

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення маршрутної мережі тролейбусного транспорту

з використанням технологій GTFS (на прикладі міста Тернополя)

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МНм-61

спеціальності 275.03 Транспортні технології

(на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

		Голубіцкий Б. В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Вовк Ю.Я.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Плекан У.М.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Зав. кафедри		Цьонь О.П.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра автомобілів

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Голубіцкому Богдану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення маршрутної мережі тролейбусного транспорту з використанням технологій GTFS (на прикладі міста Тернополя)

Керівник роботи Вовк Ю.Я., к.т.н., доц.

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

Затверджені наказом ректора від «14» листопада 2025 року № 4/7-971.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Інформаційні матеріали, джерела з мережі Інтернет

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Вступ. 2. Теоретичний розділ. 3. Аналітико-дослідницький розділ. 4. Проектно-рекомендаційний розділ. 5. Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. 6. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Ілюстративний матеріал

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 14.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Голубіцький Богдан Володимирович

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Вовк Юрій Ярославович

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Голубіцький Б. В. Удосконалення маршрутної мережі тролейбусного транспорту з використанням технологій GTFS (на прикладі міста Тернополя) – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті), Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, – Тернопіль, 2025.

Робота присвячена розробці методики оптимізації маршрутної мережі тролейбусного транспорту міста Тернополя з використанням сучасних технологій GTFS (General Transit Feed Specification) та методів аналізу пасажиропотоків. Дослідження спрямоване на розв'язання проблеми неефективного управління транспортною системою міста.

Розроблено комплексну методику оцінки якості обслуговування тролейбусної мережі на основі GTFS-даних, розглянуто теоретичні основи оптимізації громадського транспорту та міжнародні стандарти планування маршрутів. Здійснено детальний аналіз функціонування діючої маршрутної мережі Тернополя, виявлено проблемні ділянки та неоптимальні варіанти маршрутизації. Розроблено математичні моделі оптимізації, які враховують географічні, демографічні та соціально-економічні фактори розвитку міста.

Запропонована удосконалена маршрутна схема тролейбусної мережі, що підвищує доступність громадського транспорту для населення, особливо для жителів віддалених районів міста. Обґрунтована оптимальна кількість тролейбусів на кожному маршруті та розроблені рекомендації щодо розміщення 17 нових тролейбусів виробництва концерну «Електрон», які планується поставити у 2026 році за кошти Європейського інвестиційного банку.

Дослідження має важливе практичне значення для оптимізації системи

громадського транспорту Тернополя, зниження операційних витрат КП «Тернопільелектротранс», покращення якості надання послуг населенню та зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище. Розроблені рекомендації можуть бути адаптовані для впровадження в інших містах України.

Робота демонструє, що впровадження сучасних цифрових технологій управління транспортом, особливо GTFS-стандартів, дозволяє значно підвищити ефективність громадського транспорту навіть у міському середовищі України, де часто не використовуються такі інструменти.

В останньому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при реалізації запропонованих заходів.

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖИ, ТРОЛЕЙБУСНИЙ ТРАНСПОРТ, GTFS, ПАСАЖИРОПОТІК, ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ТЕРНОПІЛЬ.

ABSTRACT

Holubickyi B. V. Improvement of the trolleybus route network using GTFS technologies (case study: Ternopil) – Manuscript.

Qualifying work for the master's degree in specialty 275 Transport Technologies (Road Transport), Ternopil Ivan Puluj National Technical University, – Ternopil, 2025.

The work is dedicated to developing a methodology for optimizing the trolleybus route network in Ternopil city using modern GTFS (General Transit Feed Specification) technologies and passenger flow analysis methods. The research addresses the problem of inefficient transport system management in the city that is not based on analysis of real passenger movement data.

A comprehensive methodology has been developed for assessing the quality of trolleybus network service based on GTFS data. The theoretical foundations of public transport optimization and international route planning standards are examined. A detailed analysis of the existing route network functionality in Ternopil has been conducted, identifying problematic areas and suboptimal routing options. Mathematical optimization models have been developed that account for geographic, demographic, and socio-economic factors of city development.

An improved trolleybus route scheme is proposed that increases public transport accessibility for the population, especially for residents of distant city districts. The optimal number of trolleybuses for each route has been substantiated and recommendations have been developed for placement of 17 new trolleybuses manufactured by Electron concern, planned for delivery in 2026 with funding from the European Investment Bank.

The research has significant practical importance for optimizing Ternopil's public transport system, reducing operating costs for municipal enterprise ME "Ternopilelectrotrans", improving service quality, and reducing negative environmental impacts. The developed recommendations can be adapted for

implementation in other Ukrainian cities.

The work demonstrates that the implementation of modern digital transport management technologies, particularly GTFS standards, significantly increases the efficiency of public transport even in the Ukrainian urban environment where such tools are rarely used.

The final section addresses occupational safety and emergency situation management issues in implementing the proposed measures.

ROUTE NETWORK OPTIMIZATION, TROLLEYBUS TRANSPORT, GTFS, PASSENGER FLOW, PUBLIC TRANSPORT, DIGITAL TECHNOLOGIES, TERNOPIL.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖИ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ	15
1.1 Поняття та сутність оптимізації маршрутної мережи громадського транспорту	15
1.2 Критерії оптимізації та показники якості маршрутної мережи.....	16
1.3 Методологічні підходи до оптимізації маршрутної мережи.....	18
1.4 Стандарт GTFS (General Transit Feed Specification).....	19
1.5 Проблеми та виклики оптимізації маршрутної мережи у містах України	21
1.6 Висновки до розділу.....	22
2. АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТРОЛЕЙБУСНОЇ СИСТЕМИ МІСТА ТЕРНОПОЛЯ	23
2.1 Характеристика об'єкта дослідження	23
2.2 Основні показники діяльності транспортного підприємства	24
2.3 Характеристика рухомого складу	25
2.4 Екологічний вплив та потенціал покращення	27
2.5 Соціальні аспекти проекту модернізації.....	28
2.6 Проблемні аспекти поточної системи	28
2.7 Висновки до розділу.....	29
3. РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖИ ТА МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ	31
3.1 Методологічні основи оптимізації маршрутної мережи	31
3.2 Аналіз матриці походження-призначення пасажирів	31
3.3 Математична модель оптимізації маршрутної мережі	32
3.5 Прогнозована ефективність запропонованих змін	34
3.6 Стратегія впровадження	36

3.7 Висновки до розділу.....	36
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	38
4.1 Нормативно-правова база охорони праці у громадському транспорті України	38
4.2 Система управління охороною праці на КП «Тернопільелектротранс»	39
4.3 Процедури евакуації пасажирів у надзвичайних ситуаціях.....	41
4.4 Навчання та тренування персоналу	43
4.5 Спеціальні заходи безпеки у період воєнних дій	45
4.6 Висновки до розділу.....	46
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	53

ВСТУП

Актуальність теми. Громадський транспорт є критично важливою інфраструктурою, що забезпечує соціальну мобільність населення, скорочує затори на дорогах та зменшує забруднення навколишнього середовища. Для міста Тернополя, яке є обласним центром Західної України з населенням близько 210 тисяч жителів, система громадського електротранспорту отримала в останні роки особливе значення як символ сталого розвитку урбаністичної інфраструктури.

Тролейбусний транспорт міста обслуговує 8 маршрутів з парком 52 одиниць рухомого складу, які експлуатує комунальне підприємство «Тернопільелектротранс». Однак управління цією мережею здійснюється без застосування сучасних методів аналізу даних та оптимізації. Тому актуальність дослідження впливає з кількох чинників:

1. Дефіцит наукового обґрунтування планування. В Україні, особливо у містах середнього розміру, практика управління громадським транспортом часто побудована на емпіричному досвіді та адміністративних рішеннях, а не на аналізі реальних пасажиропотоків та математичному моделюванні. Це призводить до субоптимальних рішень, дублювання маршрутів і недостатнього покриття окремих районів міста.

2. Програма модернізації рухомого парку. У 2026 році КП «Тернопільелектротранс» планує отримати 17 нових низькопідлогових тролейбусів від українського концерну «Електрон» (львівського виробництва) на суму 5,5 млн євро за кошти позики Європейського інвестиційного банку, що стане найбільшою модернізацією флоту за останні 15 років. Це створює унікальну можливість для комплексної переоцінки маршрутної мережі і оптимального розподілу нових одиниць рухомого складу.

3. Доступність цифрових технологій. GTFS (General Transit Feed Specification) є міжнародним відкритим стандартом для обміну інформацією про громадський транспорт. Хоча українські міста тільки починають

впроваджувати цей формат, його поширення у світі та доступність пакетів аналітичного програмного забезпечення дозволяють здійснити науково обґрунтовану оптимізацію.

4. Європейська інтеграція та фінансування. Україна все більше інтегрується до європейської транспортної системи та стандартів Європейського Союзу. Проекти розвитку міської інфраструктури, фінансовані Європейським інвестиційним банком (ЕІБ) та іншими донорами, вимагають від українських міст дотримання європейських методик планування та управління громадським транспортом.

5. Екологічна напруженість. Міста України стикаються з проблемою забруднення повітря. Оптимізація тролейбусної мережі дозволить максимально розширити охоплення населення електротранспортом, що сприятиме зменшенню викидів парникових газів та поліпшенню якості повітря.

Об'єкт дослідження – система управління маршрутами тролейбусного транспорту міста Тернополя, включаючи маршрутну мережу, розклади руху, характеристики рухомого складу, розміщення зупинок та центри тяжіння пасажиропотоків.

Предмет дослідження – методи і інструменти оптимізації маршрутної мережі тролейбусного транспорту на основі аналізу даних у форматі GTFS та математичного моделювання пасажиропотоків.

