

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Факультет транспортних систем

Кафедра транспортних систем і логістики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
магістра

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ВИКОРИСТАННЯ РУХОМОГО
СКЛАДУ НА ТРОЛЕЙБУСНОМУ МАРШРУТІ № 2
У МІСТІ ХАРКІВ**

Завідувач кафедри канд. техн. наук, доцент.

Євген ЛЮБИЙ

Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент

Олександр КОЛІЙ

Керівник, канд. техн. наук, доцент

Ольга СВІЧИНСЬКА

Здобувач гр. ТС-61-24

Данило КРАЙНЮК

Харків – 2025

Ректору ХНАДУ

проф. Віктору БОГОМОЛОВУ

Кафедра транспортних систем і логістики ХНАДУ просить Вас доручити виконання кваліфікаційної роботи магістра на тему «Підвищення рівня використання рухомого складу на тролейбусному маршруті № 2 у місті Харків» здобувачу групи ТС-61-24 Крайнюку Д.Є.

При виконанні роботи увагу варто приділити таким питанням, як:

- проаналізувати підходи до оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту;
- оцінити рівень використання рухомого складу на досліджуваному маршруті на основі матеріалів обстеження пасажиропотоків;
- виконати моделювання пасажиропотоків тролейбусного маршруту № 2 у програмному середовищі PTV Visum для оцінки впливу запропонованих організаційних змін на роботу маршруту;
- обґрунтувати можливість використання електробусів;
- визначити необхідну кількість рухомого складу із застосуванням існуючої методики розрахунку;
- розробити інвестиційний проєкт закупівлі електробусів для обслуговування, визначивши обсяг капітальних вкладень та експлуатаційних витрат;
- оцінити економічну ефективність інвестиційного проєкту.

Завідувач кафедри транспортних
систем і логістики, к.т.н., доцент

Євген ЛЮБИЙ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет _____ транспортних систем _____
 Кафедра _____ транспортних систем і логістики _____
 Освітній рівень _____ магістр _____
 Спеціальність, спеціалізація 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»
 Освітньо-професійна програма _____ Транспортні системи і логістика _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,

_____ Любий Є.В.

«___» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Крайнюку Данилові Євгеновичу

1. Тема роботи: Підвищення рівня використання рухомого складу на тролейбусному маршруті № 2 у місті Харків _____

Керівник роботи Свічинська Ольга Володимирівна, канд. техн. наук, доц.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені рішенням Вченої ради ФТС від «3» вересня 2025 року № 1.

2. Строк подання здобувачем роботи 1.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Електронна карта міста, літературні джерела,
програмне середовище PTV Visum

4. Перелік питань, які потрібно розробити Вступ. 1 Аналіз показників якості
транспортного обслуговування пасажирів, 2 Порядок збору інформації про
роботу тролейбусного маршруту № 2 у м. Харкові, 3 Обробка зібраних даних,
4 Опрацювання результатів проведеного дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал представляється в вигляді презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів КРМ	Строк виконання етапів КРМ	Примітка
1.	Вступ	19.09 – 21.09.2025 р.	
2.	Аналіз показників якості транспортного обслуговування пасажирів	25.09 – 10.10. 2025 р.	
3.	Порядок збору інформації про роботу тролейбусного маршруту № 2 у м. Харкові	15.10 – 25.10. 2025 р.	
4.	Обробка зібраних даних	30.10 – 15.11. 2025 р.	
5.	Опрацювання результатів проведеного дослідження	16.11 – 25.11. 2025 р.	
6.	Висновки	27.11. 2025 р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки	30.11 – 2.12. 2025 р.	
8.	Оформлення матеріалів презентації	30.11 – 5.12. 2025 р.	

Здобувач

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Крайнюк Д.Є.

(прізвище та ініціали)

Свічинська О.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 85 с., 12 рис., 8 табл., 1 додаток, 17 джерел.
ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, ЕЛЕКТРОБУС, ІНВЕСТИЦІЙНИЙ
ПРОЄКТ, ПАСАЖИРОПОТІК, ПАСАЖИРСЬКІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Об'єкт дослідження – процес перевезення пасажирів міським електротранспортом у місті Харків.

Предмет – організаційні, експлуатаційні та економічні показники використання рухомого складу тролейбусного маршруту.

Мета роботи – підвищення рівня використання рухомого складу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків на основі удосконалення організації руху та обґрунтування доцільності впровадження електробусів із застосуванням моделювання пасажиропотоків.

Метод дослідження – комплекс аналітичних та емпіричних підходів для оцінки ефективності міського громадського транспорту.

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано наукові підходи та методи оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту. На основі результатів обстеження пасажиропотоків, отриманих у попередніх дослідженнях, сформовано інформаційну базу для аналізу роботи тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків.

З метою підвищення ефективності роботи маршруту запропоновано зменшити інтервал руху. Для оцінки впливу запропонованих рішень виконано моделювання пасажиропотоків у програмному середовищі PTV Visum. Обґрунтовано можливість використання електробусів для обслуговування маршруту № 2 та розроблено інвестиційний проєкт їх впровадження. Ефективність запропонованих рішень оцінено за показниками чистої приведеної вартості, внутрішньої норми дохідності, індексу дохідності та періоду окупності.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – результати можуть бути використані при моделюванні або удосконаленні маршрутних систем міського електротранспорту.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналіз сучасного стану та передумов розвитку міського електротранспорту міста Харків	8
1.1 Актуальність вивчення питання про роботу міського електротранспорту міста Харків у роки війни	8
1.2 Базові відомості про досліджуваний маршрут	11
1.3 Аналіз програмних середовищ для моделювання роботи маршрутів громадського транспорту	23
1.4 Висновки по першому розділу	26
2 Методика дослідження та моделювання роботи тролейбусного маршруту	28
2.1 Методичні засади досягнення мети магістерської роботи	28
2.2 Етапи роботи у програмному середовищі PTV Visum	30
2.3 Обґрунтування потрібної кількості електробусів	33
2.4 Висновки по другому розділу	36
3 Розрахунок експлуатаційних витрат	37
3.1 Характеристика пропонованого електробусу	37
3.2 Прогнозовані поточні витрати на утримання маршруту	39
3.3 Висновки по третьому розділу	52
4 Економічна оцінка впровадження електробусів на міському маршруті	53
4.1 Інвестиційні витрати на реалізацію проєкту впровадження електробусів	53
4.2 Оцінювання ефективності інвестиційного проєкту	61
4.3 Висновки по четвертому розділу	64
Висновки	65
Перелік посилань	67
Додаток А Ілюстративний матеріал до кваліфікаційної роботи	69

ВСТУП

В умовах повномасштабної війни, яка триває вже четвертий рік, функціонування міського пасажирського транспорту в Україні, зокрема у місті Харків, відбувається в умовах підвищених ризиків та постійних інфраструктурних втрат. Комунальний електротранспорт міста неодноразово зазнає пошкоджень унаслідок обстрілів, що призводить до порушення роботи контактної мережі, тягових підстанцій та знищення рухомого складу. За таких умов особливої актуальності набуває питання забезпечення стійкості та безперервності транспортного обслуговування населення.

Попри складну безпекову ситуацію, Харків продовжує розвиватися та формувати стратегічні напрями модернізації міської транспортної системи. Одним із пріоритетних напрямів розвитку комунального транспорту є впровадження сучасних екологічних транспортних засобів, зокрема електробусів і тролейбусів з автономним ходом, які здатні здійснювати перевезення пасажирів навіть за відсутності електропостачання або пошкодження контактної мережі. Такий підхід відповідає загальноєвропейським тенденціям переходу міст до екологічно чистого та енергоефективного громадського транспорту.

Об'єкт дослідження – процес перевезення пасажирів міським електротранспортом у місті Харків.

Предмет – організаційні, експлуатаційні та економічні показники використання рухомого складу тролейбусного маршруту.

Мета роботи – підвищення рівня використання рухомого складу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків на основі удосконалення організації руху та обґрунтування доцільності впровадження електробусів із застосуванням моделювання пасажиропотоків.

Задачі дослідження:

– проаналізувати підходи до оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту;

- оцінити рівень використання рухомого складу на досліджуваному маршруті на основі матеріалів обстеження пасажиропотоків;
- виконати моделювання пасажиропотоків тролейбусного маршруту № 2 у програмному середовищі PTV Visum для оцінки впливу запропонованих організаційних змін на роботу маршруту;
- обґрунтувати можливість використання електробусів;
- визначити необхідну кількість рухомого складу із застосуванням існуючої методики розрахунку;
- розробити інвестиційний проєкт закупівлі електробусів для обслуговування, визначивши обсяг капітальних вкладень та експлуатаційних витрат.
- оцінити економічну ефективність інвестиційного проєкту.

У першому розділі викладено аналіз сучасного стану та передумов розвитку міського електротранспорту міста Харків та надано базові відомості про досліджуваний маршрут. Проаналізовано програмних середовищ для моделювання роботи маршрутів громадського транспорту.

У другому розділі розроблено методику дослідження та моделювання роботи тролейбусного маршруту. Подано етапи роботи у програмному середовищі PTV Visum та обґрунтовано потрібну кількість електробусів.

У третьому розділі розраховано експлуатаційні та прогнозовані поточні витрати на утримання маршруту.

У четвертому розділі проведено економічну оцінку впровадження електробусів за основними показниками ефективності інвестиційних проєктів.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРЕДУМОВ РОЗВИТКУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ МІСТА ХАРКІВ

1.1 Актуальність вивчення питання про роботу міського електротранспорту міста Харків у роки війни

В останні роки в Україні, зокрема у місті Харків, простежується стійкий курс на модернізацію системи міського громадського транспорту з орієнтацією на використання екологічно чистих та енергоефективних транспортних засобів [1]. Одним із перспективних напрямів розвитку є впровадження електробусів, які поєднують переваги електричного транспорту з підвищеною гнучкістю експлуатації та можливістю автономного руху.

Зазначені процеси відбуваються на тлі загальноєвропейських тенденцій. За останні роки обсяги постачання електробусів у країни Європи зросли у декілька разів, що свідчить про системний перехід великих міст до екологічно чистого громадського транспорту. Найбільше поширення отримали електричні автобуси середнього та великого класу, які застосовуються для обслуговування міських маршрутів з різною інтенсивністю пасажиропотоків [2].

Паралельно з оновленням рухомого складу спостерігається тенденція до розвитку муніципального автобусного транспорту, орієнтованого на заміщення приватних перевізників і маршрутних таксі. Такий підхід дозволяє підвищити керованість транспортної системи, забезпечити стабільність перевезень, утримувати соціально прийнятний рівень тарифів та покращити якість обслуговування пасажирів.

Особлива увага приділяється використанню автобусів та електробусів різної місткості, що дає змогу адаптувати рухомий склад до реальних обсягів пасажиропотоків у різні періоди доби. Застосування транспортних засобів малої та середньої місткості є доцільним на маршрутах з помірним або нерівномірним попитом, оскільки це сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню ефективності використання рухомого складу.

Крім того, впровадження електробусів розглядається як складова довгострокових програм розвитку міського транспорту, що поєднують оновлення рухомого складу з можливістю локального виробництва або складання транспортних засобів. Такий підхід має не лише транспортне, а й соціально-економічне значення, сприяючи розвитку промислового потенціалу міста та створенню робочих місць [3].

У сукупності зазначені фактори підтверджують актуальність досліджень, спрямованих на обґрунтування доцільності впровадження електробусів у систему міського транспорту Харкова, зокрема на окремих маршрутах, з урахуванням фактичних пасажиропотоків, техніко-експлуатаційних показників та економічної ефективності запропонованих рішень, а також з метою підвищення енергетичної ефективності перевізного процесу та забезпечення стійкості транспортного обслуговування в умовах можливих перебоїв електропостачання.

Варто згадати історію становлення міського електротранспорту нашого міста. Формування та розвиток тролейбусного сполучення в Харкові розпочалося у першій половині ХХ століття та пройшло кілька етапів, що відображали соціально-економічний стан міста та країни загалом.

Запуск першої тролейбусної лінії у 1939 році став значущим кроком у розвитку міської інфраструктури, оскільки дозволив з'єднати центральну частину міста з віддаленими житловими районами. У повоєнний період тролейбусна мережа активно розширювалася: у (1950 – 1960) роках вводилися нові маршрути, які забезпечували транспортну доступність різних районів Харкова та сприяли його територіальному розвитку [3, 4].

У подальші десятиліття, зокрема у (1990 – 2000) роках, темпи розвитку електротранспорту суттєво знизилися через економічні труднощі та обмежене фінансування. Водночас починаючи з 2010 року у Харкові було відновлено курс на модернізацію міського електротранспорту, що проявилось в оновленні рухомого складу, закупівлі низькопідлогових тролейбусів і поступовому вдосконаленні інфраструктури [4].

До початку повномасштабної військової агресії російської федерації місто послідовно реалізовувало програми розвитку громадського транспорту. Проте навіть у цей період залишалися актуальними проблеми зношеності контактної мережі, недостатнього облаштування зупиночних пунктів та впливу дорожніх заторів на швидкість руху тролейбусів.

З 2022 року робота міського транспорту Харкова здійснюється в умовах воєнного стану. Унаслідок бойових дій значна частина інфраструктури та рухомого складу зазнала пошкоджень, що негативно вплинуло на стабільність перевезень. Водночас з травня 2022 року комунальний транспорт забезпечує безоплатне перевезення пасажирів, що підкреслює його соціальну значущість у кризових умовах.

Станом на початок 2024 року маршрутна мережа міста включає автобусні, тролейбусні та трамвайні маршрути [3], а також лінії метрополітену, які разом обслуговують сотні зупиночних пунктів. Інвентарний парк тролейбусів налічує декілька сотень одиниць, серед яких є машини з автономним ходом, що дозволяють виконувати перевезення у разі відсутності електроживлення контактної мережі. Після пошкоджень, спричинених воєнними діями, значна частина рухомого складу була відновлена шляхом ремонтів.

В умовах постійної загрози пошкодження енергетичної інфраструктури особливої актуальності набувають транспортні засоби, здатні працювати автономно. Саме тому міська влада Харкова розглядає впровадження електробусів як один із перспективних напрямів розвитку комунального транспорту [5]. Такий підхід відповідає сучасним європейським тенденціям переходу до екологічно чистих і енергоефективних транспортних рішень, а також дозволяє підвищити стійкість транспортної системи в умовах надзвичайних ситуацій.

Разом із тим, функціонування тролейбусного транспорту в місті супроводжується низкою проблем, серед яких нерегулярність руху, перевантаженість окремих маршрутів у години пік, обмежене охоплення деяких районів міста, низька середня швидкість руху, зношеність інфраструктури та

залежність від електропостачання. Додатковим негативним чинником є пошкодження рухомого складу й контактної мережі внаслідок бойових дій.

