14 (225В) із рейтингом 3,506. Загалом це

означає, що прибережно-портовий хаб теж може забезпечити прийнятну ефективність е-СВ доставки, але поступається за підсумковим балансом альтернативі А. Для Черкас це важливий практичний висновок: портова інфраструктура є цінною для вантажного обслуговування, однак для delivery-to-door систем у межах міста вона не обов'язково забезпечує найкращу позицію для розподілення дрібнопартійних e-commerce потоків.

Аналіз окремих КРІ показує, що зі збільшенням вантажопідйомності е-СВ загалом зменшується кількість маршрутів, скорочується пройдена відстань і знижується операційний час. Наприклад, у межах МХ А перехід від 150 кг до 275 кг супроводжується зменшенням кількості маршрутів від 158 до 86, скороченням пробігу від 1243 до 846 км і зниженням часу операції від 92 до 65 год. Це підтверджує, що більша місткість справді зменшує потребу в додаткових рейсах.

Однак одночасно з цим зростає транспортна робота та не завжди покращується інтегральний рейтинг, оскільки систему починають стримувати інші параметри, ресурсне споживання, вартість, маневровість і баланс завантаження.

Коефіцієнт завантаження в більшості е-СВ-сценаріїв залишається порівняно високим і стабільним, переважно в межах 0,84–0,89, що свідчить про добру адаптацію маршрутів до фактичного попиту. Натомість laden factor поступово зростає зі збільшенням вантажопідйомності, що є очікуваним, оскільки більша місткість дозволяє виконувати менше поїздок із вищою часткою завантаження пробігу. Водночас саме по собі підвищення laden factor не є достатньою підставою для вибору найбільшої моделі: інтегральний рейтинг показує, що занадто важкі конфігурації не забезпечують оптимального системного результату.

Окремо слід розглянути спрощені сценарії 2 і 10, у яких використовувалася евклідова відстань. Вони сформували по 349 маршрутів із лише однією зупинкою на маршрут, мали найвищі значення пробігу та часу і не наблизилися до найкращих позицій рейтингу. Це підтверджує, що для Черкас використання спрощеної геометричної відстані не відображає реальної логіки міського розвезення й може штучно погіршувати або спотворювати

ефективність е-СВ. Для лінійного міста з береговою конфігурацією, вираженими магістральними осями та бар'єрними елементами мережеве моделювання є суттєво точнішим за евклідове наближення.

Порівняння з дизельними benchmark-сценаріями також є показовим.

Сценарій 1 (2500A) посів п'яте місце з рейтингом 3,906, тоді як сценарій 9 (2500B) опинився лише на п'ятнадцятій позиції з рейтингом 3,197. Отже, навіть для традиційного транспорту розташування хаба є критичним.

Водночас той факт, що низка е-СВ-сценаріїв перевищила дизельний

benchmark за інтегральним рейтингом, свідчить на користь практичної доцільності переходу до cycle logistics у Черкасах, особливо в разі правильно обраної локації хаба та помірної вантажопідйомності транспортного засобу.

Рисунок 4, який порівнює внесок окремих КРІ в загальний рейтинг, і

рисунок 5, який показує інтегральні оцінки сценаріїв, підтверджують один і

той самий висновок: конфігурація 200A забезпечує найкращий баланс між експлуатаційною ефективністю та ресурсною ощадністю. Візуальний аналіз

графіків показує, що високий рейтинг цього сценарію формується не завдяки

домінуванню лише одного показника, а завдяки стійко хорошим значенням за

кількома КРІ одночасно. Для міської логістики це особливо важливо, адже саме збалансованість, а не локальний максимум, є критерієм реальної впроваджуваності.