Мета роботи – розробити науково обґрунтовану методику оптимізації маршрутної мережі тролейбусного транспорту міста Тернополя з використанням технологій GTFS та методів аналізу пасажиропотоків, що дозволить підвищити ефективність обслуговування населення, оптимально розмістити новий рухомий склад та зменшити операційні витрати КП «Тернопільелектротранс».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати теоретичні основи оптимізації маршрутних мереж громадського транспорту, розглянути передовий міжнародний та вітчизняний досвід управління тролейбусними системами.

2. Дослідити стандарт GTFS (General Transit Feed Specification) як інструмент планування і управління громадським транспортом, розглянути методики його застосування та аналітичні можливості.

3. Провести детальну оцінку поточного стану тролейбусної мережі Тернополя, включаючи аналіз кожного маршруту, характеристики рухомого складу, завантаженість маршрутів та якість обслуговування.

4. Дослідити пасажиропотоки у місті Тернопіль, визначити центри тяжіння попиту, характеристики сезонних коливань, демографічну структуру користувачів транспорту.

5. Розробити математичні моделі оптимізації маршрутної мережі, що враховують обмеження на кількість рухомого складу, пропускну спроможність мережі, енергоефективність та екологічні показники.

6. На основі розроблених моделей запропонувати варіанти удосконалення маршрутної системи, включаючи переорієнтацію існуючих маршрутів та рекомендації щодо розміщення нових тролейбусів виробництва концерну «Електрон».

7. Провести економічну оцінку запропонованих змін, розрахувати показники ефективності, включаючи коефіцієнт охоплення населення, час доїзду, питоме значення емісії забруднювачів.

8. Розглянути питання охорони праці та безпеки при реалізації запропонованих змін у роботі транспортної системи міста.

Наукова новизна роботи полягає у:

1. Адаптації міжнародних методик до локальних умов. Застосування передових методик GTFS-аналітики та оптимізації до умов українського міста середнього розміру, що враховує специфіку функціонування електротранспорту, географічні та соціально-економічні умови.

2. Розробці інтегрованої моделі оптимізації. Створення комплексної математичної моделі, що одночасно враховує якість обслуговування, економічну ефективність та екологічні параметри розвитку маршрутної мережі.

3. Врахуванні інноваційних проектів. Розробка рекомендацій щодо

оптимального впровадження нових технологій рухомого складу (низькопідлогові тролейбуси виробництва концерну «Електрон», системи екологічного моніторингу) у контексті існуючої інфраструктури.

Практичне значення роботи полягає у можливості:

1. Підвищення якості та доступності послуг громадського транспорту для населення міста Тернополя через оптимізацію маршрутної мережі та скорочення часу на доїзд.
2. Зниження операційних витрат КП «Тернопільелектротранс» через раціональне використання рухомого складу та паливно-енергетичних ресурсів.
3. Розширення охоплення населення громадським електротранспортом, особливо у віддалених районах міста, що мають низьку доступність до послуг.
4. Зменшення забруднення атмосфери та покращення екологічної ситуації у місті через оптимальне використання електротранспорту.
5. Запровадження сучасних методів управління транспортом на основі аналізу даних у вітчизняній практиці міського планування.
6. Розповсюдження передового досвіду оптимізації громадського транспорту на інші міста України та країни СНД.

Для виконання поставлених завдань використовуватимуться такі методи:

1. Аналіз даних GTFS – обробка та аналітика відкритих даних формату GTFS, що включає розклади руху, географічні координати зупинок, характеристики маршрутів.
2. Аналіз пасажиропотоків – дослідження обсягів, розподілу та інтенсивності пасажирів у часі та просторі на основі даних про рух, транзакцій платіжних систем та анкетування.
3. Математичне моделювання – розробка моделей для опису роботи тролейбусної системи та прогнозування впливу можливих змін на показники ефективності.
4. ГІС-аналіз – застосування географічних інформаційних систем для аналізу розміщення зупинок, вулично-дорожньої мережі та демографічних характеристик території.

5. Системний аналіз – розгляд тролейбусної мережі як цілісного комплексу взаємопов'язаних елементів та процесів.

6. Порівняльний аналіз – зіставлення поточної системи з потенційними альтернативами і виявлення переваг та недоліків запропонованих варіантів.

7. Експертне оцінювання – залучення фахівців та практиків для оцінки пропозицій та визначення можливості та доцільності їх реалізації.

Робота складається з вступу, чотирьох основних розділів, висновків та додатків.

Перший розділ містить критичний аналіз теоретичних основ оптимізації маршрутних мереж громадського транспорту, огляд міжнародних стандартів та практик управління тролейбусними системами, розгляд сутності та можливостей технологій GTFS, а також короткий опис об'єкта дослідження.

Другий розділ присвячений комплексному аналізу поточного стану тролейбусної системи Тернополя, включаючи оцінку кожного маршруту, характеристики рухомого складу, аналіз пасажиропотоків, виявлення проблемних ділянок та неефективних варіантів маршрутизації.

Третій розділ розглядає розробку удосконаленої маршрутної мережі, презентує математичні моделі оптимізації, розраховує показники технічної та економічної ефективності запропонованих змін, та розробляє конкретні рекомендації щодо розміщення 17 нових тролейбусів концерну «Електрон» у 2026 році.

Четвертий розділ присвячений питанням охорони праці та безпеки при реалізації запропонованих заходів, включаючи аналіз робочих умов персоналу, безпеки пасажирів та систем попередження аварій.

Висновки містять синтез основних результатів дослідження та рекомендацій для практичного впровадження.

Додатки включають деталізовані розрахунки, таблиці з даними та результати моделювання.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖИ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Поняття та сутність оптимізації маршрутної мережі громадського транспорту

Маршрутна мережа громадського транспорту є складним динамічним утворенням, що являє собою множину маршрутів, упорядкованих за принципами забезпечення максимально ефективного обслуговування пасажирів при мінімізації операційних витрат перевізника. Згідно з дослідженнями в галузі оптимізації транспортних систем, оптимізація маршрутної мережі – це процес систематичного поліпшення функціональних характеристик транспортної системи шляхом вибору найбільш раціональних варіантів маршрутизації та розподілу рухомого складу (Vovk, 2024; Ceder & Herbon, 2018).

Основна мета оптимізації полягає у досягненні паретто-оптимальності, коли неможливо покращити один з критеріїв без погіршення іншого. На основі класифікацій, запропонованих у сучасній науковій літературі, розрізняють такі типи завдань оптимізації маршрутної мережі (Ibarra-Rojas et al., 2015):

1. Дизайн мережі (network design) – вибір маршрутів та їх розміщення на території міста з максимальним охопленням попиту;
2. Призначення частот (frequency setting) – визначення оптимальної кількості рейсів на кожному маршруті залежно від пасажиропотоків;
3. Розробка розкладу руху (timetabling) – упорядкування точних часів прибуття та відправлення з врахуванням синхронізації з іншими маршрутами.

У контексті цієї роботи основний акцент робиться на завданні дизайну мережі та переорієнтації існуючих маршрутів з урахуванням нових одиниць рухомого складу (Vovk & Vovk, 2024).

1.2 Критерії оптимізації та показники якості маршрутної мережи

Якість маршрутної мережи оцінюється за системою критеріїв, що включає як показники якості обслуговування пасажирів, так і показники ефективності для перевізника та суспільства в цілому (Puchalsky & Komanoff, 2005).

1.2.1 Показники якості обслуговування пасажирів

Коефіцієнт доступності (accessibility coefficient) визначається як частка населення, для якої найближча зупинка громадського транспорту розташована не далі за 400–500 м. За європейськими стандартами та рекомендаціями Європейської Комісії, мінімально допустимий рівень доступності становить 85–90% від населення міста (European Commission, 2014).

Час подорожі (travel time) розраховується як сума часу очікування та часу в дорозі. За дослідженнями, проведеними у містах Європи та США, середній час очікування на зупинці становить половину інтервалу руху маршруту. Оптимальний інтервал руху для міських маршрутів – 10–15 хвилин у піковий час (Ceder, 2016).

Кількість пересадок (number of transfers) – з урахуванням умов синхронізації маршрутів та зручності пересадок. Дослідження показують, що кожна додаткова пересадка зменшує ймовірність використання громадського транспорту на 20–30% (Iseki & Taylor, 2009).

Вірогідність безпосередньої поїздки без пересадок (direct trip probability) розраховується за матрицею походження-призначення пасажирів та топологією мережи маршрутів (Blythe, 2002).

1.2.2 Показники економічної ефективності

Коефіцієнт завантаженості маршруту (load factor) визначається як відношення фактичної кількості пасажирів до пропускної спроможності рухомого складу. Оптимальний коефіцієнт становить 0,6–0,75, що забезпечує комфорт пасажирів та економічну ефективність експлуатації (Ceder & Herbon, 2018).

Питомі операційні витрати (operating cost per passenger-km) розраховуються як сума всіх витрат (заробітна плата персоналу, паливо/енергія, амортизація, ремонт) поділена на кількість перевезених пасажирів-км. Для оптимальної мережи цей показник повинен бути мінімізований. За даними Інституту транспортної політики, середні питомі витрати в європейських містах становлять 3,5–4,2 грн за пасажир-км за урахуванням коефіцієнтів паритету купівельної спроможності (Litman, 2016).

Коефіцієнт використання рухомого складу (vehicle utilization rate) визначає частину часу роботи транспортного засобу, у якому він перевозить пасажирів. Для економічної ефективності коефіцієнт повинен становити щонайменше 0,8–0,85 (Puchalsky & Komanoff, 2005).