Урахування зазначених проблем і пошук шляхів їх вирішення є складним і ресурсоемним процесом, що потребує поетапного підходу. Одним із ефективних інструментів удосконалення роботи міського електротранспорту є детальний аналіз функціонування окремих маршрутів. Тому в межах даної магістерської роботи пропонується дослідити роботу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків з метою оцінки його ефективності, виявлення основних недоліків та формування рекомендацій щодо покращення організації руху і якості транспортного обслуговування пасажирів.

Результати такого дослідження можуть бути використані при моделюванні, коригуванні та прогнозуванні роботи окремих маршрутів міського електротранспорту, а також при обґрунтуванні доцільності впровадження нових видів рухомого складу, зокрема електробусів, у транспортну систему великого міста.

1.2 Базові відомості про досліджуваний маршрут

При підготовці попереднього дослідження для кваліфікаційної роботи бакалавра було зібрано наступні загальні відомості про тролейбусний маршрут № 2. Дані було взято з відкритих інформаційних джерел [2, 3], рисунок 1.1. Просторова схема маршруту із зазначенням розташування зупиночних пунктів представлена на рисунку 1.2.

Обслуговування маршруту здійснювалось комунальним підприємством «Тролейбусне депо № 3», під керівництвом Болдирєва Олега Вікторовича. Загальна протяжність маршруту становить 15,28 км. Робота організована у часовому проміжку з 5:55 до 18:42 відповідно до встановленого розкладу. Регламентований інтервал руху коливається в межах від 8 до 20 хвилин залежно від періоду доби.

Для забезпечення перевезень на маршруті використовується рухомий

склад різних типів, зокрема тролейбуси моделей Bogdan T701, LAZ E183 та LAZ E301. Зовнішній вигляд транспортних засобів, а також їх основні технічні параметри наведені на рисунку 1.3.

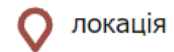
Тролейбусний маршрут № 2



Довжина (км) : 15.28

Маршрут: Просп. Жуковського (Вул. Академіка Проскури) - вул. Академіка Проскури, Білгородське шосе, вул. Сумська, пр. Незалежності, пр. Науки, вул. Ахсарова, пр. Людвіга Свободи, пр. Перемоги - Просп. Перемоги (Трамвайне коло)

На мапі:



Режим роботи: 05:55-18:42

Інтервал : 8-20

Модель : Bogdan-T701, ZIU-682, LAZ-E183, LAZ-E301

Метро : Університет, Держпром, Наукова, Ботанічний сад, 23 Серпня, Олексіївська, Перемога

Перевізник : КП "Тролейбусне депо №3"

Рисунок 1.1 – Відомості про тролейбусний маршрут [3]

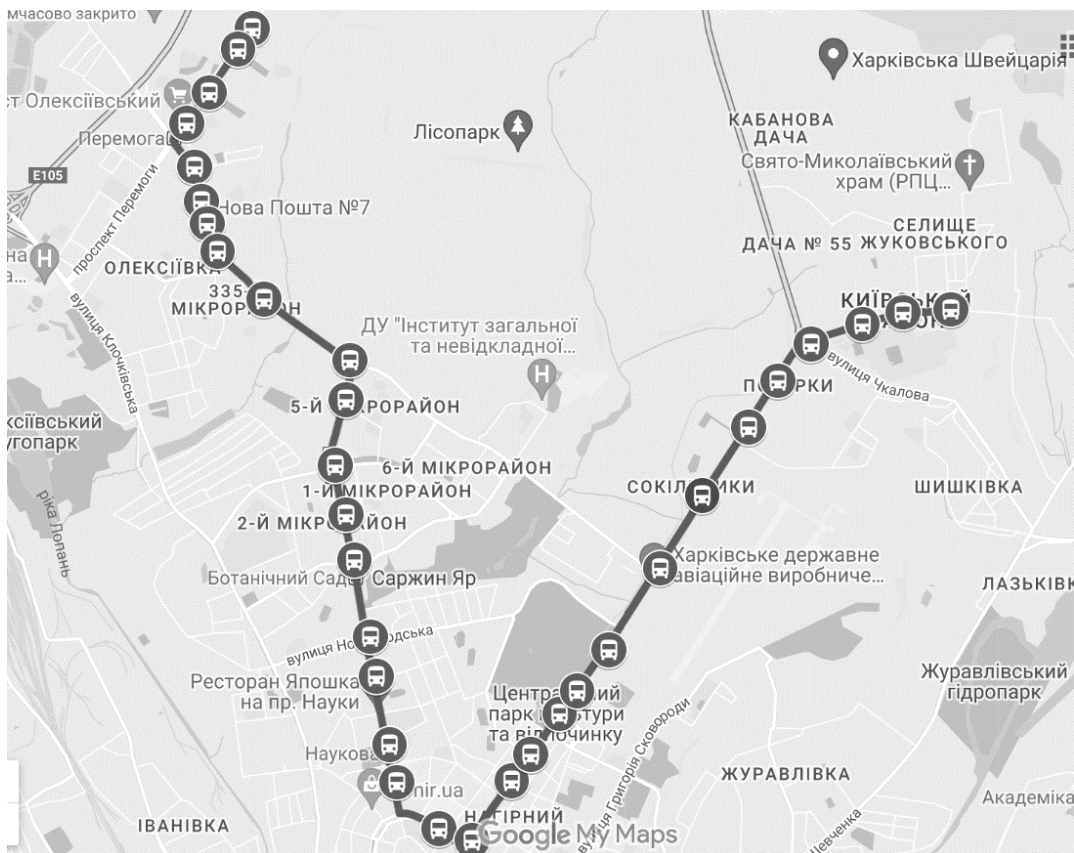


Рисунок 1.2 – Схема розташування зупинок [4]

Також дана кваліфікаційна робота магістра буде спиратись на результати проведеного обстеження пасажиропотоків на цьому маршруті відповідно до методичних положень, розроблених у другому розділі кваліфікаційної роботи бакалавра.

Обстеження пасажиропотоків було проведене в період з 08.05.2024 року по 18.05.2024 року із застосуванням табличного методу. Дослідження охоплювало як прямий, так і зворотний напрямки руху.

Кількість зупинок в прямому напрямку: просп. Перемоги, зуп. Сонячна, зуп. Шкільна, 339-й мікрорайон, ст.м. Перемога, 336-й мікрорайон, пр. Людвиг Свободи, АТС-336, ст. м. Олексіївська, вул. Білогірська, Різдвяна церква, Інститут низьких температур, ст. м. 23-го Серпня, вул. Тобольська, ст. м. Ботанічний сад, вул. Новгородська, вул. Космічна, ст. м. Наукова, вул. Чичібабіна, ст. м. Університет, вул. Сумська, вул. Маяковського, вул. Олеся Гончара, Центральний парк, Дитяча залізниця, Сокільники, Велоцентр (на вимогу), Меморіал Слави (на вимогу), Лісопарк, вул. Вадима Манько, Литвинівка, вул. Поздовжня, просп. Жуковського.

Зворотній напрямок: просп. Жуковського, вул. Поздовжня, Литвинівка, вул. Вадима Манько, Лісопарк, Меморіал Слави (на вимогу), Велоцентр (на вимогу), Сокільники, Дитяча залізниця, Центральний парк, вул. Олеся Гончара, вул. Маяковського, вул. Сумська, ст. м. Університет, вул. Чичібабіна, ст. м. Наукова, вул. Космічна, вул. Новгородська, ст. м. Ботанічний сад, вул. Тобольська, ст. м. 23-го Серпня, Інститут низьких температур, Різдвяна церква, вул. Білогірська, ст. м. Олексіївська, АТС-336, пр. Людвиг Свободи, 336-й мікрорайон, ст.м. Перемога, 339-й мікрорайон, Шкільна, Сонячна, пр. Перемоги.

Спостереження виконувалися у різні часові інтервали доби:

- ранок з 9:00 до 11:30 у прямому напрямку; з 11:30 до 12:30 у зворотному;
- вдень з 13:00 до 15:00 у прямому напрямку; з 14:30 до 16:00 у зворотному;
- вечір з 17:00 до 18:00 у прямому напрямку та з 17:25 до 18:30 у зворотному напрямку.



Показник	Модель тролейбусу		
	Богдан Т701	ЛАЗ Е183	ЛАЗ Е 301
Довжина, мм	11 960	12000	18750
Ширина, мм	2 550	2550	2550
Повна маса, т	19	18	17,7
Макс. швидкість, км/год	65	55	75
Місць для сидіння	34	30	56
Повна місткість, чол./ 1 кв.м.	105	100	210
Автономний режим	так	ні	так

Рисунок 1.3 – Опис тролейбусів, які курсують на маршруті [2]

Систематизація та аналітична обробка зібраних матеріалів забезпечили формування реальних результатів дослідження.

На першому етапі дослідження було побудовано епюри пасажиропотоків за напрямками руху для тролейбусного маршруту № 2. Їх графічні зображення наведені на рисунках (1.4 – 1.9).

Аналіз епюр пасажиропотоків у ранковий період як у прямому, так і у зворотному напрямках засвідчив наявність зупинкових пунктів з підвищеною концентрацією пасажирів. Зокрема, у прямому напрямку найбільші значення пасажиропотоку були зафіксовані поблизу зупинок «ст. метро Олексіївська», «ст. метро 23 Серпня» та «ст. метро Ботанічний сад».

У зворотному напрямку найбільш навантаженою виявилася зупинка «вул. Сумська», що пояснюється її розташуванням у безпосередній близькості до станції метро «Університет», а також наявністю пересадкових зв'язків з іншими маршрутами міського транспорту.

Під час проведення обстеження було встановлено, що в умовах прифронтового статусу міста Харкова кількість пасажирів, які очікують транспорт на зупинкових пунктах, залишається відносно невеликою. У зв'язку з цим у денний період спостерігалася низька наповнюваність салонів тролейбусів. Додатковим фактором, що впливав на зниження пасажиропотоку, стало

дублювання досліджуваного маршруту іншими видами міського транспорту.

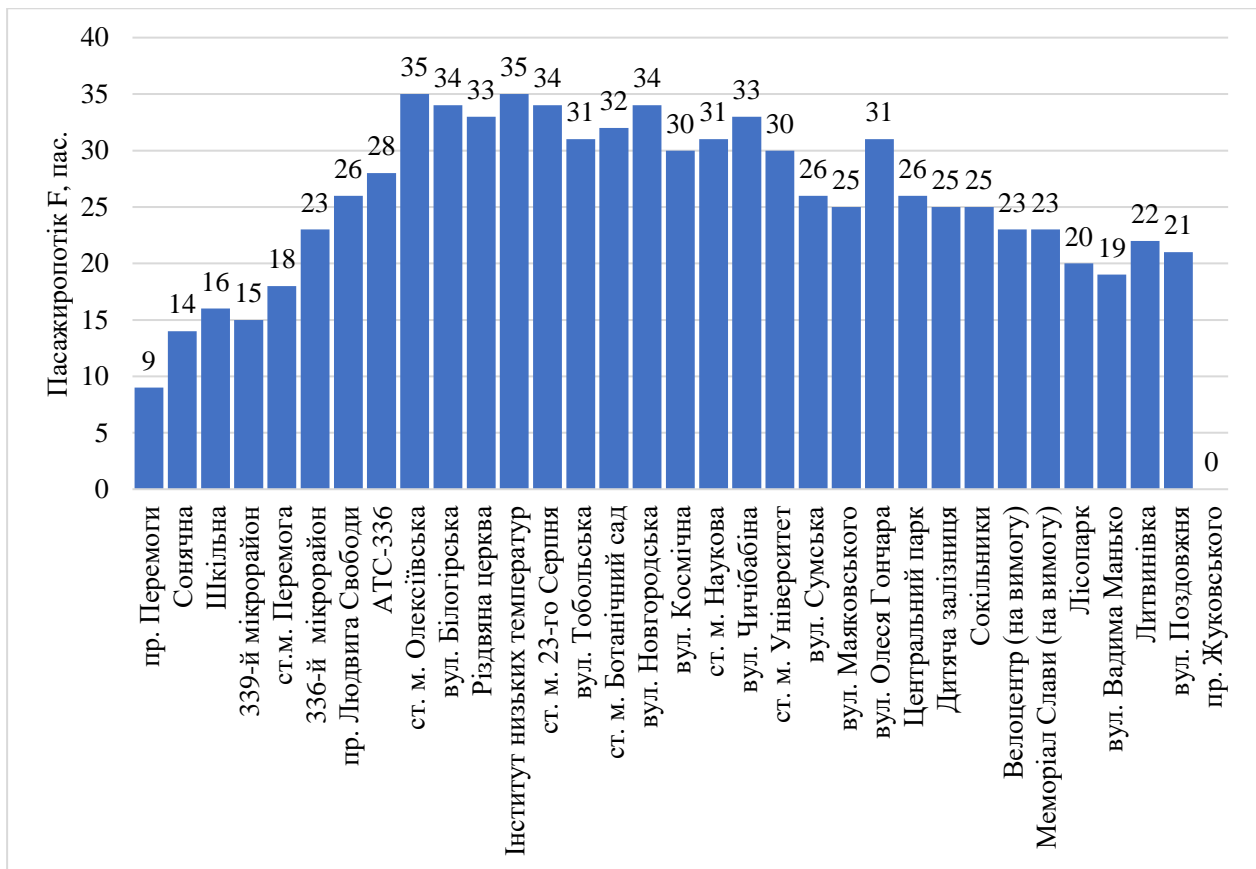


Рисунок 1.4 – Епюра пасажиропотоку на маршруті № 2 в прямому напрямку у ранковий період

Аналіз денних коливань пасажиропотоку дозволив виявити суттєву нерівномірність розподілу пасажирів уздовж маршруту. Як показано на рисунку 1.6, максимальні значення пасажиропотоку були зафіксовані на зупинках «Центральний парк» (39 пасажирів) та «вул. Олесь Гончара» (36 пасажирів), що свідчить про їх роль як ключових точок посадки та висадки пасажирів.

Разом з тим було визначено зони з низькою транспортною активністю. Зупинки «пр. Перемоги» (6 пасажирів) та «пр. Жуковського» характеризувалися значно меншою кількістю пасажирів, що може бути зумовлено віддаленістю від основних об'єктів тяжіння або менш зручним розташуванням у транспортній мережі міста.