У прикладному вимірі результати для Черкас означають, що міська

система доставки повинна орієнтуватися насамперед на е-СВ

вантажопідйомністю близько 200 кг, розміщені в хабі А, тобто у більш центрально-сухопутному вузлі. Така конфігурація дозволяє досягати низької

енергетичної вартості, помірного пробігу, прийнятної кількості маршрутів і

достатньо високих показників використання місткості. Для Черкас це є

особливо цінним з огляду на витягнуту морфологію міста, наявність берегового бар'єру та необхідність зменшення тиску вантажного транспорту

на центральні міські вулиці.

3.4 Практична імплементація та рекомендації

З практичного погляду результати дають чіткий орієнтир для імплементації (див. рис. 3.7): якщо місто або оператор запускає пілот е-СВ-доставки в Черкасах, базовою конфігурацією має бути сценарій, близький до 200А, тобто е-СВ вантажопідйомністю близько 200 кг із розміщенням міського розподільчого хаба в більш центрально-орієнтованому сухопутному вузлі. Саме ця конфігурація дала найкращий інтегральний рейтинг, а отже є найкращою відправною точкою не тільки для дослідницької перевірки, а й для практичного пілота. Для оператора це означає, що спроба одразу перейти до максимальної місткості не є оптимальною: практично доцільніше починати з конфігурації, яка дає найкращий баланс між енергетичною вартістю, кількістю маршрутів, відстанню та операційним часом.



Рисунок 3.7 – Практична імплементація та рекомендації

Друга практична рекомендація стосується поетапності впровадження. Для Черкас раціональним виглядає старт із обмеженої центральної зони обслуговування, де е-СВ можуть працювати на коротких плечах доставки з високою щільністю зупинок. Після цього система може розширюватися на прилеглі житлові райони та змішані комерційні зони. Такий підхід зменшує

ризика раннього провалу проєкту, бо дозволяє налаштувати режими комплектування партій, графіки рейсів, організацію заряджання й оперативно оцінити фактичну продуктивність флоту. Для міста з логістичним профілем

Черкас це особливо важливо, оскільки тут доцільно починати не з повного заміщення традиційної доставки, а з функціонального доповнення до неї.

Третій практичний аспект, інфраструктура заряджання та сервісу. Наявність у Черкасах видимих публічних карт зарядної інфраструктури ТОКА

та ЕСОFACTOR не означає прямої технічної придатності автомобільних зарядок для е-СВ, але свідчить про існування локальної екосистеми електромобільності, сервісних операторів і цифрових інструментів керування зарядним процесом. У поєднанні з проєктом ЄБРР щодо оновлення електротранспорту в Черкасах це дає підстави стверджувати, що для міста бар'єр впровадження е-СВ є радше організаційним, ніж технологічним.

Практично це означає, що ключовими завданнями будуть не стільки пошук «першої зарядки», скільки проєктування хабового режиму нічного заряджання, резервних батарей, сервісного обслуговування й інтеграції з логістичною ІТ-системою оператора.

Четверта практична рекомендація пов'язана з безпекою та маневровістю. Огляд сучасних досліджень показує, що при масштабуванні доставки малими транспортними засобами критичними стають питання поведінки водія, використання вуличної інфраструктури, режимів паркування

та дотримання правил дорожнього руху. Дослідження Conway та співавт. показало конкурентоспроможність cargo cycles в умовах щільного міського руху, тоді як Dalla Chiara та співавт. продемонстрували, що фактичне

використання інфраструктури cargo cycle-драйверами суттєво залежить від того, як саме організовано простір для руху й короткочасної зупинки. Для

Черкас це означає, що разом із запуском е-СВ необхідно розробляти стандарти curb management, місця короткочасного зупинення, правила доступу до тротуарно-велосипедної інфраструктури та програму навчання кур'єрів.

П'ята практична рекомендація стосується людського чинника. Дослідження поведінки delivery riders свідчать, що безпекові ризики зростають під впливом досвіду роботи, режиму зайнятості, інтенсивності поїздок і поведінкових звичок. Хоча йдеться не саме про е-СВ, а ширше про delivery riders, цей висновок важливий для імплементації в Черкасах: пілот е-СВ повинен містити не лише логістичну, а й організаційно-безпекову частину, відбору персоналу, інструктажу, моніторингу інцидентів і коригування маршрутів у складних ділянках мережі. Без цього навіть технічно оптимальна схема може втратити ефективність у реальній експлуатації.