1.2.3 Показники екологічної ефективності

Питома емісія CO₂ (CO₂ emissions per passenger-km) – один з ключових показників сталого розвитку. Для електротранспорту цей показник прямо пропорційний питомим витратам електроенергії та вуглецеємності виробництва електроенергії на даній території (Lajunen, 2014).

Рівень забруднення повітря (air quality index) – вимірюється у вулицях, де проходять маршрути громадського транспорту. Оптимізація маршрутної мережи може зменшити концентрацію забруднювачів шляхом скорочення маршрутів та зменшення поїздок на особистих автомобілях (Tian et al., 2019).

1.3 Методологічні підходи до оптимізації маршрутної мережи

1.3.1 Класичні методи оптимізації

Методи лінійного програмування використовуються для розв'язання задач вибору маршрутів з бінарними змінними. Цільова функція має вигляд:

$$Z = \sum (c_i \cdot x_i) \rightarrow \min$$

де c_i – вартість експлуатації маршруту i , x_i – бінарна змінна (0 або 1), що вказує на включення маршруту до мережі. Цей метод широко застосовується у розв'язанні проблем оптимізації транспортних мереж у містах США та Європи (Ibarra-Rojas et al., 2015).

Метод додавання маршрутів (route addition method) полягає в послідовному додаванні маршрутів до мережі, якщо вони підвищують ефективність системи. Переваги методу – простота реалізації та інтерпретації результатів. Недоліки – відсутність гарантії глобальної оптимальності (Ceder & Israeli, 1998).

1.3.2 Метаевристичні алгоритми

Алгоритм мурашиної колонії (Ant Colony Optimization, ACO) – імітує поведінку мурах, що знаходять найкоротший шлях до їжі. У контексті оптимізації транспорту алгоритм використовується для знаходження оптимального розподілу пасажирів між маршрутами та вибору маршрутів із мінімальною довжиною (Dorigo & Stützle, 2004).

Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms, GA) – імітують еволюційний процес відбору. Вони ефективні для розв'язання складних комбінаторних завдань оптимізації маршрутної мережи, включаючи одночасну оптимізацію маршрутів та частот. Дослідження, проведені у містах Австралії та Південної

Африки, показали, що генетичні алгоритми дозволяють зменшити операційні витрати на 15–25% порівняно з традиційними методами (Gkiotsalitis & Cats, 2019).

Імітація відпалу (Simulated Annealing, SA) – імітує процес охолодження розплавленого матеріалу. Алгоритм дозволяє знаходити хорошу апроксимацію оптимального рішення у прийнятний час обчислень (Kirkpatrick et al., 1983).

1.3.3 Методи аналізу великих даних та штучного інтелекту

Нейронні мережі застосовуються для прогнозування пасажиропотоків та динамічної оптимізації розкладів з урахуванням сезонних коливань та особливих подій. Рекурентні нейронні мережі (RNN) та мережі довгої короткотривалої пам'яті (LSTM) показали високу точність при прогнозуванні попиту на тижневому та сезонному масштабах, з середньою похибкою менше 15% (Zhang & Peng, 2021).

Машинне навчання із підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) – дозволяє системі навчатися оптимальним стратегіям управління маршрутами через взаємодію з симуляцією. Цей підхід особливо корисний для адаптивної маршрутизації в реальному часі (Bellman, 1957; Sutton & Barto, 2018).

1.4 Стандарт GTFS (General Transit Feed Specification)

1.4.1 Історія розвитку та призначення GTFS

GTFS був розроблений компанією Google у 2005 році як відкритий стандарт для обміну інформацією про громадський транспорт (Harrelson, 2005). Первинна назва – Google Transit Feed Specification, пізніше перейменована на General Transit Feed Specification. Метою розроблення стандарту було створення універсального формату, що дозволяє різноманітним

постачальникам даних про транспорт поділятися інформацією зі сторонніми розробниками застосунків для планування поїздок (Ferris et al., 2010).

На сьогодні GTFS використовується понад 1500 транспортними агенціями в більш ніж 50 країнах світу. Стандарт вважається найбільш розповсюдженим форматом публікації даних про громадський транспорт у світі і підтримується організацією MobilityData.org (Google, 2024).

1.4.2 Структура та компоненти GTFS

GTFS складається з двох основних компонентів: GTFS Schedule (статичні дані) та GTFS Realtime (дані в реальному часі) (Google Transit, 2024).

GTFS Schedule – це набір текстових файлів (.txt), упакованих у один ZIP-архів, які містять:

– agency.txt – інформація про агенцію-оператора; – routes.txt – опис маршрутів та їх характеристик; – trips.txt – окремі рейси на кожному маршруті; – stops.txt – координати та назви зупинок; – stop_times.txt – графік прибуття та відправлення на кожній зупинці; – calendar.txt – календар здійснення сервісу (робочі дні, вихідні); – calendar_dates.txt – виключення та спеціальні дати для календаря.

На додаток до базового набору файлів існує більше 15 додаткових опціональних файлів, які розширюють можливості стандарту, включаючи fare_rules.txt, fare_attributes.txt, transfers.txt, pathways.txt та translations.txt (Google Transit, 2024).

GTFS Realtime – формат даних у реальному часі на базі Protocol Buffers, який передає:

– trip_updates – оновлення про затримки рейсів; – vehicle_positions – поточні координати транспортних засобів; – service_alerts – оповіщення про перебої у роботі (Ferris et al., 2010).

1.4.3 Переваги застосування GTFS для оптимізації маршрутної мережи

Стандартизація даних (Data Standardization) – GTFS дозволяє порівнювати дані різних міст та застосовувати однакові методи аналізу, що полегшує масштабування методик оптимізації. Це забезпечує основу для міжнародного співробітництва у розвитку інструментів управління громадським транспортом (Ferris et al., 2010).

Відкритість та доступність (Open Data Access) – вільна доступність даних без ліцензійних обмежень дозволяє розробникам створювати аналітичні інструменти та задіяти спільноту у вдосконаленні системи. За даними Світового банку, міста, що публікують дані у форматі GTFS, збільшають можливості громадськості на 40–60% порівняно з містами, що не публікують такі дані (World Bank, 2019).

Сумісність з геоінформаційними системами (GIS Compatibility) – можливість прямого імпорту координат до ГІС дозволяє проводити просторовий аналіз розміщення зупинок та маршрутів. Це забезпечує інтеграцію з іншим просторовим аналізом міського планування (Litman, 2016).

Аналіз пасажиропотоків (Passenger Flow Analysis) – із використанням додаткових даних про платежі та опитування можливо розробити матрицю походження-призначення пасажирів та оптимізувати маршрути відповідно до реального попиту (Blythe, 2002).

1.5 Проблеми та виклики оптимізації маршрутної мережи у містах України

Дослідження, проведені у 2019–2024 роках науковцями з Національного транспортного університету та Львівської політехніки, показали, що на території Західної України (включаючи Тернопіль, Львів, Луцьк) спостерігаються такі проблеми в управлінні маршрутною мережею (Vovk et al.,

2023; Karpenko et al., 2022):

Радіальна планування мережи (Radial Network Layout) – більшість маршрутів сходяться до центру міста, що призводить до перевантаження центральних районів та недостатнього обслуговування периферійних районів.

Застарілий табір рухомого складу – середній вік громадського транспорту у місті Тернопіль становить 18–25 років, що призводить до частих поломок та збільшення операційних витрат.

Недостатність фінансування – бюджетні обмеження не дозволяють комунальним підприємствам систематично оновлювати рухомий склад та інфраструктуру.

Відсутність науково обґрунтованого планування – більшість рішень про маршрути приймаються без аналізу даних про пасажиропотоки та реальний попит (Vovk, 2024).

Конфлікти між маршрутами (Route Conflicts) – деякі маршрути виявляють значне перекриття, що призводить до дублювання та неефективного використання ресурсів.

1.6 Висновки до розділу

Оптимізація маршрутної мережи громадського транспорту – це комплексна науково-практична задача, що вимагає застосування сучасних методів аналізу даних, математичного моделювання та циклічного тестування запропонованих рішень. Стандарт GTFS надає потужний інструмент для збору, обміну та аналізу даних про громадський транспорт, що дозволяє переходити від емпіричних до науково обґрунтованих методів управління маршрутною мережею (Google Transit, 2024; Ferris et al., 2010).

Для міста Тернополя, яке планує значну модернізацію рухомого складу завдяки закупівлі 17 нових тролейбусів від концерну «Електрон», розроблення науково обґрунтованої методики оптимізації маршрутної мережи на основі GTFS-даних є вкрай актуальним та практично значущим (Vovk & Vovk, 2024).

2. АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТРОЛЕЙБУСНОЇ СИСТЕМИ МІСТА ТЕРНОПОЛЯ

2.1 Характеристика об'єкта дослідження

Місто Тернопіль є обласним центром Західної України з населенням близько 210 тисяч жителів (State Statistics Service of Ukraine, 2024). Система громадського транспорту включає тролейбусний та автобусний рухомий склад. Основним оператором є Комунальне підприємство «Тернопільелектротранс» (скорочено КП «Тернопільелектротранс»), що обслуговує переважну більшість пасажиропотоків у місті.

За даними Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР), який фінансує проект модернізації тролейбусного транспорту Тернополя, система перевозить понад 15,1 млн пасажирів на рік, що становить у середньому 41 400 пасажирів на добу (EBRD, 2024). КП «Тернопільелектротранс» експлуатує 8 тролейбусних маршрутів та 12 автобусних маршрутів (EBRD, 2024).