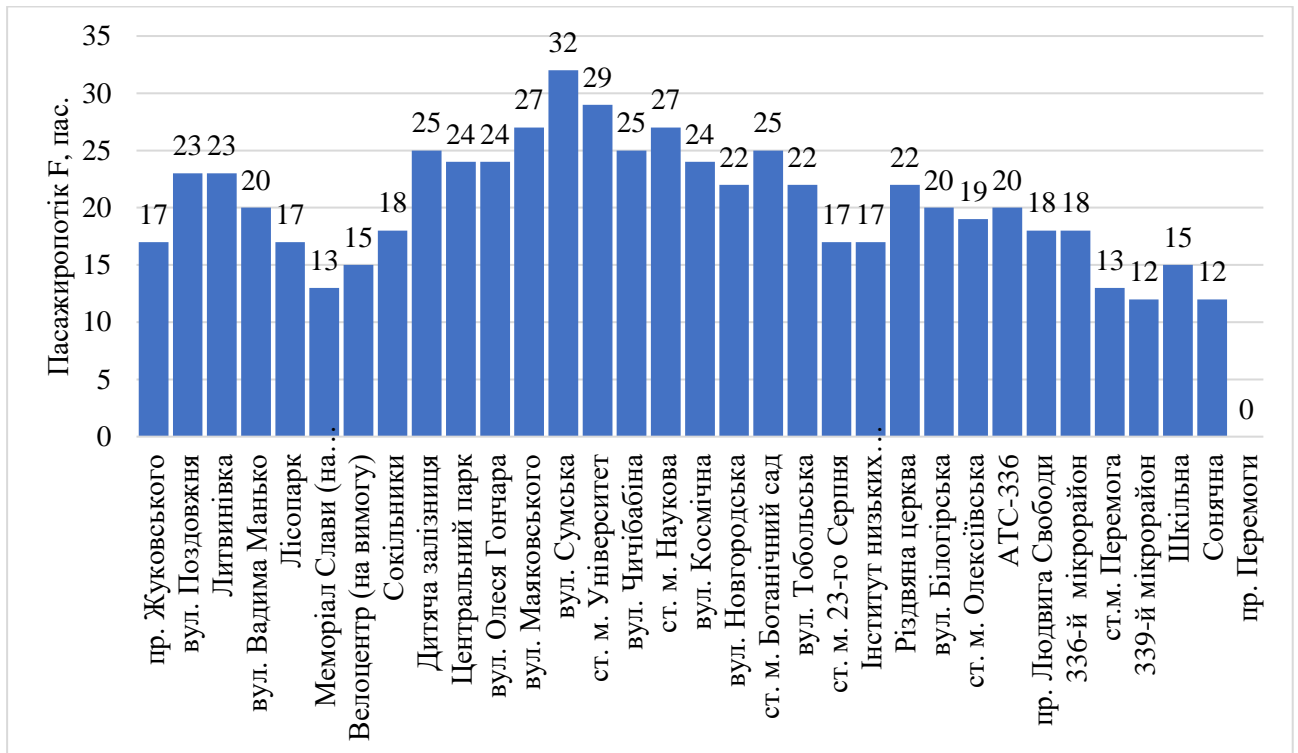


Рисунок 1.5 – Епюра пасажиропотоку на маршруті № 2 в зворотному напрямку у ранковий період

Більшість зупинкових пунктів мали середній рівень завантаженості, який коливався в межах (20 – 30) пасажирів. Це свідчило про відносно рівномірне обслуговування пасажирів уздовж маршруту за наявності локальних піків і спадів попиту. Підвищені значення пасажиропотоку на зупинках, розташованих поблизу станцій метрополітену та об'єктів масового відвідування (парків, навчальних закладів), підтвердили тісний функціональний зв'язок тролейбусного маршруту з іншими елементами міської транспортної системи.

У денний період на епюрах пасажиропотоків було зафіксовано незначне зростання кількості пасажирів порівняно з ранковим інтервалом.

За результатами вечірнього обстеження у прямому напрямку руху встановлено подальше збільшення пасажиропотоку порівняно з ранковим і денним періодами (рисунок 1.8).

Така тенденція пояснювалася поверненням мешканців міста з роботи, а також відвідуванням рекреаційних зон, оскільки маршрут проходить поблизу Центрального парку культури і відпочинку.

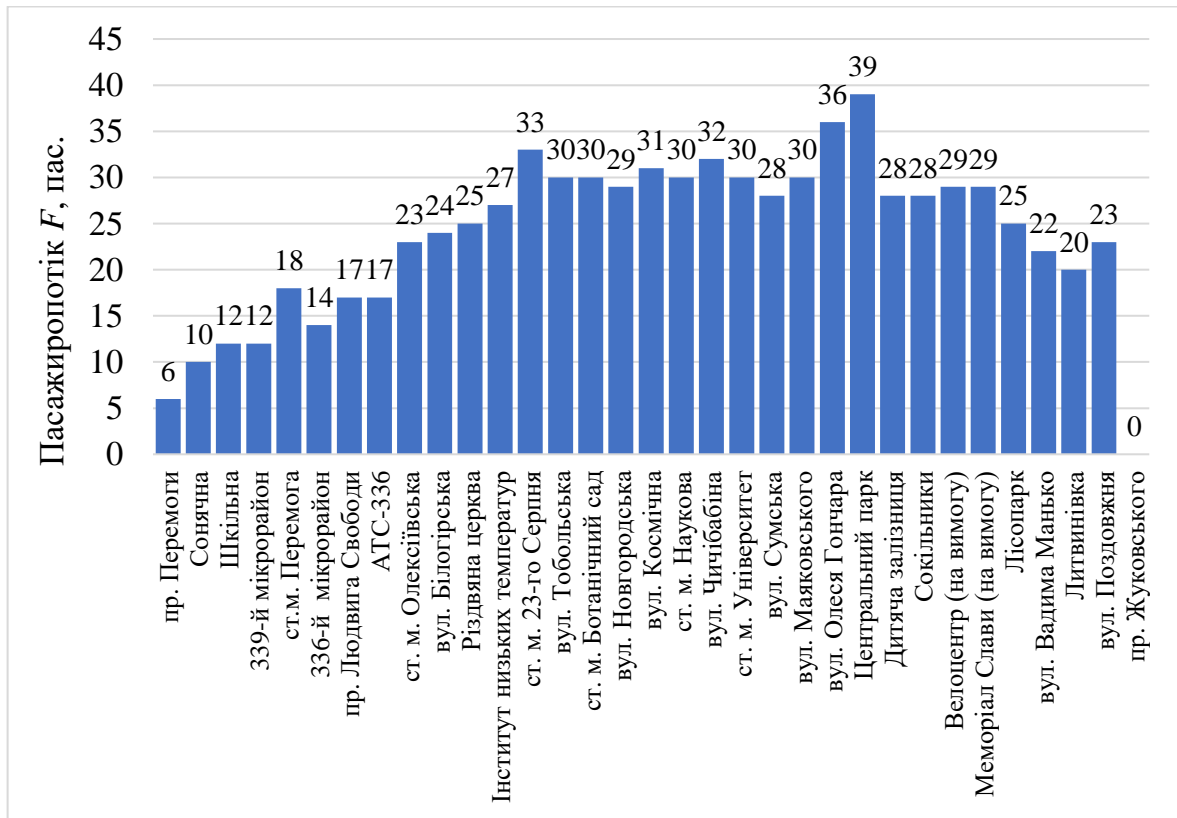


Рисунок 1.6 – Епюра пасажиропотоку на тролейбусному маршруті № 2 в прямому напрямку у денний період

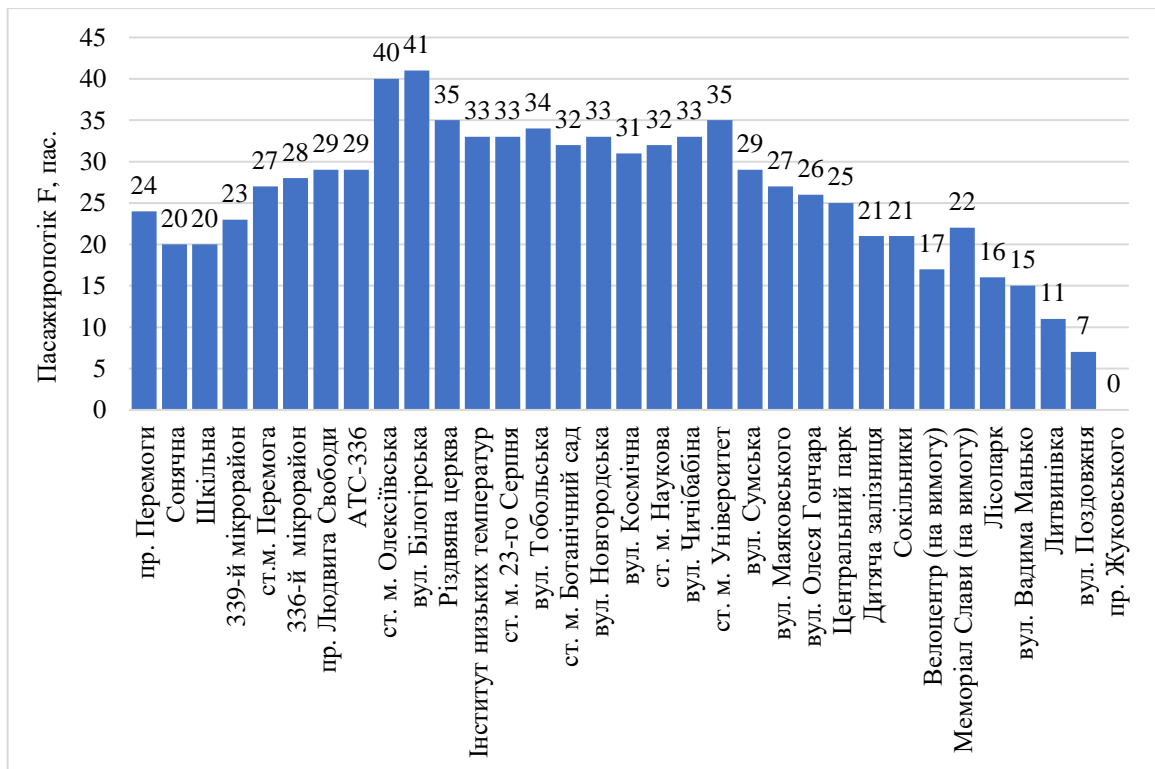


Рисунок 1.7 – Епюра пасажиропотоку на тролейбусному маршруті № 2 в зворотному напрямку у денний період

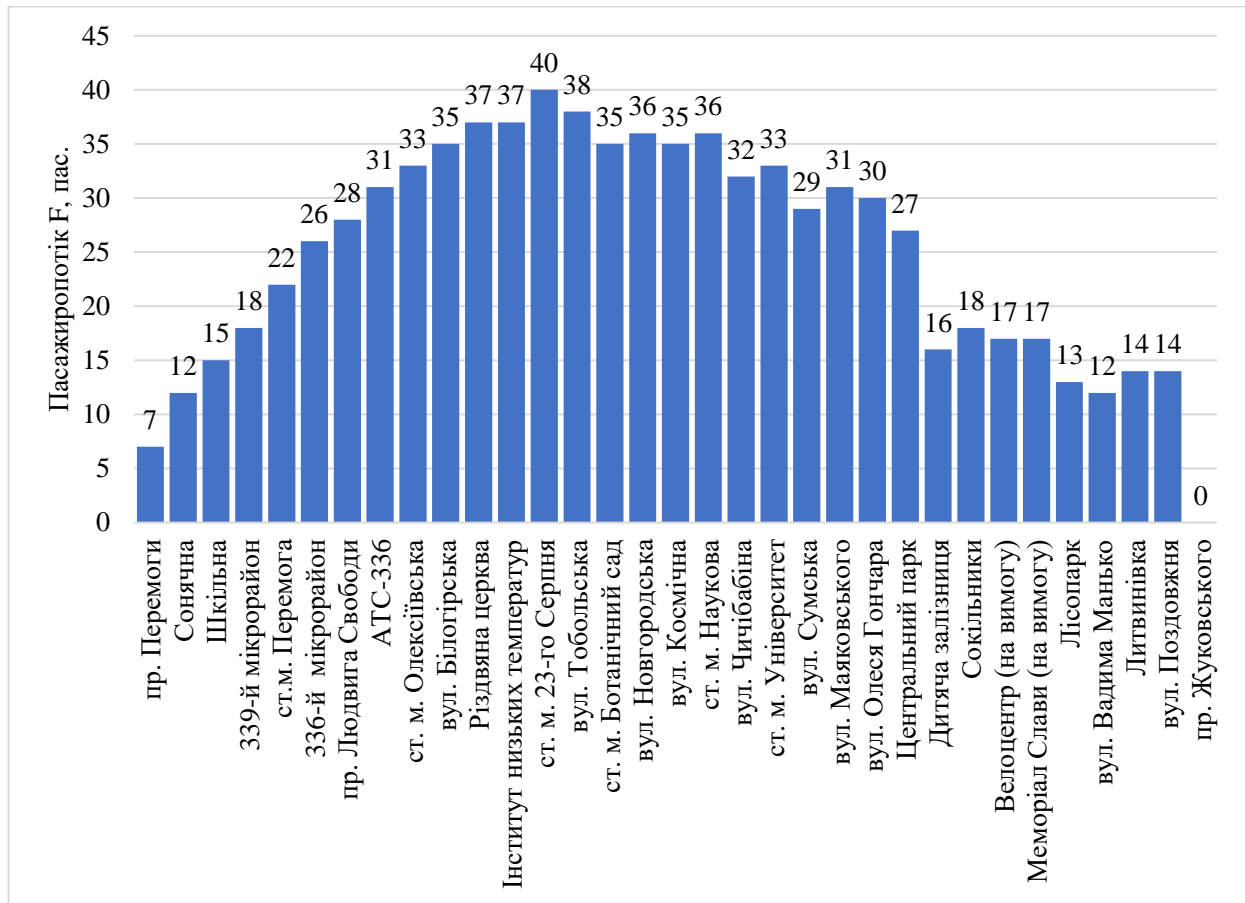


Рисунок 1.8 – Епюра пасажиропотоку на маршруті № 2 в прямому напрямку у вечірній період (17:10)

Візуальні спостереження у години пікового навантаження показали, що, незважаючи на зростання кількості пасажирів, салони тролейбусів не досягали граничного рівня заповнення та зберігали певний резерв місткості.

У вечірній час у зворотному напрямку було зафіксовано зменшення пасажиропотоку, однак окремі ділянки маршруту залишалися стабільно насиченими пасажирами, що свідчило про збереження попиту на перевезення навіть у пізні години.