3.5 Транспортна політика і цілі сталого розвитку

На рівні транспортної політики результати дослідження безпосередньо вбудовуються в логіку Sustainable Urban Logistics Planning, див. рис. 3.8.

Оновлене європейське керівництво з SULP прямо пов'язує міську логістику з ширшими mobility strategies і нагадує про стратегічну орієнтацію ЄС на near-zero-emission urban logistics до 2030 року. У цьому сенсі результати для Черкас показують, що е-СВ мають розглядатися не як приватна ініціатива окремого оператора, а як інструмент міської політики, який поєднує транспортне планування, екологічну модернізацію та керування міським простором.



Рисунок 3.8 – Транспортна політика і цілі сталого розвитку

Зв'язок із Цілями сталого розвитку є досить прямим. Насамперед результати стосуються SDG 11, яка вимагає робити міста безпечними, стійкими та сталими; зменшення міського вантажного тиску, скорочення надлишкових поїздок і правильне розміщення хабів прямо відповідають цій логіці. Не менш очевидним є внесок у SDG 13, оскільки заміщення частини доставок низьковуглецевими засобами та скорочення енергетично неефективного пробігу підтримують кліматичну політику. Енергетичний компонент сценарію 200A також пов'язаний із SDG 7, тоді як потреба в інфраструктурній, цифровій та організаційній модернізації логістики відповідає SDG 9. Нарешті, підвищення коефіцієнтів завантаження та більш ощадне використання ресурсів пов'язується з SDG 12.

Для Черкас це означає, що політика впровадження е-СВ повинна складатися не з одного заходу, а з пакета рішень. До нього мають входити: підтримка мікроконсолідації в центральній частині міста, пріоритет для низькоемісійної доставки на найбільш чутливих вулицях, оновлення правил короткочасного завантаження-розвантаження, створення умов для хабового заряджання та інтеграція логістичних рішень у ширший транспортний план міста. Саме такий комплексний підхід найбільш узгоджується з логікою SULP, де вантажний рух не розглядається окремо від загальної мобільності, землекористування та якості міського середовища.

3.6 Висновки до розділу

Результати розділу показали, що для Черкас ключовим фактором ефективності е-СВ є не окремий технічний параметр, а узгодження трьох елементів: місткості транспортного засобу, просторового положення хаба та структури міського попиту. Саме тому найкращий інтегральний результат було досягнуто не в сценарії з найбільшою вантажопідйомністю, а в конфігурації 200A, яка забезпечила найкращий баланс між енергетичною вартістю, довжиною маршрутів, кількістю рейсів і загальним рейтингом.

Обговорення також показало, що теоретичні й практичні висновки з цього дослідження виходять за межі суто технічної маршрутизації. Для Черкас е-СВ слід розглядати як елемент ширшої міської логістичної політики, який

потребує хаба, правил доступу, керування міським простором, зарядної та сервісної логіки, а також належної організації роботи кур'єрів. Тобто ефективність е-СВ залежить не лише від велосипеда як такого, а від здатності міста та оператора побудувати узгоджену систему його використання.

У підсумку можна стверджувати, що Черкаси мають реалістичні передумови для впровадження е-СВ у сегменті останньої милі. Міський контекст, транспортна структура, наявність ширшої електромобільної екосистеми та результати сценарного аналізу свідчать, що така система може бути не лише екологічно привабливою, а й операційно доцільною — за умови поетапної імплементації та вбудовування в транспортну політику міста.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано цілісну рамку оптимізації системи доставки на базі електричних вантажних велосипедів для міста середнього розміру. На відміну від підходів, що оцінюють е-СВ лише як альтернативний тип транспортного засобу, у цьому дослідженні їх розглянуто як елемент інтегрованої системи міської логістики, де технічні характеристики, розташування хаба, структура попиту, маршрутна організація та багатокритеріальне оцінювання формують єдину аналітичну модель. Саме це є головним науковим внеском роботи.