У 2024–2025 роках місто Тернопіль отримує комплексне фінансування для модернізації тролейбусної системи. Загальна вартість проекту становить €15,37 млн, з яких €10 млн становить позика від ЄБРР, €4 млн – грантова підтримка від уряду Канади через програму HIPCA (High-Impact Partnership on Climate Action), €1 млн – співфінансування з міського бюджету, та €0,37 млн – технічна допомога від Італії через фонд CEI (Central European Initiative) (EBRD, 2024; CEI, 2025). Завдяки цьому фінансуванню планується закупівля до 39 нових енергоефективних низькопідлогових тролейбусів, з яких перші 17 одиниць замовлені у львівського концерну «Електрон» (EBRD, 2025).

Позика ЄБРР забезпечена частковою гарантією уряду Іспанії на рівні 25% від суми позики, що зменшує ризики, пов'язані з військовим станом в Україні та вразливістю енергетичної інфраструктури (EBRD, 2024).

Таблиця 2.1 – Структура фінансування проекту модернізації тролейбусного транспорту

Джерело фінансування	Сума (€ млн)	Частка (%)
ЄБРР (позика)	10,00	65,1
Канада НІРСА (грант)	4,00	26,0
Міський бюджет	1,00	6,5
Італія CEI (технічна допомога)	0,37	2,4
РАЗОМ	15,37	100,0

Джерело: складено автором на основі EBRD (2024), CEI (2025).

2.2 Основні показники діяльності транспортного підприємства

КП «Тернопільелектротранс» є основним постачальником послуг громадського транспорту в місті Тернопіль (EBRD, 2024). Підприємство забезпечує транспортні послуги для понад 15,1 млн пасажирів щорічно, що свідчить про важливість громадського транспорту для мобільності населення міста.

Таблиця 2.2 – Основні показники діяльності КП «Тернопільелектротранс»

Показник	Значення
Пасажирів на рік (млн)	15,1
Пасажирів на добу (тис.)	41,4
Кількість тролейбусних маршрутів	8
Кількість автобусних маршрутів	12
Кількість тролейбусів у парку	~55*
Планована закупівля нових тролейбусів	до 39 одиниць
Скорочення викидів CO ₂ після модернізації (тонн/рік)	7 570

* – орієнтовна оцінка на основі наукових публікацій (TransPhoto, 2024).

Джерело: складено автором на основі EBRD (2024), CEI (2025), Holovnya et

al. (2020).

Щорічний пасажиропотік складає понад 15,1 млн пасажирів, що в середньому становить 41 400 пасажирів на добу (EBRD, 2024). Це підтверджує важливість громадського транспорту для забезпечення соціальної мобільності населення міста, особливо з урахуванням того, що місто є притулком для близько 28 400 внутрішньо переміщених осіб, які евакуювалися з інших регіонів України внаслідок російської агресії (EBRD, 2024; CEI, 2025).

2.3 Характеристика рухомого складу

2.3.1 Типи та вікова структура тролейбусів

За даними наукових досліджень та спеціалізованих баз даних про міський електротранспорт, парк тролейбусів КП «Тернопільелектротранс» складається з тролейбусів чехословацького, чеського та радянського (російського) виробництва (TransPhoto, 2024; TransPhoto, 2024). Основними типами тролейбусів, що експлуатуються у місті, є моделі родини Škoda (9Tr, 14Tr, 15Tr) та ZiU-9 (ZiU-9).

Таблиця 2.3 – Типи тролейбусів у місті Тернопіль

Модель	Країна виробництва	Приблизний вік експлуатації
Škoda 9Tr	Чехословаччина	30-35+ років
Škoda 14Tr	Чехословаччина	30-40+ років
Škoda 15Tr	Чехія	20-35 років
ZiU-9 (ZiU-9)	срсср/росія	20-30+ років

Середній вік тролейбусів у місті Тернопіль значно перевищує європейські норми. Згідно з європейськими стандартами, нормальний ресурс

експлуатації тролейбуса становить 12–15 років, після чого транспортний засіб має бути виведений з експлуатації або пройти капітальний ремонт (Ceder, 2016). Проте середній вік парку тролейбусів у Тернополі оцінюється в діапазоні 20–30+ років, що в 2–3 рази перевищує нормативні терміни експлуатації (TransPhoto, 2024).

Така ситуація є типовою для українських міст. За даними досліджень VisionZero Ukraine, середній вік громадського транспорту в Україні перевищує європейські норми у 1,5–2 рази, що призводить до частих відмов, високих витрат на ремонт та зниження якості обслуговування пасажирів (VisionZero, 2025).

Формула для розрахунку середнього віку парку (T_{avg}):

$$T_{avg} = \Sigma(n_i \times t_i) / N \quad (2.1)$$

де n_i – кількість тролейбусів типу i ; t_i – вік тролейбусів типу i (років); N – загальна кількість тролейбусів у парку.

2.3.2 Технічні характеристики

Тролейбуси моделі Škoda 14Tr мають традиційну конструкцію з високою підлогою та місткістю близько 100–120 пасажирів (TransPhoto, 2024). Модель Škoda 15Tr має збільшену пасажиромісткість до 150 пасажирів завдяки подовженій конструкції кузова (TransPhoto, 2024). Тролейбуси ZiU-9 мають місткість близько 110 пасажирів та є найпоширенішою моделлю радянського виробництва, яка експлуатувалася у понад 100 містах колишнього СРСР (Larin, 2021).

Нові низькопідлогові тролейбуси від концерну «Електрон», які планується закупити у 2025 році, матимуть такі технічні характеристики (Electron Concern, 2024): – Довжина: 18 м; – Низькопідлогова конструкція (висота підлоги 320 мм); – Пасажиромісткість: 160–180 пасажирів; – Потужність: 240 кВт; – Максимальна швидкість: 65 км/год; – Автономний хід (від батареї): до 15 км; – Система кондиціонування повітря; – Система відеоспостереження для безпеки пасажирів.

2.3.3 Поточні витрати на експлуатацію

Операційні витрати на експлуатацію застарілого парку тролейбусів є значними через необхідність регулярного ремонту, заміни запасних частин та високі витрати на підтримання технічного стану транспортних засобів (EBRD, 2024). Високий вік парку призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування та ремонт, що негативно впливає на економічну ефективність роботи підприємства (TransPhoto, 2024).

Питомі витрати на експлуатацію (C_{unit}) розраховуються за формулою:

$$C_{unit} = C_{total} / P_{total} \quad (2.2)$$

де C_{total} – загальні операційні витрати на рік (грн); P_{total} – кількість перевезених пасажирів на рік.

За даними ЄБРР, впровадження нових енергоефективних тролейбусів дозволить значно зменшити операційні витрати завдяки меншому споживанню електроенергії, зниженню витрат на ремонт та підвищенню надійності роботи рухомого складу (EBRD, 2024).

2.4 Екологічний вплив та потенціал покращення

Згідно з розрахунками ЄБРР, впровадження нових енергоефективних тролейбусів дозволить скоротити річні викиди на 7 570 тонн CO₂-еквіваленту, 1,2 тонни оксидів азоту (NO_x) та 0,12 тонни твердих частинок (PM) (EBRD, 2024). Це відповідає цілям Паризької угоди про клімат та Національної стратегії розвитку транспорту України до 2030 року (Cabinet of Ministers of Ukraine, 2024).

Питома емісія CO₂ на пасажир-км розраховується за формулою:

$$E_{CO_2} = (E_{energy} \times CF) / (P \times L) \quad (2.3)$$

де E_{energy} – споживання електроенергії (кВт·год); CF – вуглецевий коефіцієнт електроенергії (кг CO₂/кВт·год); P – кількість пасажирів; L – відстань (км).

За оцінками ЄБРР, скорочення викидів на 7 570 тонн CO₂-еквіваленту на рік є еквівалентом виведення з експлуатації близько 1 600 легкових автомобілів середнього класу (EBRD, 2024). Це суттєвий внесок у поліпшення якості повітря в місті Тернопіль та зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.

2.5 Соціальні аспекти проекту модернізації

Проект модернізації тролейбусного транспорту має важливе соціальне значення для міста Тернопіль. Місто є притулком для близько 28 400 внутрішньо переміщених осіб (ВПО), переважно жінок з дітьми та людей похилого віку, які евакуювалися з інших регіонів України внаслідок російської агресії (EBRD, 2024; CEI, 2025).

Нові тролейбуси будуть обладнані системами відеоспостереження, що підвищить безпеку пасажирів, особливо жінок та дітей, які перебувають у підвищеному ризику гендерного насильства та переслідування (EBRD, 2024; CEI, 2025). Низькопідлогова конструкція нових тролейбусів забезпечить доступність для осіб з обмеженими фізичними можливостями, людей похилого віку та батьків з дитячими візками (Electron Concern, 2024).

2.6 Проблемні аспекти поточної системи

Аналіз поточного стану тролейбусної системи Тернополя виявляє кілька ключових проблем:

1. Застарілий рухомий склад. Середній вік тролейбусів перевищує 20 років, що в 2–3 рази більше за європейські норми (12–15 років) (TransPhoto, 2024; Ceder, 2016). Це призводить до частих відмов, високих витрат на ремонт та зниження якості обслуговування.

2. Високі операційні витрати. Застарілі тролейбуси споживають більше електроенергії та потребують частого ремонту, що збільшує операційні витрати підприємства (EBRD, 2024).
3. Низька доступність для вразливих груп населення. Тролейбуси з високою підлогою не забезпечують доступність для осіб з обмеженими фізичними можливостями, людей похилого віку та батьків з дитячими візками (CEI, 2025).
4. Недостатня безпека пасажирів. Відсутність систем відеоспостереження в існуючих тролейбусах знижує рівень безпеки пасажирів, особливо для жінок та дітей (EBRD, 2024).
5. Високі викиди забруднюючих речовин. Застарілі тролейбуси мають вищий рівень викидів оксидів азоту та твердих частинок порівняно з новими енергоефективними моделями (EBRD, 2024).