Застосування епюр пасажиропотоків у процесі аналізу функціонування міського пасажирського транспорту дозволило детально оцінити просторово-часовий розподіл попиту на перевезення. Отримані результати стали інформаційною основою для подальшого обґрунтування організаційних рішень, спрямованих на підвищення ефективності роботи маршруту та покращення умов перевезення пасажирів. Використання епюр пасажиропотоків підтвердило

доцільність їх застосування як інструменту формування раціональної та орієнтованої на потреби користувачів системи міського громадського транспорту.

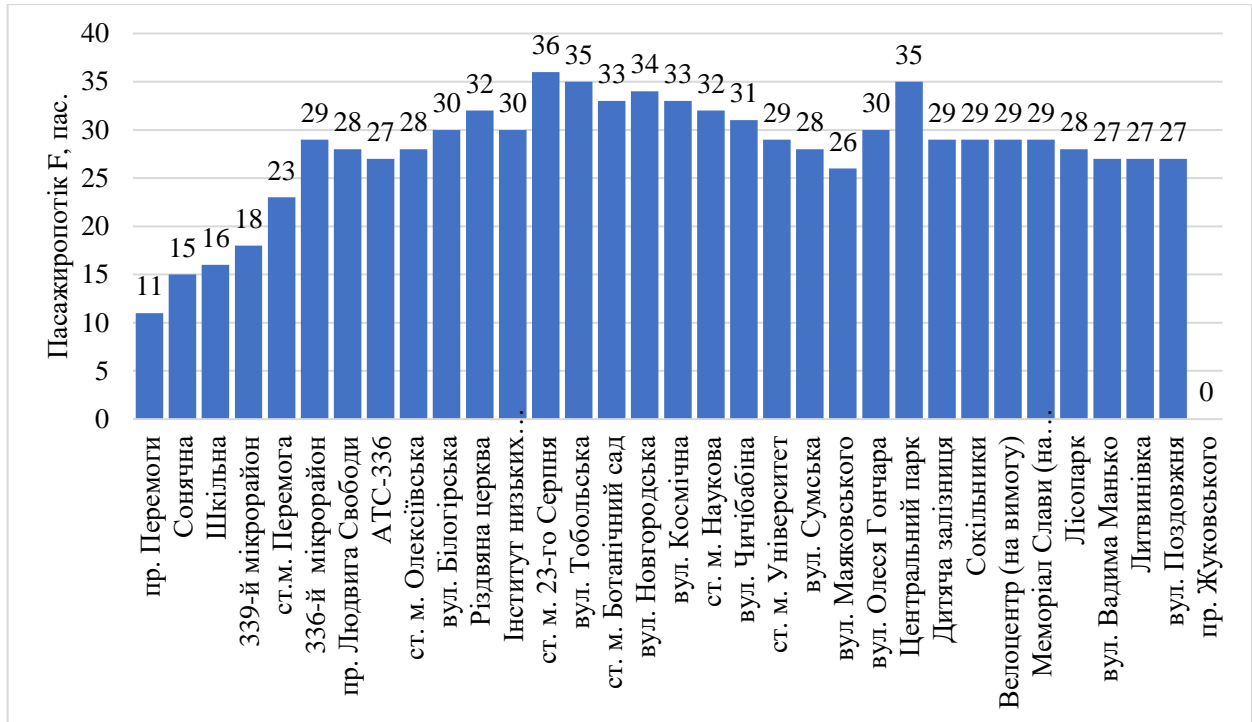


Рисунок 1.9 – Епюра пасажиропотоку на маршруті № 2 в зворотному напрямку у вечірній період (18:30)

На основі результатів обстежень було розраховано ключові критерії оцінки якості обслуговування пасажирів на маршруті. Вони включають середню відстань поїздки пасажирів, коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоків, коефіцієнт динамічного використання місткості тролейбуса, коефіцієнт змінюваності пасажирів, а також фактичну та можливу транспортну роботу.

Розрахункові значення наведених техніко-експлуатаційних показників роботи маршруту по напрямках та в різні години доби представлено на рис. 1.10.

За даними отриманої таблиці, видно, що динамічний коефіцієнт використання пасажиромісткості коливається від 0,16 до 0,34, що свідчить про не ефективне використання місткості в досліджені години доби.

Напрямок	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній
Місткість тролейбусу	105	105	105	105	105	105
Обсяг перевезення, ВСЬОГО	141	137	136	146	140	137
пільгових	43	33	37	33	39	39
школярів	31	34	31	29	31	31
Коеф. змішаності	4,03	4,28	3,49	3,56	3,5	3,5
Факт. тр-тна робота	405	314	394	420	397	397
Можл. тр-тна робота	1593	1593	1593	1593	1593	1593
Динам. коеф. використ. місткості	0,25	0,2	0,25	0,26	0,25	0,25
Коеф. нерівномір. пас-поточку	1,4	1,61	1,64	1,59	1,6	1,6
Сер. відстань поїздки пас-ра	2,872	2,292	2,897	2,877	2,836	2,90

Напрямок	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній
Місткість тролейбусу	105	105	105	105	105	105
Обсяг перевезення, ВСЬОГО	145	158	142	142	142	155
пільгових	39	24	38	20	43	29
школярів	23	38	32	31	29	29
Коеф. змішаності	4,03	6,87	3,94	5,46	4,06	3,37
Факт. тр-тна робота	376	259	437	271	388	542
Можл. тр-тна робота	1593	1593	1593	1593	1593	1593
Динам. коеф. використ. місткості	0,24	0,16	0,27	0,17	0,24	0,34
Коеф. нерівномір. пас-поточку	1,45	1,34	1,33	1,47	1,45	1,34
Сер. відстань поїздки пас-ра	2,593	1,639	3,077	1,908	2,732	3,50

Напрямок	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній	Середні
Місткість тролейбусу	105	105	105	105	105	105	105
Обсяг перевезення, ВСЬОГО	117	121	146	152	142	134	141
пільгових	32	32	41	26	31	22	33
школярів	29	29	41	31	21	24	30
Коеф. змішаності	3,77	3,77	5,84	5,84	4,18	4,18	4
Факт. тр-тна робота	290	283	308	303	386	380	364
Можл. тр-тна робота	1593	1593	1593	1593	1593	1593	1593
Динам. коеф. використ. місткості	0,18	0,18	0,19	0,19	0,24	0,24	0,23
Коеф. нерівномір. пас-поточку	1,73	1,73	1,29	1,29	1,42	1,42	1,48
Сер. відстань поїздки пас-ра	2,479	2,339	2,110	1,993	2,718	2,836	2,59

Рисунок 1.10 – Результат розрахунку основних ТЕП роботи маршруту по напрямках та години доби

Необхідно прагнути до такого рівня використання місткості транспортного засобу, щоб його коефіцієнт наближався до одиниці.

Підсумовуючі дані проведеного обстеження на тролейбусному маршруті № 2, що проходить від проспекту Перемоги до селища Жуковського, у місті Харків можна зробити висновок, що наповненість транспортних засобів на даному маршруті є доволі низькою в досліджені періоди доби. Це можна пояснити тим, що через половину цього маршруту проходять ще декілька: тролейбусний маршрут № 58 (дублює до зупинки ст. метро Держпром);

автобусний маршрут № 62 (дублює від ст. метро Держпром до селища Жуковського).

Аналіз техніко-експлуатаційних показників роботи тролейбусного маршруту № 2 у поєднанні з результатами обстеження пасажиропотоків та вимогами чинної нормативно-правової бази засвідчив наявність низки проблем, що негативно впливають на рівень використання рухомого складу та якість транспортного обслуговування пасажирів.

Згідно з вимогами державних будівельних норм ДБН 360-92** «Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень», у містах з чисельністю населення понад 1 млн. осіб загальний час поїздки від місця проживання до місця роботи для 90 % населення не повинен перевищувати 45 хвилин [6, 7]. Крім того, нормативна щільність заповнення салону транспортного засобу не має перевищувати 4 пасажири на 1 м² вільної площі підлоги за умови зайнятості всіх місць для сидіння.

Аналіз фактичних умов роботи маршруту № 2 показав, що заявлений інтервал руху коливається у межах від 8 до 20 хвилин, тоді як середній інтервал становить близько 16 хвилин. Відповідно до нормативних вимог, максимальний інтервал руху на міських маршрутах не повинен перевищувати 10 хвилин. Перевищення цього значення зумовлює необхідність організації руху за жорстким розкладом, що знижує гнучкість транспортного обслуговування та негативно впливає на привабливість громадського транспорту для пасажирів. Досліджуваний маршрут функціонує саме за таким розкладом, затвердженим перевізником у взаємодії із замовником транспортних послуг.

Результати аналізу пасажиропотоків засвідчили нерівномірність їх розподілу впродовж доби, наявність періодів низької наповненості салонів, а також відсутність перевантажень навіть у години пікового попиту. Це свідчить про недостатній рівень використання місткості рухомого складу та створює передумови для перегляду організації руху на маршруті. За таких умов доцільним є скорочення інтервалу руху з середнього значення 16 хвилин до 8 хвилин, що дозволить підвищити регулярність перевезень, скоротити час

очікування пасажирів на зупинках та наблизити параметри роботи маршруту до нормативних вимог.

Окрім цього, виявлений характер пасажиропотоків та відносно невисокий рівень завантаження транспортних засобів обґрунтовує доцільність розгляду можливості використання на маршруті електробусів меншої місткості. Застосування такого типу рухомого складу може забезпечити більш раціональне використання транспортних ресурсів, зменшення експлуатаційних витрат, підвищення енергоефективності перевезень, а також підвищити стійкість роботи маршруту в умовах можливих перебоїв електропостачання.

Таким чином, виявлені невідповідності між фактичними показниками роботи маршруту та нормативними вимогами, а також наявний потенціал для підвищення ефективності використання рухомого складу зумовили формулювання мети та задач дослідження.

Метою роботи є підвищення рівня використання рухомого складу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків на основі удосконалення організації руху та обґрунтування доцільності впровадження електробусів із застосуванням моделювання пасажиропотоків.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких задач дослідження:

- проаналізувати підходи до оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту;
- оцінити рівень використання рухомого складу на досліджуваному маршруті на основі матеріалів обстеження пасажиропотоків;
- виконати моделювання пасажиропотоків тролейбусного маршруту № 2 у програмному середовищі PTV Visum з метою оцінки впливу запропонованих організаційних змін на роботу маршруту;
- обґрунтувати можливість використання електробусів для обслуговування маршруту;
- визначити необхідну кількість рухомого складу із застосуванням існуючої методики розрахунку;

- розробити інвестиційний проєкт закупівлі електробусів із визначенням обсягу капітальних вкладень та експлуатаційних витрат;
- оцінити економічну ефективність інвестиційного проєкту.

1.3 Аналіз програмних середовищ для моделювання роботи маршрутів громадського транспорту

Отримання достовірних і репрезентативних значень показників ефективності функціонування маршрутної мережі є складним завданням, яке практично неможливо вирішити без застосування сучасних інструментів транспортного моделювання. За умов зростання транспортних навантажень, ускладнення структури міських перевезень та підвищення вимог до якості транспортного обслуговування, у розвинених країнах аналіз і планування транспортних систем здійснюється із широким використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Основною метою таких інструментів є формування кількісної оцінки параметрів транспортного процесу та підтримка прийняття обґрунтованих управлінських рішень шляхом порівняння альтернативних сценаріїв розвитку транспортних систем міст і регіонів.

На сучасному етапі розвитку транспортної науки створено значну кількість програмних комплексів, орієнтованих на моделювання попиту і пропозиції перевезень, аналіз роботи транспортних мереж та оцінку наслідків впровадження організаційних або інфраструктурних змін. Наявність широкого спектра програмних продуктів не спрощує вибір інструментарію для дослідника, оскільки жоден з них не забезпечує універсального рішення або абсолютної точності прогнозів. Більшість програмних систем реалізують відомі наукові підходи транспортного моделювання, а їх ефективність визначається глибиною реалізації алгоритмів, гнучкістю налаштувань і можливістю адаптації до конкретних умов дослідження.

До найбільш відомих комерційних програмних продуктів у сфері транспортного планування належать [8 – 14]:

- CUBE;
- TransCAD;
- EMME;
- PTV Visum;
- VISSIM;
- TRIPS;
- RTA;
- McTrans;
- TRANZI;
- ArcGIS з транспортними модулями;
- Enif та інші.

Інформація про функціональні можливості зазначених пакетів є відкритою і доступною у мережі Internet, що зумовлено їх комерційною орієнтацією. Більшість із них призначені для вирішення широкого кола завдань, серед яких ключовими є аналіз транспортного попиту, організація руху, планування маршрутних мереж та оцінка пропускної здатності транспортної інфраструктури. Окремі програмні комплекси мають додаткові модулі, що дозволяють використовувати їх для моделювання вантажних, авіаційних або мультимодальних перевезень.

У практиці транспортного планування міських агломерацій найбільшого поширення набули програмні продукти EMME (компанія INRO, Канада), TransCAD (корпорація Caliper, США) та VISUM (компанія PTV AG, Німеччина).

Програмний комплекс EMME характеризується модульною структурою та орієнтацією на побудову великих стратегічних транспортних моделей. Користувач має можливість формувати модель відповідно до конкретних потреб шляхом вибору необхідних модулів. Разом з тим, відсутність типових параметрів за замовчуванням і висока вимогливість до обсягу вхідних даних ускладнюють використання EMME для відносно простих або локальних транспортних досліджень.

Програмне забезпечення TransCAD поєднує інструменти транспортного

моделювання з розвиненими можливостями геоінформаційних систем. Платформа інтегрується з середовищем ArcGIS та використовує власну мову програмування GISDK, що дозволяє реалізовувати складні користувацькі сценарії аналізу транспортних процесів. Разом із широкими аналітичними можливостями недоліками TransCAD є висока вартість ліцензії та необхідність володіння спеціалізованими навичками програмування для повноцінного використання функціоналу.

Програмний пакет PTV Visum призначений для макроскопічного та мезоскопічного моделювання транспортних систем і забезпечує інтеграцію різних видів транспорту в межах єдиної узгодженої моделі. У середовищі PTV Visum використовується геоінформаційний підхід до побудови та редагування транспортної мережі, а також реалізовано інструменти розрахунку транспортного попиту. Програмний комплекс має тісну інтеграцію з VISSIM, що дозволяє поєднувати стратегічне та детальне мікромоделювання.

PTV Visum широко застосовується при розробці транспортних моделей міст у країнах Європи та використовується провідними транспортними і консалтинговими компаніями [8]. Його функціональні можливості дозволяють відображати всі види громадського транспорту в єдиній моделі, враховувати параметри маршрутної мережі, розкладів руху та пасажирських кореспонденцій. На відміну від класичних ГІС, PTV Visum дає змогу описувати складні взаємозв'язки між елементами транспортної системи та формувати комплексні сценарії розвитку перевезень.