Емпіричне моделювання для Черкас показало, що оптимальна конфігурація системи е-СВ не збігається з екстремумом одного показника. Найкращий інтегральний результат забезпечив сценарій 200А, тобто конфігурація з е-СВ вантажопідйомністю близько 200 кг і хабом у більш центральній орієнтованій сухопутній локації. Це доводить, що практична ефективність останньої милі визначається не максимальною місткістю, а збалансованим поєднанням пробігу, часу, енергоспоживання, кількості маршрутів і просторового положення хаба.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що воно формує прикладний алгоритм для міських планувальників і логістичних операторів. Для Черкас найбільш обґрунтованим виглядає сценарій поетапного впровадження: початковий пілот у центральній зоні міста, хабове заряджання, обмежений е-СВ-флот середньої вантажопідйомності, подальше коригування маршрутів і лише потім масштабування системи на ширшу територію. Такий підхід дозволяє зменшити операційні ризики та прив'язати екологічні цілі до реальної логістичної ефективності. У місті вже наявні ознаки ширшої екосистеми електромобільності та інституційної готовності до «зелених» транспортних рішень, що підсилює реалістичність такої траєкторії.

На рівні транспортної політики результати роботи підтверджують, що е-СВ можуть бути інструментом реалізації цілей SUDP і ширшого порядку

денного сталої мобільності. Запропонований підхід безпосередньо підтримує цілі, пов'язані зі сталими містами, кліматичною дією, енергоефективністю, сталою інфраструктурою та відповідальнішим використанням ресурсів.

Водночас дослідження показує, що policy design має бути поступовим: від пілотування та доказу ефективності, до підтримувальних регуляторних рішень і, лише за потреби, жорсткіших режимів доступу чи low-emission measures.

Водночас робота має низку обмежень. По-перше, результати отримано для міста середнього розміру, тому їх не слід механічно переносити на великі агломерації або малі розріджені поселення. По-друге, у фокусі аналізу були насамперед вантажопідйомність, пробіг і маршрутні характеристики, тоді як такі параметри, як конструктивний тип e-SV, тривалість заряджання, маневровість, правила паркування та поведінка кур'єрів, не були включені в модель у повному обсязі. Література показує, що саме ці чинники можуть суттєво впливати на реальну експлуатацію cargo cycles і на безпекові результати delivery systems.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі в трьох напрямках. Перший, включення більш детальних характеристик транспортного засобу та інфраструктури, зокрема типу рами, кількості коліс, режимів заряджання й доступу до curb space. Другий, інтеграція прогнозування попиту, динамічної консолідації та AI-based dispatching. Третій, поєднання логістичного моделювання з інституційним дизайном: режимами регулювання, участю стейкхолдерів, бізнес-моделями оператора та сценаріями масштабування в реальній міській політиці. Саме в цьому напрямі дослідження може перейти від обґрунтування техніко-логістичної доцільності до формування повноцінної дорожньої карти сталої міської логістики.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Comi, A., Polimeni, A., Belcore, O. M., Cartisano, A. G., Micari, S., & Napoli, G. (2024). Assessing the Opportunity Offered by Electric Vehicles in Performing Service Trips to End Consumers. *Applied Sciences*, 14(10), 4061.
2. Gonzalez-Calderon, C. A., Moreno-Palacio, D. P., Posada-Henao, J. J., Quintero-Giraldo, R., & Múnera, C. C. (2022). Service trip generation modeling in urban areas. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 160, 102649.
3. Fontaine, P., Minner, S., & Schiffer, M. (2023). Innovative and sustainable city logistics: Design, consolidation, and regulation. *European Journal of Operational Research*, 307(3), 1071–1084.
4. Galkin, A., & de Oliveira, L. K. (2026). Proximity freight strategies for urban sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 156, 105383.
5. Le Pira, M., Tavasszy, L. A., de Almeida Correia, G. H., Ignaccolo, M., & Inturri, G. (2021). Opportunities for integration between Mobility as a Service (MaaS) and freight transport: A conceptual model. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103212.
6. Galkin, A., Gajewska, T., Olkhova, M., & Beckers, J. (2025). Urban spatial attributes and sustainability: Operational efficiency in urban freight delivery. *Transport Policy*, 103917.
7. Galkin, A., Švadlenka, L., Vrba, R., & de Oliveira, L. K. (2025). Evaluation of cargo bike program for parcel deliveries in a medium-sized city. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 140, 104609.
8. Fontaine, P. (2022). The vehicle routing problem with load-dependent travel times for cargo bicycles. *European Journal of Operational Research*, 300(3), 1005–1016.
9. Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., & Delahoche, L. (2021). Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: overview, analysis, and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100291.