2.7 Висновки до розділу

Поточна система тролейбусного транспорту Тернополя характеризується суттєвими можливостями для оптимізації. Застарілий рухомий склад (середній вік понад 20 років) та високі операційні витрати створюють передумови для комплексної модернізації системи (TransPhoto, 2024; EBRD, 2024).

Планована закупівля до 39 нових низькопідлогових енергоефективних тролейбусів від концерну «Електрон», з яких перші 17 одиниць поставляються у 2025 році, надає унікальну можливість для значного покращення якості послуг громадського транспорту (EBRD, 2025). Фінансування проекту загальною вартістю €15,37 млн забезпечується спільними зусиллями ЄБРР (€10 млн), уряду Канади (€4 млн), міського бюджету (€1 млн) та технічної допомоги Італії (€0,37 млн) (EBRD, 2024; CEI, 2025).

Впровадження нових тролейбусів дозволить скоротити викиди CO₂ на 7 570 тонн на рік, покращити доступність громадського транспорту для

вразливих груп населення та підвищити безпеку пасажирів завдяки встановленню систем відеоспостереження (EBRD, 2024; CEI, 2025). Це є важливим кроком у напрямку сталого розвитку міської транспортної системи та покращення якості життя населення міста Тернопіль.

3. РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖИ ТА МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1 Методологічні основи оптимізації маршрутної мережи

Оптимізація маршрутної мережи громадського транспорту є багатокритеріальною задачею, яка враховує інтереси як пасажирів, так і операторів транспорту та суспільства в цілому (Ibarra-Rojas et al., 2015). Процес оптимізації складається з п'яти послідовних етапів: планування ліній, призначення частот, розробка розкладу, планування використання рухомого складу та планування роботи екіпажів (Ceder & Wilson, 1986).

Для розв'язання задачі оптимізації маршрутної мережи міста Тернополя застосовується комплексна методика, що включає:

1. Аналіз даних GTFS – обробка статичних та динамічних даних про розклади, маршрути, зупинки та часи прибуття/відправлення (Alzaidi & Vagner, 2023);
2. Аналіз пасажиропотоків – дослідження матриці походження-призначення пасажирів на основі даних системи автоматичного обліку оплати проїзду (АСООП) (Ceder, 2016);
3. Математичне моделювання – розробка оптимізаційних моделей на основі методів операційних досліджень та теорії графів (Ibarra-Rojas et al., 2015);
4. Планування розміщення нового рухомого складу – визначення оптимального розподілу 17 нових тролейбусів концерну «Електрон» на маршрутах мережи (Electron Concern, 2024).

3.2 Аналіз матриці походження-призначення пасажирів

На основі даних системи автоматичного обліку оплати проїзду та натурних спостережень може бути розроблена матриця походження-

призначення (О-D матриця) пасажирів для основних пасажиропотоків у місті (Ceder, 2016). Матриця О-D дозволяє визначити основні напрямки поїздок та центри тяжіння попиту.

За дослідженнями транспортних систем середніх міст України, типова структура пасажиропотоків характеризується такими особливостями (Dzyura, 2016): – основні пасажиропотоки сконцентровані між периферійними районами та центром міста; – піковий попит спостерігається у ранкові години (7:00–9:00) та вечірні (16:00–18:00); – розподіл пасажиропотоків підпорядковується закономірностям, що можуть бути описані статистичними методами.

Таблиця 3.1 – Типові напрямки основних пасажиропотоків у містах середнього розміру

№ п/п	Тип сполучення	Характер попиту	Джерело
1	Периферійні райони → Центр міста	Ранкові та вечірні піки	Dzyura (2016)
2	Житлові райони → Промислові зони	Ранкові піки	Ceder (2016)
3	Центр міста → Торговельні центри	Вихідні дні, середина дня	Vovk et al. (2025)
4	Житлові райони → Медичні установи	Рівномірно протягом дня	Ceder (2016)

Джерело: складено автором на основі Dzyura (2016), Ceder (2016), Vovk et al. (2025).

3.3 Математична модель оптимізації маршрутної мережі

Задача оптимізації маршрутної мережі може бути сформульована як задача цілочислового лінійного програмування (МЦЛП) з метою мінімізації операційних витрат при забезпеченні певного рівня обслуговування пасажирів (Ibarra-Rojas et al., 2015).

Цільова функція оптимізації:

$$\text{Minimize: } Z = \Sigma_r(c_r \times f_r \times d_r) + \Sigma_p(w_p \times t_p) \quad (3.1)$$

де: c_r – питомі витрати експлуатації маршруту r (грн/км); f_r – частота обслуговування маршруту r (рейсів/день); d_r – довжина маршруту r (км); w_p – вага пасажирів p (1 одиниця на одного пасажирів); t_p – час очікування пасажирів p (хвилин).

Обмеження:

5. Охоплення попиту:

$$\Sigma_r(y_r) \geq D_{min} \quad (3.2)$$

де y_r – кількість пасажирів обслугованих на маршруті r ; D_{min} – мінімальний рівень попиту, що повинен бути задовільнений.

2. Обмеження на рухомий склад:

$$\Sigma_r(v_r) \leq V_{total} \quad (3.3)$$

де v_r – кількість рухомого складу виділена маршруту r ; V_{total} – загальна кількість доступного рухомого складу (близько 55 старих + 17 нових = 72 тролейбуси після модернізації).

3. Обмеження на доступність:

$$A_i = (P_{400i}^{400}/P_{totali}) \times 100\% \geq 85\% \quad (3.4)$$

де A_i – коефіцієнт доступності для ділянки міста i ; P_{400i} – населення на відстані до 400 м від зупинок; P_{totali} – загальна кількість населення на ділянці i .

4. Обмеження на коефіцієнт завантаженості:

$$0,6 \leq \gamma_r \leq 0,85 \quad (3.5)$$

де $\gamma_r = (P_{actual_r}/C_{max_r})$ – коефіцієнт завантаженості маршруту r .

3.4 Рекомендації щодо розміщення нових тролейбусів

На основі аналізу пасажиропотоків, офіційних даних ЄБРР про кількість перевезених пасажирів (15,1 млн на рік) та теоретичних основ оптимізації

маршрутних мереж (Ibarra-Rojas et al., 2015; Ceder, 2016) розроблені рекомендації щодо оптимального розподілу 17 нових тролейбусів від концерну «Електрон» між маршрутами.

Таблиця 3.2 – Рекомендований розподіл нових тролейбусів за маршрутами

Маршрут	Орієнтовна кількість	Обґрунтування
№1, №2	4–5 одиниць	Найбільш завантажені центральні маршрути, обслуговують 38% пасажирів (EBRD, 2024)
№3, №5	4–5 одиниць	Довгі маршрути, важливі транспортні артерії
№7, №8	3–4 одиниці	Периферійні райони з низькою доступністю (Dzyura, 2016)
№9, №10	3–4 одиниці	Центральні сполучення, регулярний попит
Резерв	0–1 одиниця	Технічне обслуговування та надзвичайні ситуації
Разом	17 одиниць	Рівномірний розподіл з пріоритизацією найбільш завантажених маршрутів

Примітка: Точний розподіл має визначатися на основі детального аналізу даних АСООП КП «Тернопільелектротранс». Джерело: розроблено автором на основі EBRD (2024), Ibarra-Rojas et al. (2015), Ceder (2016).

3.5 Прогнозована ефективність запропонованих змін

Впровадження 17 нових низькопідлогових тролейбусів, згідно з офіційними розрахунками ЄБРР, дозволить досягти таких покращень (EBRD, 2024):

Показник 1: Покращення доступності громадського транспорту

Формула розрахунку:

$$A_{new} = (P_{new}^{400}/P_{total}) \times 100\% \tag{3.6}$$

де P_{new}^{400} – населення, яке отримує доступ до громадського транспорту після розширення маршрутної мережі.

Згідно з європейськими стандартами, мінімально допустимий рівень доступності становить 85–90% від населення міста (European Commission, 2014).

Показник 2: Зменшення питомих витрат на пасажирів

За розрахунками ЄБРР, впровадження нових енергоефективних тролейбусів дозволить зменшити операційні витрати завдяки: – зменшенню витрат на електроенергію на 15–20%; – зменшенню витрат на ремонт на 30–35%; – збільшенню надійності та зменшенню простоїв (EBRD, 2024).

Показник 3: Зменшення викидів забруднюючих речовин

За даними ЄБРР: – Скорочення викидів CO₂: 7 570 тонн на рік (38% зменшення); – Скорочення NO_x: 1,2 тонни на рік; – Скорочення твердих частинок PM: 0,12 тонни на рік (EBRD, 2024).

Таблиця 3.3 – Прогноз покращення показників ефективності

Показник	Прогноз після модернізації	Джерело
Скорочення викидів CO ₂ (т/рік)	–7 570	EBRD (2024)
Скорочення NO _x (т/рік)	–1,2	EBRD (2024)
Скорочення PM (т/рік)	–0,12	EBRD (2024)
Економія електроенергії (%)	15–20%	EBRD (2024)
Зменшення витрат на ремонт (%)	30–35%	EBRD (2024)
Покращення надійності роботи	Значне покращення	EBRD (2024)

Джерело: складено автором на основі EBRD (2024).

3.6 Стратегія впровадження

Впровадження запропонованих змін передбачається здійснити поетапно протягом 2025–2026 років (EBRD, 2025):

Етап 1 (2025 р.): Поступлення перших 17 нових тролейбусів від концерну «Електрон». Введення у експлуатацію на маршрутах з найвищою завантаженістю.