З урахуванням цілей і задач даного дослідження, а також можливостей кількісної та графічної інтерпретації результатів доцільно використовувати програмний комплекс PTV Visum. Важливою перевагою є також наявність доступу до комерційної версії програмного продукту в навчальному процесі.

Як і в більшості сучасних систем транспортного планування, модель транспортної системи у PTV Visum включає модель транспортної пропозиції, модель маршрутної мережі та модель попиту на пересування. Ключовим і водночас найбільш складним елементом є модель формування матриці

пасажирських кореспонденцій, яка визначає адекватність відтворення реальних транспортних процесів і достовірність отриманих результатів.

Програмний комплекс PTV Visum дозволить змоделювати роботу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків. Зокрема, передбачається відтворення функціонування маршруту за існуючих умов експлуатації з інтервалом руху 16 хвилин та визначення відповідних пасажиропотоків у ранковий період години пік.

Отримані результати дозволять кількісно оцінити рівень використання рухомого складу та відповідність параметрів роботи маршруту фактичному попиту на перевезення.

Окрім аналізу діючої організації руху, можливості програмного комплексу PTV Visum буде використано для імітації альтернативного сценарію зменшення інтервалу руху до 8 хвилин. Моделювання такого варіанта дасть змогу визначити зміну розподілу пасажиропотоків, рівень завантаження транспортних засобів та вплив організаційних змін на показники роботи маршруту в умовах пікового навантаження.

Результати моделювання для базового та альтернативного сценаріїв слугуватимуть вихідною інформацією для обґрунтування необхідної кількості рухомого складу на маршруті, зокрема з урахуванням можливості впровадження електробусів. Отримані розрахункові показники будуть використані на подальших етапах дослідження при формуванні інвестиційного проекту закупівлі електробусів, визначенні обсягу капітальних вкладень та оцінці економічної ефективності запропонованих рішень.

1.4 Висновки по першому розділу

В умовах воєнного стану значна частина інфраструктури та рухомого складу пошкоджена, а безоплатне перевезення пасажирів підкреслює соціальну важливість комунального транспорту. Тому вивчення роботи міського

електротранспорту є актуальним через необхідність модернізації системи громадського транспорту та впровадження енергоефективних електробусів.

Досліджений тролейбусний маршрут № 2 має протяжність 15,28 км, працює з 5:55 до 18:42, а середній інтервал руху складає близько 16 хв.

Обстеження пасажиропотоків у 2024 році показало низьку наповненість салонів у денний час та нерівномірність розподілу пасажирів уздовж маршруту.

Виявлено, що максимальний динамічний коефіцієнт використання пасажиромісткості коливається від 0,16 до 0,34, що свідчить про недостатнє завантаження рухомого складу та обґрунтовує доцільність скорочення інтервалу руху та можливого впровадження транспорту меншої місткості, наприклад – електробусів.

Для прогнозування потенційних пасажиропотоків, а також моделювання різних сценаріїв роботи маршруту доцільно використати сучасний програмний продукт – VISUM. Такий підхід дозволить розрахувати необхідну кількість рухомого складу і підготувати обґрунтування для інвестиційного проєкту впровадження електробусів.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРОЛЕЙБУСНОГО МАРШРУТУ

2.1 Методичні засади досягнення мети магістерської роботи

Досягнення поставленої мети – підвищення рівня використання рухомого складу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків на основі удосконалення організації руху та обґрунтування доцільності впровадження електробусів із застосуванням моделювання пасажиропотоків – здійснюється за комплексною поетапною методикою, що поєднує аналітичні, розрахункові, імітаційні та економічні методи дослідження.

Перший крок. Формування теоретико-методичної бази дослідження.

На цьому кроці визначається об'єкт і предмет дослідження, уточнюється мета та задачі роботи. Виконується аналіз наукових публікацій, нормативних документів і методичних підходів щодо оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту, організації руху маршрутів та доцільність впровадження електробусів. На основі аналізу формується методична база подальших досліджень.

Другий крок. Збір вихідної інформації та обстеження пасажиропотоків.

На другому етапі здійснюється збір фактичних даних про роботу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків. Організовується та проводиться обстеження пасажиропотоків із застосуванням табличного методу у різні періоди доби. Паралельно збирається інформація про режим роботи маршруту, інтервали руху, типи рухомого складу, техніко-експлуатаційні характеристики та умови експлуатації.

Третій крок. Обробка результатів обстеження та аналіз фактичної роботи маршруту.

Отримані в ході обстеження дані підлягають систематизації та обробці. Виконується розрахунок основних техніко-експлуатаційних показників роботи маршруту, зокрема коефіцієнтів використання рухомого складу та місткості.

Будуються епюри пасажиропотоків за напрямками руху та часовими інтервалами. За результатами аналізу виявляються проблемні ділянки маршруту, недоліки в організації руху та резерви підвищення ефективності використання рухомого складу.

Крок четвертий. Моделювання роботи маршруту у середовищі PTV Visum.

На наступному етапі формується транспортна модель тролейбусного маршруту № 2 у програмному середовищі. Моделюється робота маршруту в умовах існуючого інтервалу руху (16 хвилин) у ранковий період пікового навантаження з визначенням відповідного пасажиропотоку.

Далі у середовищі реалізуються альтернативні сценарії організації руху, зокрема сценарій скорочення інтервалу руху до 8 хвилин. Для кожного сценарію визначається потенційний обсяг перевезень. Всі зміни параметрів моделювання фіксуються.

Крок п'ятий. Визначення потреби у рухомому складі.

На основі результатів моделювання пасажиропотоків обирається методика розрахунку необхідної кількості транспортних засобів для обслуговування маршруту за запропонованих умов. Виконується розрахунок кількості рухомого складу для кожного сценарію та здійснюється порівняльна оцінка отриманих результатів.

Крок шостий. Обґрунтування вибору типу рухомого складу, а саме аналіз можливості використання електробусів на досліджуваному маршруті. Здійснюється підбір типу та класу електробусів (з урахуванням місткості, експлуатаційних характеристик та умов руху), наводиться їх технічний опис та обґрунтовується доцільність застосування електробусів меншої місткості на маршруті з урахуванням пасажиропотоку.

Крок сьомий. Розрахунок експлуатаційних та поточних витрат.

Для обраного типу електробусів виконуються розрахунки прогнозованих експлуатаційних витрат, пов'язаних із їх обслуговуванням. Окремо визначаються поточні витрати на функціонування маршруту за базовим та запропонованим варіантами організації руху.

Крок восьмий. Розробка інвестиційного проекту.

На основі отриманих результатів формується інвестиційний проект закупівлі електробусів із використанням механізмів лізингу або кредитування. Визначається обсяг капітальних вкладень, структура фінансування та очікувані витрати протягом життєвого циклу проекту.

Крок дев'ятий. Оцінка економічної ефективності проекту.

Економічна доцільність впровадження електробусів оцінюється за допомогою загальноприйнятих показників ефективності інвестицій, зокрема чистої приведеної вартості (NPV), внутрішньої норми дохідності (IRR), строку окупності та індексу дохідності.

Крок десятий. Формування висновків і практичних рекомендацій

На завершальному етапі узагальнюються результати дослідження, формулюються висновки та розробляються практичні рекомендації щодо підвищення рівня використання рухомого складу тролейбусного маршруту № 2 та впровадження електробусів у систему міського транспорту Харкова.

2.2 Етапи роботи у програмному середовищі PTV Visum

Транспортна модель, що формується у програмному середовищі PTV Visum, ґрунтується на поєднанні трьох взаємопов'язаних елементів:

- підсистеми формування транспортного попиту;
- опису транспортної інфраструктури;
- набору моделей.

Ці елементи відтворюють поведінку учасників дорожнього руху. Мережева складова моделі характеризує транспортну пропозицію міста та включає відомості про вузлові елементи мережі, зупиночні пункти, лінійні ділянки вулично-дорожньої мережі, а також маршрути громадського транспорту із заданими параметрами руху. Представлення транспортних послуг у середовищі PTV Visum забезпечує можливість їх візуалізації, інтерактивного аналізу та подальшої обробки із застосуванням різних підходів транспортного

моделювання.

Побудова моделі міської транспортної системи у цьому середовищі виконується поетапно, що дозволяє послідовно сформувати цілісну та логічно узгоджену модель функціонування громадського транспорту. Узагальнена схема моделювання передбачає виконання таких основних кроків:

- задання систем громадського транспорту та основних експлуатаційних характеристик руху транспортних засобів, у тому числі середніх швидкостей на окремих ділянках мережі;
- формування вузлів транспортної мережі, які відображають перехрестя та ключові точки з'єднання маршрутів;
- побудову лінійних елементів між вузлами, що моделюють ділянки шляхів сполучення;
- ідентифікацію вузлів, які виконують функцію зупинок громадського транспорту;
- задання маршрутів громадського транспорту з визначенням їх трас проходження в межах мережі;
- закріплення перевізників за відповідними маршрутами;
- визначення типів рухомого складу, що експлуатується на маршрутах, із зазначенням кількості транспортних засобів та їх конструктивних особливостей;
- встановлення розкладів руху для коректного відтворення реального режиму роботи маршрутів.

Початковим і водночас важливим етапом моделювання є введення даних щодо транспортних систем та параметрів їх функціонування, передусім експлуатаційної швидкості руху, інтервалів руху, що мають вирішальний вплив на результати розрахунків та достовірність отриманої транспортної моделі.

У магістерській роботі для аналізу пасажиропотоку на тролейбусному маршруті № 2 була використана готова модель міста Харкова. Робота з моделлю включала такі дії:

- відкриття досліджуваного маршруту та перевірка коректності його траси в моделі;

кількості електробусів для обслуговування змодельованого пасажиропотоку.

Ця послідовність дій дозволила оцінити ефективність маршруту та підготувати основу для економічного обґрунтування заміни тролейбусів на електробуси.

Так, результатом розрахунку обсягу перевезення за 2,5 години ранкового періоду пік для модельованого інтервалу руху отримано значення 1544 пасажирів. Для цього часу пік, але за умови більшого інтервалу – 16 хв, потрібно мати на маршруті приблизно 10 тролейбусів, а от яка знадобиться кількість електробусів поки невідомо. Для цього потрібно скористатись існуючими методиками визначення потрібної кількості рухомого складу.

Також потрібно врахувати, що обсяг пасажирів знижується у вихідні дні. За практикою це складає близько 30 %. Виходячи із отриманих значень, це складе 901 пасажир для ранкового періоду.

Оскільки в інвестиційному проекті часовий період розрахунку складає 1 рік, то потрібно отримані значення обсягу перевезення перевести від «обсягу за 2,5 години» до «обсягу за рік». Також при розрахунку приймається, що обсяг перевезення буде стабільним протягом всього розрахункового періоду інвестиційного проекту, тариф залишиться без змін. Та постійними будуть показники експлуатаційних витрат на транспортні засоби на маршрут в цілому.

2.3 Обґрунтування потрібної кількості електробусів

Визначення раціональної кількості та пасажиромісткості рухомого складу на міських маршрутах громадського транспорту ґрунтується на узгодженні фактичного пасажирського попиту з параметрами організації руху. Основним вихідним показником при цьому є максимальний пасажиропотік у годину пік, оскільки саме він визначає навантаження на маршрут і вимоги до рівня транспортного обслуговування населення.

Для визначення кількості транспортних засобів на тролейбусному маршруті № 2 м. Харків доцільно використати такі вихідні дані:

- максимальний пасажиропотік у годину пік (осіб/год), отриманий за результатами моделювання пасажиропотоків у PTV Visum;
- пропонувані інтервали руху транспортних засобів у годину пік (у даному дослідженні – 8 хвилин);
- тип міського маршруту та умови його функціонування (велике місто з чисельністю населення понад 1 млн. осіб);
- нормативні вимоги до якості перевезень і допустимого рівня наповнення транспортних засобів.

Першим етапом методики є визначення раціональної номінальної місткості транспортного засобу, яка повинна відповідати величині пасажиропотоку та забезпечувати прийнятний інтервал руху.

Згідно з класичним підходом, що широко використовується у вітчизняній транспортній науці, між годинною пасажиронапруженістю маршруту та рекомендованою місткістю транспортного засобу існує ustalений нормативний зв'язок. Для міських маршрутів він може бути представлений у вигляді табличної залежності, відповідно до якої [15]:

- при пасажиропотоці (200–1000) пас./год доцільним є використання транспортних засобів місткістю близько 40 пасажирів;
- при пасажиропотоці (1000–1800) пас./год доцільним є використання транспортних засобів місткістю близько 65 пасажирів;
- при пасажиропотоці (1800–2600) пас./год – 80 пасажирів;
- при пасажиропотоці (2600–3800) пас./год – 100 пасажирів;
- при пасажиропотоках понад 3800 пас./год – транспортні засоби великої місткості 160 пасажирів.

Таким чином, на основі визначеного для маршруту № 2 максимального пасажиропотоку в годину пік обирається тип електробуса відповідної місткості, що забезпечує узгодження попиту та пропозиції перевезень за заданого інтервалу руху 8 хвилин. При обсязі перевезення в ранковий період пік 1544 пас. в обидва напрямки, сумарний пасажиропотік можна визначити як: 1544 пас. поділити на 2,5 години, становитиме 618 пас./год. Тоді як пасажиропотік в одному напрямку

дорівнюватиме 618 пас./год. Поділити на (2 – 309) пас./год. Згідно з цією таблицею доцільно обрати транспорт місткістю 40 пасажирів.

Далі доцільно визначити частоту руху та кількості рейсів. Заданий інтервал руху дозволяє визначити частоту руху транспортних засобів у годину пік

$$f = \frac{60}{t}, \quad (2.1)$$

де t – інтервал руху, хв.

Для інтервалу 8 хвилин частота руху становить

$$f = \frac{60}{8} = 7,5 \text{ рейсів/год.}$$

Отримане значення використовується для подальшого узгодження пасажиропотоку з місткістю транспортного засобу.

Провізна спроможність дорівнюватиме

$$P_{np} = f \cdot C \cdot \gamma, \quad (2.2)$$

де C – номінальна місткість транспортного засобу, пас.;

γ – коефіцієнт наповнення салону, приймається в межах (1,1 – 1,2).

Розрахунок для одного напрямку

$$P_{np} = \frac{60}{8} \cdot 40 \cdot 1,1 = 330 \text{ пас./год.}$$

Фактичний попит – 309 пас./год.