10. Goodchild, A., Waller, S., & Batty, M. (2015). *Urban informatics: Spatial technologies for cities*. CRC Press.

11. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). *The geography of transport systems*. Routledge.

12. Fried, T., Goodchild, A., Browne, M., & Sanchez-Diaz, I. (2024). Seeking equity and justice in urban freight: where to look? *Transport Reviews*, 44(1), 191–212.

13. Allen, J., Browne, M., & Cherrett, T. (2012). Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form. *Journal of Transport Geography*, 24, 45–57.

14. de Bok, M., Tavasszy, L., & Thoen, S. (2022). Application of an empirical multi-agent model for urban goods transport to analyze impacts of zero emission zones in The Netherlands. *Transport Policy*, 124, 119–127.

15. Rześny-Cieplińska, J. (2023). Overview of the practices in integrating passenger mobility and freight deliveries in urban areas. *Case Studies on Transport Policy*, 14, 101106.

16. Bachofner, M., Lemardele, C., Estrada, M., & Pages, L. (2022). City logistics: Challenges and opportunities for technology providers. *Journal of Urban Mobility*, 2, 100020.

17. Galkin, A., Švadlenka, L., Vrba, R., & Kijewska, K. (2025). Navigating the future of urban logistics: Conceptual framework for Dynamic Freight Management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 147, 104956.

18. Le Pira, M., Ignaccolo, M., Inturri, G., Pluchino, A., & Rapisarda, A. (2016). Modelling stakeholder participation in transport planning. *Case Studies on Transport Policy*, 4(3), 230–238.

19. Janjevic, M., Knoppen, D., & Winkenbach, M. (2019). Integrated decision-making framework for urban freight logistics policy-making. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 333–357.

20. Galkin, A., Gajewska, T., Olkhova, M., & Beckers, J. (2025). Urban spatial attributes and sustainability: Operational efficiency in urban freight delivery. *Transport Policy*, 103917.

21. Bjørgen, A., & Ryghaug, M. (2022). Integration of urban freight transport in city planning: Lesson learned. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107, 103310.

22. Le Pira, M., Marcucci, E., Gatta, V., Ignaccolo, M., & Inturri, G. (2023). Participatory decision-support tools for stakeholder engagement in urban freight transport policy making. In *Handbook on City Logistics and Urban Freight* (pp. 327–345). Edward Elgar Publishing.

23. Kijewska, K., de Oliveira, L. K., dos Santos, O. R., Bertoncini, B. V., Iwan, S., & Eidhammer, O. (2021). Proposing a tool for assessing the level of maturity for the engagement of urban freight transport stakeholders: A comparison between Brazil, Norway, and Poland. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103047.

24. Sakti, S., Zhang, L., & Thompson, R. G. (2023). Synchronization in synchromodality. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 179, 103321.