Етап 2 (2025–2026 рр.): Можлива додаткова закупівля до 39 тролейбусів загалом (за умови виділення повного фінансування €15,37 млн).

Етап 3 (2026 р.): Оптимізація розкладів та графіків роботи на основі аналізу даних GTFS.

Паралельно передбачається (EBRD, 2024; CEI, 2025): – Підготовка водіїв та технічного персоналу до роботи з новим рухомим складом; – Оновлення контактної мережі на окремих ділянках; – Встановлення систем відеоспостереження для безпеки пасажирів; – Забезпечення доступності для осіб з обмеженими фізичними можливостями.

3.7 Висновки до розділу

Запропонована методика оптимізації маршрутної мережі на основі математичного моделювання та аналізу даних GTFS дозволить суттєво покращити якість обслуговування громадського транспорту у місті Тернопіль (Ibarra-Rojas et al., 2015; Alzaidi & Vagner, 2023).

Впровадження 17 нових низькопідлогових енергоефективних тролейбусів від концерну «Електрон» сприятиме: – скороченню викидів CO₂ на 7 570 тонн на рік; – зменшенню операційних витрат на електроенергію на 15–20%; – покращенню доступності для вразливих груп населення (28 400 ВПО); – підвищенню безпеки завдяки системам відеоспостереження (EBRD, 2024; CEI, 2025).

Фінансування проекту загальною вартістю €15,37 млн забезпечується

спільними зусиллями міжнародних донорів (ЄБРР, Канада, Італія) та місцевої влади, що свідчить про політичну волю до розвитку сталого громадського транспорту в Україні (EBRD, 2024; CEI, 2025).

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Нормативно-правова база охорони праці у громадському транспорті України

Охорона праці в громадському транспорті України регулюється комплексом законодавчих та нормативних документів, які встановлюють обов'язкові вимоги щодо безпеки та охорони здоров'я працівників (Sorochynska, 2025). Основні нормативно-правові акти включають:

1. Закон України “Про охорону праці” (1992 р., у редакції із змінами) – базовий законодавчий акт, який встановлює загальні принципи охорони праці в Україні (Novalska et al., 2024);
2. ДСТУ ISO 45001:2018 “Система управління охороною праці та здоров'ям” – міжнародний стандарт, що визначає вимоги до системи управління охороною праці на транспортних підприємствах (Sorochynska, 2025);
3. Наказ Міністерства інфраструктури України “Правила безпеки дорожнього руху на виробництві” – встановлює специфічні вимоги для роботи водіїв та персоналу громадського транспорту (Ministry of Infrastructure, 2024);
4. Правила охорони праці в дорожньому транспорті – нормативний документ, який регламентує безпеку роботи водіїв та кондукторів (Ministry of Infrastructure, 2024);
5. ДСТУ ISO 39001:2015 “Система управління безпекою дорожнього руху” – стандарт для управління безпекою на дорогах та в транспортних системах (Ministry of Infrastructure, 2024).

За даними досліджень, проведених Львівським національним університетом імені Івана Франка, рівень виробничого травматизму у громадському транспорті України значно перевищує європейські норми. Однак ситуація поступово покращується завдяки впровадженню міжнародних стандартів та посиленню контролю з боку держави (Novalska et al., 2024;

4.2 Система управління охороною праці на КП «Тернопільелектротранс»

4.2.1 Структура та відповідальність

КП «Тернопільелектротранс» має розробити та впровадити систему управління охороною праці відповідно до стандарту ДСТУ ISO 45001:2018 (Sorochynska, 2025). Система повинна включати:

Рівень 1 – Керівництво підприємства: – затвердження політики охорони праці; – виділення ресурсів на впровадження заходів безпеки; – контроль над виконанням вимог охорони праці; – відповідальність за безпеку персоналу та пасажирів.

Рівень 2 – Служба охорони праці: – проведення оцінки ризиків на робочих місцях; – розробка та впровадження профілактичних заходів; – організація навчання та інструктажу персоналу; – ведення реєстру виробничих травм та інцидентів; – планування та контроль над проведенням перевірок безпеки.

Рівень 3 – Безпосередні виконавці (водії, кондуктори, технічний персонал): – дотримання вимог охорони праці та безпеки; – використання засобів індивідуального захисту; – звітування про небезпечні умови та інциденти; – участь у навчанні та інструктажах.

Рівень 4 – Профспілкові організації та представники працівників: – контроль над дотриманням прав та гарантій для працівників; – участь у розробці та перегляді політики охорони праці; – звернення до органів влади щодо порушень норм охорони праці.

4.2.2 Оцінка ризиків на робочих місцях

На основі міжнародних стандартів та вимог українського законодавства КП «Тернопільелектротранс» має проводити регулярну оцінку ризиків для всіх категорій працівників (Sorochynska, 2025). До основних ризиків належать:

Для водіїв тролейбусів: 1. Ризик дорожно-транспортних пригод (ДТП) – травмування, втрата працездатності; 2. Навантаження на опорно-рухову систему – болі в спині, остеохондроз; 3. Психоемоційне навантаження – стрес, депресія через взаємодію з пасажирями; 4. Контакт із небезпечними матеріалами – газовими викидами, пилом; 5. Електричні небезпеки – контакт з контактною мережею; 6. Ризик нападів з боку пасажирів – під час конфліктів (особливо для жінок та молодих водіїв).

Для технічного персоналу: 1. Ризик електротравмування – робота з контактною мережею; 2. Механічні травми – роботи з обладнанням, верстатами; 3. Хімічні опіки – робота з мастилами, розчинниками; 4. Шумовий і вібраційний вплив – тривале перебування в депо; 5. Падіння з висоти – роботи з монтажу та ремонту контактної мережі.

Для кондукторів: 1. Ризик нападів або конфліктів з пасажирями – особливо при роботі у ночі (Novalska et al., 2024); 2. Контакт з інфекційними захворюваннями – повний контроль SARS-CoV-2, грип (особливо після COVID-19); 3. Перевтома – довгі зміни роботи; 4. Стрес через роботу з пасажирями та управління касою; 5. Фізичні травми – при різких гальмуваннях або маневрах.

Таблиця 4.1 – Оцінка ризиків за класифікацією матриці ризику

Тип ризику	Йомірність	Тяжкість	Рівень ризику	Заходи контролю
ДТП для водіїв	Середня	Висока	Високий	Навчання водіїв, система контролю швидкості
Електротравми персоналу	Низька	Вище за середню	Середній	Засоби ІЗ, інструктажі, ізоляція контактної мережі
Конфлікти з пасажирями	Середня	Середня	Середній	Системи спостереження, тренінги комунікації, охорона
Інфекційні захворювання	Середня	Середня	Середній	Дезінфекція, маски, вакцинація
Перевтома персоналу	Висока	Низька	Середній	Нормування часу роботи, перерви, ротація
Навантаження на спину	Висока	Середня	Середній	Ергономіка робочого місця, профілактичні гімнастики

Джерело: розроблено автором на основі ДСТУ ISO 45001:2018, Sorochynska (2025).

4.3 Процедури евакуації пасажирів у надзвичайних ситуаціях

4.3.1 Типи надзвичайних ситуацій та критерії евакуації

КП «Тернопільелектротранс» має розробити та регулярно оновлювати процедури евакуації для всіх типів надзвичайних ситуацій. Евакуація тролейбуса проводиться у наступних випадках (Ministry of Infrastructure, 2024):

6. Пожежа або загроза пожежі – будь-які ознаки палаючого матеріалу, диму або запаху палаючого дерева/пластику;
7. Невідповідна технічна справність – збій комунікаційної системи, втрата можливості управління тролейбусом, перегрів двигуна;
8. Дорожно-транспортна пригода – зіткнення або переверот, що становить загрозу для безпеки пасажирів;
9. Загроза обвалу контактної мережі – візуальні ознаки, що контактна

мережа може впасти на тролейбус;

10. Загрози безпеці від третіх осіб – агресивна поведінка пасажирів, загроза насильства;
11. Інші надзвичайні ситуації – землетруси, повені, військові дії (особливо актуально для України у період воєнних дій).

4.3.2 Загальні процедури евакуації

Етап 1: Оцінка ситуації

– Водій здійснює оцінку небезпеки та визначає, чи евакуація є необхідною; – Якщо евакуація потрібна, водій миттєво інформує пасажирів про необхідність покинути тролейбус; – Кондуктор допомагає водієві у управлінні процесом евакуації та розповсюдженні інформації.

Етап 2: Підготовка тролейбуса

– Водій встановлює трансмісію на парковку або нейтраль; – Активуються аварійні світла; – Двигун вимикається; – Ключ виймається з замку запалювання; – За можливості вмикається радіо для повідомлення про евакуацію.

Етап 3: Евакуація пасажирів

Через передні двері: – Кондуктор займає позицію біля передніх дверей та керує вихідним потоком пасажирів; – Пасажири виходять по одному, без бігу; – Старші люди, люди з обмеженими можливостями та діти отримують пріоритет та допомогу; – Після виходу всіх пасажирів вони переміщуються на безпечну відстань не менше 100 метрів від тролейбуса; – Перший, хто вийшов, забирає аптечку першої допомоги та вогнегасник.

Через аварійні боки або задні двері: – Призначаються помічники для допомоги пасажирів; – Пасажири випрямляються на землю через двері, починаючи з задніх рядів; – Допомога надається людям з фізичними обмеженнями; – Рух виконується без бігу та у впорядкованому порядку.

Етап 4: Реєстрація та облік

– Кондуктор проводить облік пасажирів та перевіряє, чи всі покинули тролейбус; – Водій залишається у тролейбусі та відповідає на запити служб невідкладної допомоги; – За можливості, контактується з диспетчером то про характер надзвичайної ситуації та місцеположення тролейбуса.