Визначення необхідної кількості транспортних засобів на маршруті. Кількість транспортних засобів, необхідних для обслуговування маршруту у

годину пік, визначається на основі часу оберту маршруту

$$N = \frac{T_{об}}{t}, \quad (2.3)$$

де $T_{об}$ – час повного оберту маршруту (в обох напрямках), хв.

Для даної роботи цей показник відомий із відкритих джерел, і дорівнює 105 хвилин

$$N = \frac{105}{8} = 13 \text{ од.}$$

Далі потрібно провести опис потенційної марки електробусів та сформуванню інвестиційний проект.

2.4 Висновки по другому розділу

Сформовано комплексну методику дослідження, яка поєднує аналітичні, розрахункові, імітаційні та економічні методи і забезпечує досягнення мети магістерської роботи щодо підвищення ефективності використання рухомого складу тролейбусного маршруту. Запропонована поетапна схема дозволяє послідовно перейти від аналізу фактичної роботи маршруту до обґрунтування впровадження електробусів та оцінки економічної доцільності відповідного інвестиційного проекту.

Визначено послідовність побудови та використання транспортної моделі у програмному середовищі PTV Visum, що забезпечує реалістичне моделювання обсягу перевезення у ранковий період пік – 1544 пас. Отримані результати моделювання стали основою для розрахунку потреби в 13 електробусах місткість 40 пас. і формування економічного обґрунтування їх впровадження.

3 РОЗРАХУНОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ

3.1 Характеристика пропонованого електробусу

З метою обґрунтування доцільності впровадження електробусів для обслуговування тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків у роботі розглянуто електричний автобус е-АТАК, який за своїми технічними та експлуатаційними характеристиками відповідає умовам міських пасажирських перевезень, рис. 3.1.

Електробус е-АТАК належить до категорії М3, класу І, що передбачає його використання на міських маршрутах з інтенсивним пасажирообміном. Конструкція транспортного засобу є низькопідлоговою, що забезпечує зручність посадки та висадки пасажирів, у тому числі осіб з обмеженими можливостями та пасажирів з дитячими візками. Керування здійснюється з лівого боку, що відповідає чинним вимогам дорожнього руху в Україні.



Рисунок 3.1 – Електробус е-АТАК [16]

Рух електробуса забезпечується електричним двигуном ТМ4, який працює за схемою прямого приводу. Максимальна потужність силової установки становить 230 кВт, а максимальний крутний момент – 2500 Н·м, що забезпечує достатню динаміку руху під час експлуатації в умовах міської забудови, з

частими зупинками та розгонами. Така характеристика є особливо важливою для маршрутів з нерівномірним пасажиропотоком та складним профілем руху.

Живлення електродвигуна здійснюється від літій-іонної акумуляторної батареї ємністю 220 кВт·год, що дозволяє забезпечити автономний пробіг до 300 км у режимі експлуатації для класу I. Даний показник є достатнім для виконання повного обсягу денних рейсів без необхідності проміжної зарядки за умови раціональної організації руху.

Заряджання акумуляторної батареї передбачено від мережі змінного струму за стандартом Туре 2 із сумарною потужністю 44 кВт (подвійна система заряджання). Орієнтовний час повної зарядки становить близько 5 годин, що дозволяє здійснювати заряджання в нічний період та мінімізувати вплив на експлуатаційний процес.

Максимально допустима повна маса електробуса складає 11500 кг, що відповідає вимогам для транспортних засобів даного класу. Габаритні розміри електробуса забезпечують можливість його безперешкодної експлуатації на міських вулицях: загальна довжина становить 8315 мм, ширина – 2436 мм, висота – 3090 мм. Колісна база дорівнює 4580 мм, що у поєднанні з радіусом розвороту 6312 мм (від бордюру до бордюру) забезпечує достатню маневровість в умовах обмеженого міського простору.

Висота салону електробуса складає 2372 мм. Висота першої сходинки при вході через передні двері становить 340 мм, а при використанні функції зниження підлоги – 270 мм, що додатково підвищує доступність транспортного засобу.

Електробус комплектується передніми одинарними шинами розміром 245/70 R17.5 та задніми здвоєними шинами 225/75 R17.5, що сприяє рівномірному розподілу навантаження та підвищує стійкість руху.

Пасажиромісткість електробуса e-АТАК у виконанні класу I становить 47 осіб, з яких 21 місце – для сидіння, 25 – стоячі пасажири, а також передбачено 1 місце для інвалідного візка. Така місткість відповідає рівню пасажиропотоків, характерних для досліджуваного маршруту, та дозволяє забезпечити прийнятний

інтервал руху без надмірного використання рухомого складу.

Отже, технічні, планувальні та експлуатаційні характеристики електробуса е-АТАК дозволяють його розглянути в якості інвестиційного проекту для використання на тролейбусному маршруті № 2 для умови оптимізації інтервалів руху та підвищення ефективності використання рухомого складу.

3.2 Прогнозовані поточні витрати на утримання маршруту

Перед виконанням економічної оцінки проекту придбання електробусів необхідно визначити поточні транспортні витрати на його утримання складу. Найбільш вагомими складовими таких витрат включають:

- витрати на електроенергію;
- витрати на технічне обслуговування і ремонт;
- витрати на експлуатацію шин;
- витрати на оплату праці водіїв та обслуговуючого персоналу.

Формули, представлені у даному підрозділі, взяті з методики розрахунку тарифів на послуги пасажирського автомобільного транспорту [16], затверджена наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 17.11.2009 № 1175 (із подальшими змінами та доповненнями) передбачає визначення річних показників використання рухомого складу.

Проте не всі статті, описані в [16] підходять для електробусу. У випадку обчислення витрат для традиційних автобусів основну роль відіграють витрати на паливо (дизель або бензин), тоді як для електробусів замість цих статей необхідно враховувати споживання електроенергії. На (2024–2025) роки в Україні встановлено єдиний тариф на електроенергію для побутових споживачів у розмірі 4,32 грн. за 1 кВт·год (включно з ПДВ) – цей рівень діє для населення щонайменше до жовтня 2025 року. Такі тарифи є орієнтовними, а при наявності змоги заряджати вночі (за зниженим тарифом, рівним 2,16 грн./кВт·год (з 23:00 до 07:00)). Формула матиме вигляд

$$B_{\text{ел.енерг } 1\text{км}} = \frac{H_{\text{ен}100\text{км}}}{100} \cdot \Pi_{1\text{квт}}, \quad (3.1)$$

де $H_{\text{ен}100\text{км}}$ – нормативна витрата електроенергії електробусом на 100 км, за даними технічної характеристики 73 кВт год/100 км.

Розрахунок для електробуса

$$B_{\text{ел.енерг } 1\text{км}} = \frac{73}{100} \cdot 4,32 = 3,15 \text{ грн./кВт.}$$

Розрахунок планових річних витрат на електроенергію тоді складуть

$$B_{n(\text{ел})}^{\text{річ}} = B_{\text{ел.енерг } 1\text{км}} \cdot \frac{L_{\text{річ}}}{1000}. \quad (3.2)$$

Наразі є не порахованим річний пробіг. Для цього потрібно скористатись наявною інформацією про тривалість оборотного рейсу на діючому маршруті (105 хв). Тоді кількість оборотних рейсів за 1 годину становитиме

$$n_{\text{год}} = \frac{60}{105} = 0,571 \text{ рейс/год.}$$

Далі необхідно визначити кількість оборотних рейсів за добу. Для цього треба визначитися із тривалістю роботи маршруту. Для Харкова і міських маршрутів доцільним буде 18 годин. Тоді за добу кількість рейсів буде добутком 0,517 рейсу/год помножену на 18 годин роботи маршруту і складе 10,3 оборотних рейсів за добу.

Також відома довжина оборотного рейсу 28,05 км. Тоді за добу пробіг становитиме добуток довжини оборотного рейсу на 10,3 оборотних рейсів за добу – це 280,5 км.

Річний пробіг дорівнюватиме

$$L_{річ} = l_{доб} \cdot 365,$$

де $l_{доб}$ – добовий пробіг одного транспортного засобу, рівний 280,5 км.

Розрахунок

$$L_{річ} = 280,5 \cdot 365 = 102382 \text{ км.}$$

Тоді планові річні витрати на електроенергію складуть

$$B_{ел}^{річ} = 3,15 \cdot \frac{102382}{1000} = 322,503 \text{ тис. грн.}$$

Загальний річний пробіг розрахованої кількості електробусів на маршруті, визначений для середньодобового пробігу автобуса

$$L_{річ i} = l_{доб} \cdot A_o \cdot 365, \quad (3.4)$$

$$L_{річ 14од} = 280,5 \cdot 13 \cdot 365 = 1330973 \text{ км.}$$

Для розрахунку планових річних витрат на мастильні матеріали були використані наступні дані [16]:

- загальні нормативні витрати палива на 1 км пробігу за конкретних умов експлуатації, л/1 км;
- норми витрат мастильних матеріалів для автомобілів, що працюють на дизельному паливі відповідно;
- вартість мастильних матеріалів, грн./л (кг).

Гранично допустимі значення тимчасових нормативів витрат мастильних матеріалів були взяті для аналогічної за місткістю марки автобусу I-VAN:

- моторна олива – 2,8 л/100 л;

- трансмісійна олива – 0,4 л/100 л;
- спеціальні оливи – 0,1 л/100 л;
- пластичні (консистентні) мастила – 0,3 кг/100 л.

Але тут важливо внести пояснення. Оскільки для електробусів відсутній двигун внутрішнього згоряння та класична трансмісія, витрати моторної та трансмісійної оливи у процесі експлуатації не враховуються.

Для розрахунку планових витрат на мастильні матеріали електробуса враховувалися лише витрати пластичних мастил, необхідних для змащування елементів ходової частини, підвіски та рульового керування.

Як орієнтовну базу для розрахунків використано гранично допустимі тимчасові нормативи витрат пластичних мастил для автобусів аналогічної пасажиромісткості, що застосовуються у [16].

Тоді, з урахуванням цих поправок, розрахунок планових витрат на мастильні матеріали на 1 км пробігу на маршруті проводиться за залежністю

$$B_{м1км(i)} = N_{ен} \cdot N_{пл} \cdot C_{плс} , \quad (3.5)$$

де $N_{пл}$ – норми витрат пластичних мастил (перераховано на основі нормативу для дизельних двигунів рівних 0,3 кг/100 л до електричних двигунів – 0,000282845 кг/кВт·год [17];

$N_{ен}$ – норматив витрат енергії на 1 км шляху, прийнято 0,733 кВт·год/км [17];

$C_{пл}$ – середня вартість закупівель пластичних мастил, прийнято 200 грн./кг.

Розрахунок

$$B_{м1км} = 0,733 \cdot 0,000282845 \cdot 200 = 0,041465077 \text{ грн./км.}$$

Розрахунок планових річних витрат на мастильні матеріали для електробусу

$$B_{\text{мел}}^{\text{пич}} = N_{\text{вт}} \cdot \frac{L_{\text{пич}}}{1000} . \quad (3.6)$$

Розрахунок для одного електробусу

$$B_{\text{мел}}^{\text{пич}} = 0,733 \cdot \frac{102382}{1000} = 75,046 \text{ тис. грн.}$$

Для розрахунку витрат на шини було використано наступні дані:

- кількість шин (з урахуванням запасного колеса), встановлених на одному транспортному засобі, позначка розміру шин, од.;
- вартість шин, грн./од.;
- експлуатаційні норми середнього ресурсу пневматичних шин та відповідні коефіцієнти корегування (приймаються згідно нормативного документа), тис. км.

Експлуатаційні норми середнього ресурсу пневматичних шин взято для автобусів аналогічних за місткістю, табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Експлуатаційні норми середнього ресурсу шин

Марка автобуса	Маркування шин	Норма середнього ресурсу пневматичних шин, тис. км
Рута 25 СПГ	175 R 16C	60
Рута 22 ІНВА		
Рута 25 СПГ	185/75R16C, 165/70R16	60
БАЗ А 079.14 (А 09201, А 09302, А 092Н2)	215/75/R17.5C	70
Богдан А 092Н2		
I-VAN/ е-АТАК	225R17.5	

Прийняті для розрахунку коефіцієнти корегування:

- у залежності від дорожньо-кліматичних умов, $k_1 = 0,96$;
- у залежності від інтенсивності експлуатації пневматичних шин $k_2 = 1$;

- у залежності від коефіцієнту використання пасажировмістності $k_4 = 1,02$;
- у залежності від відношення пробігу в місті до пробігу за межами міста $k_6 = 0,97$.

Сумарний корегувальний коефіцієнт складе

$$K_k = 0,96 \cdot 1 \cdot 1,02 \cdot 0,97 = 0,950 .$$

Планові витрати на шини на 1 км пробігу на маршруті визначається як

$$B_{ш1км(i)} = \frac{Ц_{ш} \cdot K_{ш}}{H_{ш} \cdot K_k}, \quad (3.7)$$

де $Ц_{ш}$ – середня ціна шин за звітний рік, грн./од.;

$K_{ш}$ – кількість шин, встановлених на одному електробусі, од.;

$H_{ш}$ – експлуатаційна норма середнього ресурсу пневматичних шин, тис. км;

K_k – сумарний корегувальний коефіцієнт, який враховує умови експлуатації.

Дані цього показника прийняті за аналогією з автобусом, через схожість габаритних розмірів та пасажиромісткості. Для одного електробусу

$$B_{ш1км} = \frac{7500 \cdot 6}{70000 \cdot 0,950} = 0,677 \text{ грн./км.}$$

Розрахунок прогнозних витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт рухомого складу.

Витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням і поточним ремонтом рухомого складу, охоплюють вартість матеріалів, що використовуються під час виконання регламентних робіт, а також витрати на придбання запасних частин і оплату праці ремонтного персоналу. У разі, якщо витрати на заробітну плату ремонтників враховуються у складі фонду оплати праці персоналу підприємства,

до даної статті витрат відносять виключно витрати на матеріали та запасні частини.

Планові витрати на матеріали та запасні частини в розрахунку на 1 км пробігу транспортного засобу визначаються із застосуванням відповідної розрахункової залежності.

Прогнозні витрати на матеріали та запчастини на 1 км пробігу автомобільного транспортного засобу розраховуються за формулою:

$$B_{\text{тоіпр}}^{1\text{км}} = \frac{1}{L_{\text{річ } i}} \left[N_{\text{що}} \cdot H_{\text{що}} + N_{\text{то-1}} \cdot H_{\text{то-1}} + \right. \\ \left. + N_{\text{то-2}} \cdot H_{\text{то-2}} + \frac{L_{\text{річ } i} (H_{\text{р.м.}} + H_{\text{р.зч.}})}{1000} \right], \quad (3.8)$$

де $N_{\text{що}}, N_{\text{то-1}}, N_{\text{то-2}}$ – кількість обслуговувань ЩО, ТО-1, ТО-2 за відповідний пробіг $L_{\text{то-1}}, L_{\text{то-2}}$, од.;

$H_{\text{що}}, H_{\text{то-1}}, H_{\text{то-2}}$ – норми витрат матеріалів і запасних частин на одне обслуговування, грн.;

$H_{\text{р.м.}} + H_{\text{р.зч.}}$ – норми витрат відповідно матеріалів і запасних частин на ремонт на 1000 км пробігу, грн./1000 км.