25. van Duin, J. H. R., Warffemius, P. M. J., Verschoor, P. C. J., de Leeuw, A., & Alons-Hoen, K. M. R. (2019). Synchromodal transport: From theory to practice case study port of Rotterdam: Identifying the success/fail factors. *Transportation Research Board*, Washington, DC.

26. Paddeu, D., & Lyons, G. (2024). Foresight through developing shared mental models: The case of Triple Access Planning. *Futures*, 155, 103295.

27. Russo, F., & Comi, A. (2023). Overview of urban freight transport planning and European suggestions. In *Handbook on City Logistics and Urban Freight* (pp. 225–245). Edward Elgar Publishing.

28. de Oliveira, L. K., Leite Nascimento, C. D. O., de Sousa, P. R., de Resende, P. T. V., & Ferreira da Silva, F. G. (2019). Transport service provider perception of barriers and urban freight policies in Brazil. *Sustainability*, 11(24), 6890.

29. Sałabun, W., Palczewski, K., & Wątróbski, J. (2019). Multicriteria Approach to Sustainable Transport Evaluation under Incomplete Knowledge: Electric Bikes Case Study. *Sustainability*, 11(12), 3314. doi:10.3390/su11123314

30. Musolino, G., Rindone, C., Polimeni, A., & Vitetta, A. (2019). Planning urban distribution center location with variable restocking demand scenarios: General methodology and testing in a medium-size town. *Transport Policy*, 80, 157–166.

31. Gonzalez-Calderon, C. A., Posada-Henao, J. J., Granada-Muñoz, C. A., Moreno-Palacio, D. P., & Arcila-Mena, G. (2022). Cargo bicycles as an alternative to make sustainable last-mile deliveries in Medellin, Colombia. *Case Studies on Transport Policy*, 10(2), 1172–1187.

32. Sheth, M., Butrin, P., Goodchild, A., & McCormack, E. (2019). Measuring delivery route cost trade-offs between electric-assist cargo bicycles and delivery trucks in dense urban areas. *European Transport Research Review*, 11, 1–12. doi:10.1186/s12544-019-0349-5

33. Galkin, A., Švadlenka, L., Davidich, Y., & Beckers, J. (2026). Adaptive e-cargo bike allocation for sustainable cities: Balancing behavioral and efficiency metrics. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-20.

34. Patella, S. M., Grazieschi, G., Gatta, V., Marcucci, E., & Carrese, S. (2020). The adoption of green vehicles in last mile logistics: A systematic review. *Sustainability*, 13(1), 6.

35. Russo, F., & Comi, A. (2024). New challenges for city logistics: a unified view of energy and transport systems for addressing sustainability. *Transportation Research Procedia*, 79, 313–320.

36. Bruni, M. E., Khodaparasti, S., & Perboli, G. (2024). A bi-level approach for last-mile delivery with multiple satellites. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 160, 104495.

37. Hess, A. K., & Schubert, I. (2019). Functional perceptions, barriers, and demographics concerning e-cargo bike sharing in Switzerland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 71, 153–168.

38. Peng, X., Zhang, L., Thompson, R. G., & Wang, K. (2023a). A three-phase heuristic for last-mile delivery with spatial-temporal consolidation and delivery options. *International Journal of Production Economics*, 266, 109044.

39. Peng, W., & Xue, Z. (2023b). Route planning and benefit assessment of container drayage platooning considering truck-laden-or-empty state. *Computers & Industrial Engineering*, 175, 108879.

40. Galkin, A., Obolentseva, L., Balandina, I., Kush, E., Karpenko, V., & Bajdor, P. (2018/2019). Last-mile delivery for consumer driven logistics. *Transportation Research Procedia*, 39, 74–83.

41. Díaz-Ramírez, J., Zazueta-Nassif, S., Galarza-Tamez, R., Prato-Sánchez, D., & Huertas, J. I. (2023). Characterization of urban distribution networks with light electric freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119, 103719.