4.3.3 Спеціальні процедури для вразливих груп

Для людей з обмеженими фізичними можливостями: – Припиняється евакуація інших пасажирів, якщо це необхідно для безпечного виведення осіб з інвалідністю; – Надається фізична допомога при спуску та виході з тролейбуса; – За необхідності використовуються спеціальні пристрої або пересідання у інші транспортні засоби; – Люди з обмеженнями розташовуються у безпечній зоні поблизу медичного персоналу.

Для осіб з ознаками дитини або вагітних жінок: – Отримують максимальну допомогу та пріоритет при евакуації; – Розташовуються у безпечній зоні з медичним наглядом; – За необхідності викликаються швидка допомога.

Для осіб у стані афекту або паніки: – Успокоюються мягко та з розумінням; – Отримують пояснення щодо необхідності евакуації; – Сопроводжуються найменш травматично; – Розташовуються окремо для запобігання паніці у інших пасажирів.

4.4 Навчання та тренування персоналу

Згідно з вимогами ДСТУ ISO 45001:2018 та законодавством України, КП «Тернопільелектротранс» має організовувати регулярне навчання персоналу з питань охорони праці та процедур евакуації (Sorochynska, 2025; Ministry of Infrastructure, 2024).

Типи навчання:

1. Вступне навчання – для новопризначених працівників перед допуском до роботи;
2. Періодичне навчання – щорічне повторення вимог охорони праці;
3. Навчання за фактом ДТП або інциденту – розбір причин та уроків;
4. Спеціалізоване навчання – на конкретних небезпечних об’єктах або операціях (робота з контактною мережею, евакуація пасажирів, тощо);
5. Навчання управління кризою – процедури поведінки у надзвичайних ситуаціях.

Тренування евакуації:

Обов’язково проводяться тренування евакуації пасажирів щонайменше два рази на рік для кожного тролейбуса. Тренування мають включати: – практичні вправи з евакуації через різні виходи; – роботу з аварійним обладнанням (вогнегасники, аптечка); – комунікацію з пасажирями; – взаємодію з пожежною та медичною службою.

Таблиця 4.2 – План навчання персоналу КП «Тернопільелектротранс»

Категорія персоналу	Тип навчання	Частота	Тривалість
Водії	Вступне	Перед допуском	8–16 годин
Водії	Періодичне	Щорічно	8 годин
Водії	Евакуація	2 рази на рік	4 години
Кондуктори	Вступне	Перед допуском	8–16 годин
Кондуктори	Періодичне	Щорічно	8 годин
Кондуктори	Евакуація	2 рази на рік	4 години
Технічний персонал	Вступне	Перед допуском	16–32 години
Технічний персонал	Періодичне	Щорічно	16 годин
Технічний персонал	Спеціалізоване (контактна мережа)	За потребою	8 годин
Керівництво	Навчання управління охороною праці	Щорічно	8 годин

Джерело: розроблено автором на основі ДСТУ ISO 45001:2018, Ministry of

4.5 Спеціальні заходи безпеки у період воєнних дій

З урахуванням військових дій на території України та зростання значення цивільної безпеки, КП «Тернопільелектротранс» має розробити спеціальні процедури для забезпечення безпеки пасажирів та персоналу під час військових небезпек (Novalska et al., 2024).

Процедури дій при обстрілах та повітряних тривогах:

1. Водій миттєво інформує пасажирів про необхідність пошуку укриття;
2. Тролейбус рухається до найближчого укриття або розташованого поблизу бомбосховища;
3. Пасажири евакуюються у впорядкованому порядку до укриття;
4. Водій та кондуктор залишаються біля тролейбуса та координують дії служб невідкладної допомоги;
5. Передається інформація диспетчеру про місцезнаходження та наявність потрібної допомоги.

Підготовка тролейбусів до умов воєнних дій:

– Встановлення на всіх тролейбусах систем аварійного спілкування (аварійні вихідні люки); – Надання кожному тролейбусу набору першої медичної допомоги; – Регулярна перевірка стану дверей евакуації та механізмів їх відкриття; – Маркування всіх тролейбусів позначаннями, що вказують на цивільне призначення (білі смуги, червоні хрести).

Економічні та організаційні заходи:

– КП «Тернопільелектротранс» за підтримки органів місцевої влади розробляє план роботи громадського транспорту у період воєнних дій; – Встановлюється скорочений графік роботи під час воєнних загроз; – Персоналу надаються вищі соціальні гарантії та виплати за роботу в небезпечних умовах (Novalska et al., 2024); – Організуються брифінги та психологічні консультації

для персоналу та пасажирів.

4.6 Висновки до розділу

Забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях є однією з найважливіших задач КП «Тернопільелектротранс» при впровадженні проекту модернізації тролейбусного транспорту. Впровадження нових низькопідлогових тролейбусів від концерну «Електрон» сприятиме: – покращенню безпеки персоналу завдяки сучасним системам управління безпекою; – підвищенню комфорту та безпеки пасажирів через розширене скло та системи відеоспостереження; – полегшенню процесів евакуації завдяки низькопідлоговій конструкції; – скороченню ризиків дорожно-транспортних пригод через вдосконалені системи управління.

Дотримання вимог ДСТУ ISO 45001:2018 та регулярне навчання персоналу забезпечать ефективне функціонування системи охорони праці на підприємстві (Sorochynska, 2025). Особливе значення має підготовка персоналу до роботи у період воєнних дій та чітке дотримання процедур евакуації пасажирів у надзвичайних ситуаціях (Novalska et al., 2024).

ВИСНОВКИ

Основні результати дослідження.

Проведене дослідження присвячене розробці науково обґрунтованої методики оптимізації маршрутної мережи тролейбусного транспорту міста Тернополя у контексті впровадження 17 нових низькопідлогових енергоефективних тролейбусів від концерну «Електрон». На основі комплексного аналізу поточного стану системи громадського транспорту, математичного моделювання та врахування міжнародних стандартів отримані наступні основні результати:

Результат 1: Ідентифікація критичних проблем функціонування тролейбусної системи Тернополя

Аналіз показав, що тролейбусна система міста характеризується: – застарілим рухомим складом (середній вік 20–30+ років, що в 2–3 рази перевищує європейські норми); – низькою доступністю у периферійних районах (52–58% проти необхідних 85–90%); – високими операційними витратами на одного пасажирів (5,79 грн/пас проти 3,5–4,2 грн в європейських містах); – радіальною структурою мережи з дублюванням центральних маршрутів; – недостатньою безпекою пасажирів, особливо вразливих груп населення (28 400 внутрішньо переміщених осіб) (EBRD, 2024; CEI, 2025).

Результат 2: Розробка комплексної методики оптимізації маршрутної мережи

На основі теоретичних основ операційних досліджень розроблена методика, що включає: – аналіз даних GTFS для обробки інформації про маршрути та розклади; – розробку матриці походження-призначення (O-D матриця) пасажирів; – формулювання математичної моделі цілочислового лінійного програмування з об’єктивною функцією мінімізації операційних витрат (формула 3.1); – встановлення обмежень на охоплення попиту, рухомий склад, доступність та коефіцієнт завантаженості (формули 3.2–3.5); – розробку рекомендацій щодо оптимального розподілу нових тролейбусів за маршрутами

(Таблиця 3.2) (Ibarra-Rojas et al., 2015; Ceder, 2016; Alzaidi & Vagner, 2023).

Результат 3: Кількісна оцінка потенціалу покращення показників ефективності

Прогноз показує, що впровадження 17 нових тролейбусів дозволить досягти: – покращення коефіцієнта доступності з 78% до 88–90% (охоплення додатково 21 000 осіб); – зменшення питомих витрат на пасажирів з 5,79 грн до 4,2–4,5 грн (на 27–28%); – скорочення викидів CO₂ на 7 570 тонн на рік (зменшення на 38%); – скорочення оксидів азоту на 1,2 тонни на рік; – збільшення коефіцієнта завантаженості з 0,48 до 0,62–0,68 (на 29–42%); – скорочення часу середнього очікування з 12–15 хвилин до 8–10 хвилин (на 30%) (EBRD, 2024; Таблиця 3.3).

Результат 4: Обґрунтування соціальної значущості проекту

Дослідження показало, що проект модернізації має надзвичайну соціальну значущість для міста: – забезпечення безпеки та доступності для 28 400 внутрішньо переміщених осіб (ВПО); – встановлення систем відеоспостереження для підвищення безпеки жінок та дітей; – обладнання нових тролейбусів кондиціонуванням повітря та низькопідлоговою конструкцією для осіб з обмеженими фізичними можливостями; – внесок у досягнення цілей Паризької угоди про клімат та Національної стратегії розвитку транспорту України до 2030 року (EBRD, 2024; CEI, 2025; Cabinet of Ministers of Ukraine, 2018).

Результат 5: Обґрунтування економічної доцільності проекту

Фінансування проекту загальною вартістю €15,37 млн від міжнародних донорів (ЄБРР €10 млн, Канада €4 млн, Італія €0,37 млн) та місцевого бюджету (€1 млн) демонструє економічну доцільність проекту та підтримку міжнародної спільноти до розвитку сталого громадського транспорту в Україні (EBRD, 2024; CEI, 2025).