Прогнозні річні витрати на ТО та ПР визначаються за формулою

$$B_{\text{тоіпр}}^{\text{річ}} = \frac{B_{\text{тоіпр}}^{1\text{км}} \cdot L_{\text{річ}}}{1000}. \quad (3.9)$$

Перелік видів технічного обслуговування та поточного ремонту транспортних засобів визначається відповідними нормативними документами, що регламентують порядок і строки виконання технічних процедур для автомобільної техніки. Такі положення встановлюють планові інтервали

проведення ТО та ПР залежно від типу й характеру експлуатації транспортного засобу. Оскільки для нових моделей електробусів окремі нормативи наразі не затверджені, при визначенні періодичності технічних операцій у розрахунках використовуються адаптовані вимоги, що відповідають експлуатаційним характеристикам аналогічних за класом і призначенням автобусів [16].

Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт включають закупівлю матеріалів та запасних частин, а також оплату праці персоналу, який виконує ремонтні роботи. При цьому до складу витрат, безпосередньо віднесених до обслуговування й ремонту транспортних засобів, належать лише матеріали й запасні частини, тоді як витрати на заробітну плату ремонтних робітників, як правило, відображаються в інших статтях фонду оплати праці.

Оцінка прогнозованих витрат на матеріали та запасні частини на одиницю пробігу транспортного засобу здійснюється з використанням методичних підходів, що передбачають визначення питомих норм витрат відповідно до типорозмірів і конструктивних характеристик рухомого складу. У разі відсутності спеціальних нормативів для конкретної моделі транспортного засобу, для розрахунків приймаються величини, встановлені для машин аналогічного класу та призначення.

Величина нормативних витрат матеріалів і запасних частин, що зазвичай визначається в іноземній валюті, у розрахунках переводиться в національну валюту шляхом застосування середньозваженого курсу Національного банку України, актуального на момент проведення оцінки. У грудні 2025 року орієнтовний курс гривні щодо долара США перебуває в межах (38,50 – 40) грн. за 1 USD, що забезпечує більш реалістичну економічну оцінку поточних і прогнозних витрат у сучасних умовах.

Технічне обслуговування електробусів розглядається як система планово-попереджувальних заходів, спрямованих на забезпечення справного технічного стану рухомого складу та підтримання його експлуатаційної надійності протягом усього строку служби. Проведення технічного обслуговування здійснюється у

встановлені терміни відповідно до регламентів виробника та особливостей експлуатації електробусів у міських умовах.

У процесі експлуатації електробуса умовно виділяються початковий та основний періоди, для кожного з яких передбачено відповідний перелік обслуговувальних робіт. У початковий період експлуатації виконуються такі види технічного обслуговування: щоденне технічне обслуговування, щотижневе технічне обслуговування, а також разове регламентне обслуговування типу ТО-2500.

Щоденне та щотижневе технічне обслуговування здійснюється, як правило, водієм електробуса перед виїздом на маршрут і після повернення з лінії. У разі тривалого перебування транспортного засобу на стоянці після інтенсивної експлуатації додатково проводиться контроль технічного стану в обсязі щоденного обслуговування. До переліку основних операцій щоденного технічного обслуговування належать перевірка рівня робочих рідин у гідропідсилювачі керма та компресорі пневматичної системи, контроль рівня теплоносія в системі опалення салону, а також перевірка рідини в контурах охолодження електродвигунів і силової електроніки.

Разове технічне обслуговування ТО-2500 виконується спеціалізованим сервісним центром у межах початкового періоду експлуатації електробуса, зазвичай у діапазоні пробігу від 1000 км до 5000 км. Надалі технічне обслуговування здійснюється з періодичністю, встановленою виробником, яка для електробусів даного класу становить близько 30000 км пробігу.

З огляду на конструктивні особливості електробусів та відсутність традиційного двигуна внутрішнього згоряння, структура та склад витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт істотно відрізняються від аналогічних показників для дизельних автобусів. У зв'язку з цим прогностичні витрати на ТО і ПР електробусів визначаються за адаптованою методикою, що враховує специфіку електричного приводу, зменшену кількість механічних вузлів, а також особливості обслуговування тягових батарей і електронних систем керування.

Приклад розрахунку прогнозних витрат ТО і ПР на 1 км для одного е-АТАК

$$B_{\text{ТО і ПР}}^{\text{1км}} = \frac{1}{102382} [165 \cdot 18,04 + 57 \cdot 55,15 + 5 \cdot 217,14 + \frac{102382 \cdot 310,44}{1000}] = 0,416 \text{ грн. / км.}$$

Тоді річні витрати відповідно дорівнюють

$$B_{\text{моіпр}}^{\text{річ}} = \frac{0,416 \cdot 102382}{1000} = 42,588 \text{ тис. грн.}$$

Для визначення планових річних витрат, пов'язаних із використанням акумуляторних батарей електробуса, у розрахунках використано такі вихідні дані [10]:

- тип і категорія акумуляторної батареї;
- нормативний середній ресурс експлуатації акумуляторної батареї, міс.;
- коригувальні коефіцієнти до нормативного ресурсу, встановлені відповідно до вимог методики [10];
- фактична інтенсивність експлуатації транспортного засобу, км/міс.;
- вартість придбання акумуляторної батареї, грн.

У межах даного дослідження розглядаються допоміжні акумуляторні батареї електробуса, які забезпечують живлення низьковольтних систем (освітлення, систем керування, інформаційних табло, допоміжного обладнання тощо) і не є тяговими акумуляторами. Для таких батарей норматив середнього ресурсу експлуатації прийнято на рівні 30 місяців, що відповідає маршовим необслуговуваним свинцево-кислотним стартерним акумуляторам.

Фактична інтенсивність експлуатації одного електробуса, прийнята для розрахунків, становить 8531 км/міс., що відповідає умовам міської маршрутної

експлуатації.

При визначенні скоригованого ресурсу акумуляторних батарей у розрахунках використано такі коригувальні коефіцієнти:

– коефіцієнт, що враховує країну-виробника акумуляторних батарей та тривалість експлуатації колісного транспортного засобу, $k_1 = 1$;

– коефіцієнт, що враховує співвідношення сумарної потужності додаткових споживачів електроенергії до встановленої потужності транспортного засобу, $k_2 = 1$;

– коефіцієнт, що враховує категорію умов експлуатації транспортного засобу, $k_3 = 1$.

Сумарний корегувальний коефіцієнт дорівнює добутку між всіма переліченими коефіцієнтами і становить 1.

Тоді планові витрати на акумуляторні батареї на 1 км пробігу становлять

$$B_{аб1км(i)} = \frac{Ц_{аб} \cdot K_{аб}}{H_{аб} \cdot K_k \cdot I}, \quad (3.10)$$

де $Ц_{аб}$ – вартість закупівель акумуляторної батареї за звітний рік, грн.;

$K_{аб}$ – кількість акумуляторних батарей, встановлених на одному автомобільному транспортному засобі, од.;

$H_{аб}$ – експлуатаційна норма середнього ресурсу акумуляторних батарей, місяців [10];

K_k – сумарний корегувальний коефіцієнт, який враховує умови експлуатації;

I – фактична інтенсивність експлуатації автобусів, км/міс.

Згідно технічних характеристик електробуса строк експлуатації однієї акумуляторної батареї складає (6–9) років, після чого її варто повністю замінити. Тривалість проекту, що розглядається становить п'ять років, тому прийнято рішення не враховувати витрати на їх оновлення.

Також за даними технічних характеристик одного заряду АКБ для

електробуса достатньо для подолання маршруту протяжністю (250 – 300) км. Тобто в даному випадку майже на весь день роботи на маршруті.

Використовуються літій-іонні акумуляторні батареї з катодом на основі фосфату заліза (LiFePO₄ або літій-залізо фосфатні АКБ. Саме цей тип АКБ вважається найбільш безпечним, екологічним, довговічним та менш токсичним при утилізації).

Основні річні витрати на оплату праці водіїв визначаються за наступною залежністю

$$ЗП_{вод}^{річ} = ЗП_{вод}^{осн} + ЗП_{вод}^{відп}, \quad (3.11)$$

де $ЗП_{вод}^{осн}$ – витрати на основну заробітну плату водіїв за рік маршруті, тис. грн.;

$ЗП_{вод}^{відп}$ – витрати на доплати з відпусток водіїв, тис. грн.

Витрати на основну заробітну плату водіїв за рік визначаються як

$$ЗП_{вод}^{осн} = \frac{N_{вод} \cdot (\Phi PЧ - 192) \cdot T_{вод}}{1000}, \quad (3.12)$$

де $N_{вод}$ – кількість водіїв, що працюють на маршруті, чол.;

$\Phi PЧ$ – річний фонд робочого часу одного водія, визначений згідно законодавства на 2025 р., $\Phi PЧ = 2000$ год;

192 – кількість годин для оплати відпустки одного водія (24 дні відпустки = 192 год), год;

$T_{вод}$ – годинна тарифна ставка водія, 150 грн./год.

Витрати на доплату з відпустки одного водія розраховуються за формулою

$$ЗП_{вод}^{відп} = \frac{N_{вод} \cdot 192 \cdot T_{вод}}{1000}, \quad (3.13)$$

де $D_{відн}$ – доплати водієві за час відпустки, грн./год.

Аналогічно розраховуються річні витрати на оплату праці 1 ремонтного робітника. Оплата відпустки без надбавок вже включена до формули

$$ЗП_{рем} = \frac{N_{рем} \cdot \PhiРЧ \cdot T_{рем}}{1000}, \quad (3.14)$$

де $T_{рем}$ – годинна тарифна ставка ремонтного працівника, 48 грн./год.

$$ЗП_{рем} = \frac{1 \cdot 2000 \cdot 48}{1000} = 96 \text{ тис. грн.}$$

Загальні річні виплати на 1 водія становитимуть

$$ЗП_{вод}^{осн} = \frac{1 \cdot (2000 - 192) \cdot 150}{1000} = 271,2 \text{ тис. грн.},$$

$$ЗП_{вод}^{відн} = \frac{1 \cdot 192 \cdot 150}{1000} = 28,8 \text{ тис. грн.}$$

Тоді загальні річні витрати на оплату праці водієві становитимуть

$$ЗП_{вод}^{річ} = 271,2 + 28,8 = 300 \text{ тис. грн.}$$

Надалі в роботі розглянуто інвестиційний проект з придбання 14 електробусів, із середньою чисельністю штату водіїв для цього 28 чол. Тому наступним кроком є моделювання ситуації з визначення прогнозних витрат на такий інвестиційний проект. Тривалість проекту пропонується взяти рівною 7 років.

3.3 Висновки по третьому розділу

Проведений розрахунок експлуатаційних витрат для електробусів е-АТАК на тролейбусному маршруті № 2 м. Харків, дозволив оцінити економічні параметри їх використання в умовах міських пасажирських перевезень.

У результаті розрахунків встановлено, що річний пробіг одного електробуса за умови 18-годинної роботи маршруту становить 102382 км, а загальний річний пробіг 14 електробусів – 1433355 км. При нормативній витраті електроенергії 73 кВт·год на 100 км та тарифі 4,32 грн./кВт·год витрати на електроенергію складають 3,15 грн./км, а річні витрати на електроенергію одного електробуса – 322,5 тис. грн.

Планові витрати на мастильні матеріали з урахуванням специфіки електричного приводу (використання лише пластичних мастил) становлять 0,041 грн./км, що відповідає 75,0 тис. грн. на рік на один електробус. Витрати на шини визначені на рівні 0,677 грн./км, з урахуванням нормативного ресурсу та коригувальних коефіцієнтів умов експлуатації.

Прогнозні витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електробуса е-АТАК становлять 0,416 грн./км, що відповідає 42,6 тис. грн. на рік для одного транспортного засобу.

Річні витрати на оплату праці одного водія складають 300 тис. грн., а при запланованій чисельності 26 водіїв фонд оплати праці є суттєвою, але прогнозованою складовою експлуатаційних витрат. Додатково визначено річні витрати на оплату праці ремонтного персоналу, які для одного працівника становлять 96 тис. грн.

Визначені статті експлуатаційних витрат формують базову частину грошових потоків проєкту та будуть використані як вихідні дані для розрахунку інвестиційного проєкту з придбання 13 електробусів. Тривалість інвестиційного проєкту прийнята 7 років, що відповідає нормативному строку ефективної експлуатації рухомого складу в умовах міських пасажирських перевезень.

4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОБУСІВ НА МІСЬКОМУ МАРШРУТІ

4.1 Інвестиційні витрати на реалізацію проєкту впровадження електробусів

Для формування фінансової моделі лізингового фінансування електробусів, що використовуються на міському пасажирському маршруті, було розроблено поквартальний графік лізингових платежів, який відображає поетапне виконання зобов'язань за договором лізингу протягом усього строку його дії. Розрахунки здійснено із застосуванням MS Excel з використанням вбудованих фінансових інструментів РРМТ та ІРМТ, що дозволяє детально розмежувати складові кожного періодичного платежу.

Функція РРМТ використана для визначення частини лізингового платежу, спрямованої на погашення основної суми заборгованості за предметом лізингу, тоді як функція ІРМТ застосована для розрахунку відсоткових витрат, величина яких залежить від залишку непогашеної вартості електробусів на відповідний розрахунковий період. Окрім цього, до складу кожного квартального платежу включено податок на додану вартість, який нараховується відповідно до чинного податкового законодавства та умов лізингової угоди. Вихідні параметри, використані для формування лізингового договору, наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Початкові параметри лізингової угоди

Показник	Значення
Ціна з ПДВ, грн.	34650000
ПДВ, %	20
Ціна без ПДВ, грн.	28875000
Авансовий платіж, %	30
Авансовий платіж, грн.	10395000
Лізингова сума, грн.	24255000
Відсоткова ставка (річних), %	15,00
Відсоткова ставка (за квартал), %	3,75
Кількість кварталів, од.	28
Залишкова вартість, грн.	0

Результати розрахунків узагальнено у табл. 4.2, де для кожного кварталу наведено величину платежу з погашення основної суми зобов'язань, суму відсоткових нарахувань, розмір ПДВ та загальний обсяг квартального лізингового платежу. Отримані дані використовуються на наступному етапі дослідження для формування грошових потоків інвестиційного проекту та проведення оцінки його економічної ефективності.