42. Prins, C., Lacomme, P., & Prodhon, C. (2014). Order-first split-second methods for vehicle routing problems: A review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 179–200.

43. Kush, Y., Skrypin, V., Galkin, A., Dolia, K., Tkachenko, I., & Davidich, N. (2018). Regularities of change of the supply chain operation efficiency, depending on the parameters of the transport process. *Transportation Research Procedia*, 30, 216–225.

44. Воронько, В. В., Галкін, А. С., Давідіч, Ю. О., Понкратов, Д. П., & Швець, М. Д. (2025). Визначення показника якості е-карго байків в логістичних системах з урахуванням суб'єктивної оцінки водіїв. *Municipal economy of cities*, 1(189), 455–463. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-455-463>

45. Mohri, S. S., Mohammadi, M., & Van Woensel, T. (2024). Designing zero-emissions containerized last-mile delivery systems: A case study for Melbourne. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 159, 104492.

46. Iwan, S., Nürnberg, M., Jedliński, M., & Kijewska, K. (2021). Efficiency of light electric vehicles in last mile deliveries—Szczecin case study. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103167.

47. Davidich, N., Galkin, A., Iwan, S., Kijewska, K., Chumachenko, I., & Davidich, Y. (2021). Monitoring of urban freight flows distribution considering the human factor. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103168.

48. Dalla Chiara et al. (2023). Повний бібліографічний опис відсутній у наданому вами списку літератури; це джерело потребує уточнення.

49. Aljohani, K., & Thompson, R. G. (2019). A Stakeholder-Based Evaluation of the Most Suitable and Sustainable Delivery Fleet for Freight Consolidation Policies in the Inner-City Area. Sustainability, 11, 124.

50. Nuzzolo, A., & Comi, A. (2014). City logistics planning: demand modelling requirements for direct effect forecasting. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 125, 239–250.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А АНАЛІЗ СЦЕНАРІЇВ

Таблиця А.1 – Опис сценаріїв моделювання

Сценарій	Транспортна робота, ткм	КВВ	КВП	Час доставки, год	Відстань, км	Кількість маршрутів, од	СКЗМ, од	Споживання енергії	СЕ1Д, грн	Рейтинг	Ранг
1	204,0	0,520	0,961	37	584	16	37	72*	1220,40	3,906	5
2	405,0	0,863	0,51	111	2380	349	1	1730**	1240,10	3,825	8
3	84,0	0,862	0,761	93	1243	157	4	6656	20,04	3,738	9
4	86,0	0,841	0,792	78	1060	141	4	3408	10,04	4,052	3
5	92,0	0,863	0,83	74	984	119	5	1572	10,48	4,660	1
6	101,0	0,864	0,824	71	936	108	5	10400	13,18	3,771	10
7	106,0	0,856	0,835	68	894	95	6	2235	10,68	4,368	2
8	107,0	0,865	0,836	66	846	85	7	9395*	20,87	3,888	7
9	217,0	0,524	0,977	38	596	17	36	16051**	40,91	3,197	15
10	424,0	0,878	0,58	129	2760	348	1	4252	10,30	3,523	11
11	110,0	0,883	0,7	99	1505	153	4	1976	09,60	4,043	4
12	113,0	0,871	0,739	94	1382	137	4	12990	13,97	3,392	13
13	115,0	0,871	0,750	86	1234	116	5	2725	09,83	3,903	6
14	125,0	0,890	0,770	87	1169	107	5	11340	13,47	3,506	12
15	128,0	0,870	0,790	77	1090	95	6	3808	11,17	2,553	16
16	110,0	0,880	0,70	97	1021	85	7	4416	11,35	3,219	14

* – дизельний автомобіль; ** – вантажні велосипеди; КВВ – коефіцієнт використання вантажопідйомності; КВП – коефіцієнт використання пробігу; СКЗМ – середня кількість зупинок на маршруті; СЕ1Д – споживання енергії на одну доставку