Практичні рекомендації для впровадження

На основі проведеного дослідження розроблено комплекс практичних рекомендацій для органів місцевої влади та КП «Тернопільелектротранс»:

Для органів місцевої влади міста Тернополя:

1. Забезпечити своєчасне адміністративне та фінансове сприяння поставкам 17 нових тролейбусів за графіком, розробленим ЄБРР: – етап 1 (перший квартал 2025): 6–8 тролейбусів; – етап 2 (другий–третій квартали 2025): 9–11 тролейбусів; – етап 3 (четвертий квартал 2025 – перший квартал 2026): завершення поставки всіх 17 тролейбусів.
2. Розширити охоплення периферійних районів (Епіцентр, Текстильна, Газопровід) до коефіцієнта доступності 88–90% через встановлення додаткових зупинок та оптимізацію маршрутів №7 та №8.
3. Впровадити систему моніторингу якості обслуговування на основі GTFS-даних та АСООП для постійного поліпшення роботи системи.
4. Забезпечити безпеку вразливих груп населення (28 400 ВПО) через встановлення систем відеоспостереження, проведення тренінгів персоналу та взаємодію з правоохоронними органами.
5. Оновити контактну мережу на окремих маршрутах та розширити паркування для забезпечення надійної роботи нових тролейбусів.
6. Забезпечити регулярне інформування громадськості про хід впровадження проекту та якість обслуговування.

Для КП «Тернопільелектротранс»:

1. Розробити детальний план розподілу 17 нових тролейбусів за маршрутами на основі аналізу даних АСООП з використанням розробленої математичної моделі (формули 3.1–3.5).
2. Запровадити систему управління якістю обслуговування відповідно до стандарту ISO 9001: – встановити чіткі показники якості (KPI) для оцінки роботи водіїв та персоналу; – регулярно проводити опитування пасажирів щодо якості обслуговування; – здійснювати моніторинг коефіцієнта завантаженості на кожному маршруті.
3. Організувати комплексне навчання персоналу (водіїв, кондукторів, технічного персоналу) щодо роботи з новим рухомим складом, процедур евакуації пасажирів та обслуговування вразливих груп населення

(Таблиця 5.2).

4. Розробити та впровадити програму енергозбереження для максимізації економії електроенергії та вести облік викидів CO₂.
5. Розробити детальний бюджет на експлуатацію, обслуговування та ремонт нових тролейбусів на наступні 5–10 років.
6. Розробити та впровадити систему управління охороною праці відповідно до стандарту ДСТУ ISO 45001:2018 (розділ 5.2) та забезпечити регулярне тренування персоналу з питань евакуації пасажирів.

На основі проведеного дослідження пропонуються такі напрями для подальших наукових робіт:

1. Детальний аналіз матриці походження-призначення пасажирів – розробка більш детальної O-D матриці на основі даних смартфонів пасажирів та GPS-маяків на тролейбусах для уточнення рекомендацій щодо оптимізації маршрутної мережи.
2. Дослідження впливу нових тролейбусів на якість обслуговування – спостереження за змінами у коефіцієнтах завантаженості, часів очікування, задоволеності пасажирів та травматизму протягом 2025–2026 років.
3. Оптимізація розкладів на основі динамічних GTFS-даних – розробка адаптивних алгоритмів для автоматичного коригування розкладів відповідно до реальних даних про пасажиропотоки та дорожні умови.
4. Дослідження впливу проекту на розвиток периферійних районів – аналіз впливу покращення доступності громадського транспорту на розселення населення, розвиток бізнесу та інвестиції у периферійні райони.
5. Порівняльний аналіз з іншими українськими містами – дослідження проектів модернізації громадського транспорту у Львові, Вінниці, Луцьку та інших міст України з метою виявлення найкращих практик.
6. Впровадження гібридних та автономних систем – дослідження можливостей впровадження гібридних тролейбусів з системами поза-контактної зарядки та автономних електротранспортних засобів для

майбутніх оновлень парку.

7. Вивчення соціального впливу проекту на вразливі групи населення – якісне дослідження впливу проекту на якість життя ВПО, осіб з обмеженнями та жінок через глибинні інтерв'ю та фокус-групи.

Узагальнені висновки.

Проведене дослідження демонструє, що оптимізація маршрутної мережи тролейбусного транспорту міста Тернополя є практично здійсненою, науково обґрунтованою та соціально значущою задачею, яка відповідає цілям сталого розвитку та інтеграції України до європейської спільноти.

Закупівля 17 нових низькопідлогових енергоефективних тролейбусів від концерну «Електрон» із загальним фінансуванням €15,37 млн є вкрай важливим практичним втіленням цієї методики та сприятиме:

- ✓ Покращенню якості життя всіх жителів міста, особливо вразливих груп (28 400 ВПО);
- ✓ Зменшенню екологічного впливу – скорочення викидів CO₂ на 7 570 тонн на рік відповідає цілям Паризької угоди;
- ✓ Підвищенню енергоефективності – економія електроенергії на 15–20%;
- ✓ Розширенню доступності від 78% до 88–90% населення міста;
- ✓ Демонстрації політичної волі місцевої влади та підтримки міжнародної спільноти до розвитку сталого транспорту в Україні.

Успішне впровадження проекту потребує скоординованої роботи органів місцевої влади, КП «Тернопільелектротранс», міжнародних донорів та громадськості. При дотриманні запропонованих рекомендацій та врахуванні напрямів подальших досліджень проект може стати успішним прикладом для інших українських та європейських міст та сприяти загальній модернізації системи громадського транспорту в країні.

Пропонована методика оптимізації маршрутної мережи на основі математичного програмування та аналізу GTFS-даних може бути адаптована та застосована в інших українських та європейських містах для покращення

якості громадського транспорту, скорочення екологічного впливу, підвищення соціальної включеності та забезпечення безпеки вразливих груп населення.

Робота присвячена актуальній проблемі розвитку сталого міського транспорту в Україні та може слугувати науковою основою для практичних проєктів модернізації громадського транспорту у різних містах країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Alzaidi, M. M. H., & Vágner, A. (2023). Trip Timing Algorithm for GTFS Data with Redis Model to Improve the Performance. *Journal of Information Systems and Telecommunication*, 11(3), 260–268.
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2018). *National Transport Strategy of Ukraine until 2030*. Resolution No. 430-p. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80>
3. Ceder, A. (2016). *Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18689>
4. Ceder, A., & Wilson, N. H. M. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331–344. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90047-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90047-0)
5. CEI (Central European Initiative). (2025). *CEI Fund at the EBRD contributes to supporting vital infrastructure in Ukrainian city, Ternopil*. CEI. <https://www.cei.int/news/10085/cei-fund-at-the-ebrd-contributes-to-supporting-vital-infrastructure-in-ukrainian-city-of-ternopil>
6. Dzyura, V. (2016). Ways of improvement of the city road network functioning. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 1(1), 45–52. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2016.1-1.2>
7. EBRD (European Bank for Reconstruction and Development). (2024). *RLF - Ternopil Trolleybus Project* (Project ID: 54740). EBRD. <https://www.ebrd.com/work-with-us/projects/psd/54740.html>
8. EBRD (European Bank for Reconstruction and Development). (2025). *Supporting vital infrastructure in Ukrainian city of Ternopil*. EBRD. <https://www.ebrd.com/home/news-and-events/news/2025/Supporting-vital-infrastructure-in-Ukrainian-city-of-Ternopil.html>
9. Electron Concern. (2024). *Technical specifications and performance characteristics of Electron trolleybuses*. Electron

- Concern. <https://www.electron.ua/>
10. European Commission. (2014). *White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF>
 11. Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38–75. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.002>
 12. Liu, D., Guo, J., Gu, Y., King, M., Han, L. D., & Brakewood, C. (2024). GTFS2STN: Analyzing GTFS Transit Data by Generating Spatiotemporal Transit Network. *arXiv preprint arXiv:2405.02760*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.02760>
 13. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2024). *Road Transport Safety Management Systems and Occupational Safety Regulations in Public Transport*. Ministry of Infrastructure. <https://mtu.gov.ua/>
 14. Novalska, N., Kyrylenko, O., Klymenko, V., Razumova, K., & Kediulich, V. (2024). Regulation of Work and Rest Pattern for Personnel of Transport Companies in Ukraine: Peacetime and Specifics of Wartime. *Studia Iuridica Lublinensia*, 33(2), 353–374. <https://doi.org/10.17951/sil.2024.33.2.353-374>
 15. Savchenko, L., Grygorak, M., Polishchuk, V., Vovk, Y., Lyashuk, O., Vovk, I., & Khudobei, R. (2022). Complex evaluation of the efficiency of urban consolidation centers at the micro level. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*, (115), 135-159. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.10>
 16. Sorochynska, O., Melnichenko, O., Kulbovskyi, I., & Derehuz, I. (2025). Implementation of the occupational health and safety management system model according to DSTU ISO 45001:2018: challenges and opportunities for transport enterprises. *Transport Systems and Technologies*, (45).

- 17.State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Transport and Communications of Ukraine 2023: Statistical Yearbook*. State Statistics Service of Ukraine. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
- 18.TransPhoto. (2024). *Urban Electric Transit Database: Trolleybus photographs and technical data from Ukrainian cities*. TransPhoto. <https://transphoto.org/>
- 19.VisionZero Ukraine. (2025). *Ukraine in 2024: Trolleybus Fleet Renewal and Urban Mobility Challenges*. VisionZero Ukraine. <https://visionzero.org.ua/>
- 20.Vovk, Y., Tson, O., Kicinski, M., Vovk, I., & Dzyura, V. (2025). Microtransportation: A sustainable solution for urban mobility challenges. *Journal of Chinese Architecture and Urbanism*, 6561. <https://doi.org/10.36922/jcau.6561>
- 21.Vovk, I., Tson, O., Vovk, Y., Vovk, Y., & Rozhko, N. (2024). Mobility as a Service for tourism: Challenges and opportunities for meeting the needs of tourists in urban environments. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 2(2), 137–149. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2024.9-2.10>