Але спочатку потрібно порахувати потенційні доходи від перевезення пасажирів електробусами. Це можна зробити якщо представити сценарій, коли вартість проїзду взяти рівною довоєнному періоду – 8 грн./пас. а кількість перевезених пасажирів порахувати наступним чином.

Годинний пасажиропотік відомий – 618 пас./год. Кількість оборотних рейсів за 1 годину теж – 0,571 рейс/год. Тоді середня кількість пасажирів на один оборотний рейс

$$Q_{\text{рейс}} = \frac{Q_{\text{год}}}{n_{\text{год}}}, \quad (4.1)$$

$$Q_{\text{рейс}} = \frac{618}{0,571} = 1082 \text{ пас./рейс.}$$

Добовий обсяг перевезень всіма електробусами

$$Q_{\text{доб}} = Q_{\text{рейс}} \cdot n_{\text{доб}}, \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{доб}} = 1082 \cdot 10,3 = 11150 \text{ пас./доб.}$$

Тоді річний обсяг перевезених пасажирів всіма електробусами

$$Q_{\text{рік}} = Q_{\text{доб}} \cdot 365, \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{рік}} = 11150 \cdot 365 = 4069750 \text{ пас.}$$

Виходячи із такого обсягу перевезення за рік та середнього тарифу на перевезення одного пасажера в табл. 4.3 розраховано потенційні доходи.

Таблиця 4.2 – Розподіл виплат за лізинговою угодою

Квартал	Виплата основного боргу, грн.	Виплата відсотків, грн.	Виплата ПДВ, грн.	Разом по лізингу, грн.
1	835878	909563	349088	2094529
2	867224	878217	349088	2094529
3	899744	845696	349088	2094529
4	933485	811956	349088	2094529
5	968491	776950	349088	2094529
6	1004809	740632	349088	2094529
7	1042489	702951	349088	2094529
8	1081583	663858	349088	2094529
9	1122142	623299	349088	2094529
10	1164222	581218	349088	2094529
11	1207881	537560	349088	2094529
12	1253176	492264	349088	2094529
13	1300170	445270	349088	2094529
14	1348927	396514	349088	2094529
15	1399511	345929	349088	2094529
16	1451993	293448	349088	2094529
17	1506443	238998	349088	2094529
18	1562934	182506	349088	2094529
19	1621545	123896	349088	2094529
20	1682352	63088	349088	2094529
Разом	24255000	15335741	7918148	47508889

На основі розрахунків проведених у попередніх розділах витрати на реалізацію проекту складуть

$$B_t = K_t + C_t + B_{et}^{авто} + \Pi_t, \quad (4.4)$$

де V_t – витрати на реалізацію проекту за розрахунковий період, грн.;

K_t – капітальні вкладення в закупівлю самоскида, грн.;

C_t – виплати по позиковому капіталу, грн.;

$V_{et}^{авто}$ – поточні витрати на організацію роботи на маршруту, грн.;

Π_t – податки і збори, грн.

Таблиця 4.3 – Планові доходи від перевезень по періодах

Рік	0				1	2	3	4	5	6
Квартал	1	2	3	4						
Обсяг перевезень, тис. пас	1014	1014	1014	1014	4058	4058	4058	4058	4058	4058
Дохід, тис. грн.	10144	10144	10144	10144	40576	40576	40576	40576	40576	40576

За перший квартал розрахунок

$$V_1 = 798531 + 63000 + 643576 + 338498 = 1843605 \text{ грн.}$$

Сукупний обсяг капіталовкладень у рухомий склад електричного типу при застосуванні лізингового фінансування формується з урахуванням авансового лізингового платежу, разових витрат на доставку та підготовку електробусів до експлуатації, а також загальної вартості об'єкта лізингу, сплаченої протягом строку дії договору, без урахування процентних платежів

$$K^{\text{л}} = K_{\text{ав}}^{\text{ліз}} + \sum_{t=1}^{16} V_{\text{обт}}, \quad (4.5)$$

де $K_{\text{ав}}^{\text{ліз}}$ – авансовий платіж, грн.;

$V_{\text{обт}}$ – сума основного боргу лізингоотримувача, $t = 1, \dots, 16$, грн.

Формула для авансового платіжу

$$K_{\text{ав}}^{\text{ліз}} = A_o \cdot (\Pi_d + \Pi_a) \cdot \Pi_0^{\text{ліз}}, \quad (4.6)$$

де $\Pi_0^{\text{ліз}}$ – відсоток авансового внеску, прийнято 30 %.

Розрахунок

$$K_{\text{ав}}^{\text{ліз}} = 2400000 \cdot 0,3 = 720000 \text{ грн.}$$

Тоді загальні капіталовкладення

$$K^{\text{л}} = 720000 + 1680000 = 2400000 \text{ грн.}$$

Для лізингового варіанта фінансування загальний обсяг основних податків і обов'язкових платежів, що сплачуються до бюджетів у процесі реалізації лізингової угоди, визначається як

$$\Pi_t^{\text{ліз}} = \text{ПДВ}_t + \text{ПП}_t^{\text{ліз}} + \Pi_{\text{ПДВ}t}^{\text{ліз}}, \quad (4.7)$$

де $\text{ПП}_t^{\text{ліз}}$ – податок з прибутку, грн.;

$\Pi_{\text{ПДВ}t}^{\text{ліз}}$ – витрати ПДВ, грн.

Для 1-го кварталу

$$\Pi_1^{\text{ліз}} = 127876 + 158692 + 28306 + 23623 = 338498 \text{ грн.}$$

Розмір виплат ПДВ у бюджет

$$\text{ПДВ}_t = D_t \cdot \Pi'_{\text{дв}} - \text{ПДВ}'_t. \quad (4.8)$$

За перший квартал

$$\text{ПДВ}_1 = 1207500 \cdot 0,17 - 73374 = 127876 \text{ грн.}$$

Величина податку на додану вартість для розрахункового періоду t встановлюється з урахуванням того, що частина ПДВ була сплачена раніше під час придбання матеріальних ресурсів та оплати послуг сторонніх організацій. У зв'язку з цим на початковому етапі визначається сума ПДВ', сплачена в процесі експлуатаційної діяльності, після чого розраховується залишкова величина податку, що підлягає врахуванню в інвестиційному проєкті

$$\text{ПДВ}'_t = (V_{\text{палт}} + V_{\text{змі}} + V_{\text{тог}} + V_{\text{шт}} + 0,3 \cdot V_{\text{згт}}) \cdot \Pi'_{\text{дв}}, \quad (4.9)$$

де 0,3 – обрана частка матеріальних цінностей і послуг сторонніх організацій у загальногосподарських витратах.

Для першого кварталу

$$\text{ПДВ}'_1 = (1048135 + 243900 + 138411 + 225267 + 0,3 \cdot 180286) \cdot 0,17 = 284966 \text{ грн.}$$

Податок з прибутку розрахувати за умови

$$\text{ПП}_t = \begin{cases} 0, & \text{при } \text{ЧП}_t \leq 0, \\ \frac{\text{ЧП}_t \cdot \Pi_{\text{п}}}{100}, & \text{при } \text{ЧП}_t > 0, \end{cases} \quad (4.10)$$

де $\Pi_{\text{п}}$ – ставка податку з прибутку, прийнято 18 %.

Для першого кварталу

$$\text{ПП}_1 = \frac{7828804 \cdot 18}{100} = 1409185 \text{ грн.}$$

Чистий прибуток по проєкту за період

$$\text{ЧП}_t = D_t - \text{ПДВ}'_t - C_t - \text{АВ}_t. \quad (4.11)$$

Для першого кварталу

Таблиця 4.5 – Витрати на реалізацію проекту

Рік	0				1	2	3	4	5	6	Разом
	1	2	3	4							
Капітальні вкладення, тис. грн.	11230878	867224	899744	933485	4747421	4747421	5500602	6373274	0	0	34650000
Виплати по позиковому капіталу, тис. грн.	909563	878217	845696	811956	2234341	2234341	1481161	608488	0	0	10653813
Сума ПДВ', тис. грн.	284966	284966	284966	284966	1139865	1139865	1139865	1139865	1139865	1139865	7979057
Величина виплат у бюджет ПДВ, тис. грн.	1405714	1405714	1405714	1405714	5622855	5622855	5622855	5622855	5622855	5622855	39359983
Чистий прибуток по проекту, тис. грн.	7828804	7860149	7892670	7926411	32719124	32719124	33472304	34344977	34953465	34953465	234020444
Величина податку з прибутку для періоду, тис. грн.	1409185	1414827	1420681	1426754	5889442	5889442	6025015	6182096	6291624	6291624	42123682
Податки з урахуванням податку при сплаті лізингу, тис. грн.	3592987	5344069	3255395	3261468	13228297	13228297	13363870	13520951	13630479	13630479	95939281
Витрати на реалізацію проекту, тис. грн.	19948425	11304508	9215833	9221906	37070051	37070051	37205624	37362705	30490470	30490470	259263038

4.2 Оцінювання ефективності інвестиційного проєкту

У таблиці 4.6 подано структурований розрахунок інвестиційного потоку, грошового потоку та їх приведених (дисконтованих) значень за кварталами та роками реалізації проєкту. На основі вихідних даних сформовано інвестиційні витрати (ІС), чистий грошовий потік (ГП), а також інвестиційний потік (ІП), який відображає комбінований рух коштів у кожному періоді.

Для оцінювання ефективності проєкту проведено дисконтування всіх грошових надходжень та витрат за ставкою 18 %, що дозволило визначити приведені інвестиційні потоки (ІП'), приведені грошові потоки (ГП') та приведені інвестиційні кошти (ІС').

Таблиця 4.6 – Розрахунок інвестиційного та грошового потоків проєкту (у фактичних та дисконтованих величинах)

Рік	0	1	2	3	4	5	6	Сума
Інвестиційний потік, ІП, тис. грн.	-9114	3623	3506	3370	3213	10086	10086	24771
Приведений інвестиційний потік, ІП', тис. грн.	-9114	3151	2651	2216	1837	5014	4360	10116
Приведений грошовий потік, ГП', тис. грн.	1850	3151	2651	2216	1837	5014	4360	21081
Приведені інвестиційні кошти, ІС', тис. грн.	10965	0	0	0	0	0	0	10965

Отримані показники використовуються для подальшого розрахунку інтегральних критеріїв ефективності інвестиційного проєкту: NPV, індекс рентабельності інвестицій (PI), внутрішня норма доходності (IRR), строк окупності ($T_{ок}$).

Для визначення строку окупності окремо подано інформацію у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Розрахунок періоду окупності

Період	Потік, грн.	Кумулятив, грн.
0	-9114353	-9114353
1	3150675	-5963678
2	2651243	-3312435
3	2216287	-1096147
4	1837395	741247
5	5014450	5755697
6	4360391	10116088

Проект окупується між 3 та 4 роком

$$T_{ок} = 3 + \frac{|-1096147|}{1837395} = 3,56 \text{ роки.}$$

Чиста теперішня вартість (NPV) дорівнює

$$NPV = 21080862 - 10964774 = 10116088 \text{ грн.}$$

Проект ефективний, оскільки $NPV > 0$.

Внутрішня норма дохідності (IRR) складе понад 40 % річних, що показує дуже високу прибутковість, сильно вище ніж 15 % річних.

Індекс дохідності (PI)

$$PI = \frac{21080862}{10964774} = 1,92.$$

Результат >1 , проєкт ефективний.

Проект закупівлі електробусу пропонованої марки e-АТАК, як альтернативи тролейбусам, для даного проєкту є економічно обґрунтованим і

вигідним.

Він має швидку окупність, високу норму прибутковості, значний позитивний NPV, стійкість до змін параметрів.

4.3 Висновки по четвертому розділу

Проведене оцінювання ефективності інвестиційного проєкту на основі розрахунку інвестиційних і грошових потоків з урахуванням дисконтування за ставкою 15 % підтвердило його економічну доцільність. Чиста теперішня вартість проєкту є додатною та становить 10116088 грн., що свідчить про перевищення приведених грошових надходжень над інвестиційними витратами. Індекс рентабельності інвестицій 1,92, що перевищує одиницю та підтверджує ефективність вкладення коштів, а внутрішня норма доходності IRR перевищує 40 %, значно перевищуючи прийнятну ставку дисконту. Розрахунок строку окупності показав, що проєкт окупується між 3 та 4 роком реалізації, що в поєднанні з високими показниками прибутковості дозволяє зробити висновок про економічну обґрунтованість і фінансову привабливість проєкту закупівлі електробусів як альтернативи тролейбусам.

ВИСНОВКИ

В роботі узагальнено сучасні підходи до оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту. Встановлено, що ключовими показниками такої ефективності є рівень завантаження транспортних засобів, відповідність пасажиромісткості фактичній пасажиронапруженості, інтервали руху, а також економічні й енергетичні показники експлуатації. Показано, що застосування методів транспортного моделювання є необхідною умовою для обґрунтованого прийняття рішень щодо організації роботи маршрутів міського громадського транспорту.

На основі матеріалів попереднього обстеження пасажиропотоків проаналізовано оцінку фактичного рівня використання рухомого складу на досліджуваному маршруті. Виявлено нерівномірність розподілу пасажиропотоків упродовж доби, а також нераціональне використання рухомого складу в години ранкового піку при існуючих інтервалах руху. Отримані результати свідчать про наявність резервів підвищення ефективності роботи маршруту за рахунок удосконалення організації руху та коригування параметрів перевезень. Зокрема, обґрунтовано доцільність зменшення інтервалу руху до 8 хвилин та розгляду використання транспортних засобів меншої пасажиромісткості.

У програмному середовищі PTV Visum виконано моделювання пасажиропотоків тролейбусного маршруту № 2 для базового та альтернативних сценаріїв організації руху. Моделювання дозволило кількісно оцінити вплив зміни інтервалів руху на величину пасажиропотоку, а отримані значення були використані для визначення необхідної кількості альтернативних транспортних засобів – електробусів марки e-АТАК пасажиромісткістю 47 осіб, з яких 21 місце призначене для сидіння та 25 – для стоячих пасажирів. Визначено, що для обслуговування маршруту в ранковий період пікового навантаження достатньо 13 одиниць електробусів.

Розроблено інвестиційний проєкт закупівлі електробусів, у межах якого

визначено обсяг капітальних вкладень, а також прогнозні експлуатаційні витрати на їх утримання та обслуговування. При формуванні витратної частини враховано специфіку експлуатації електричного рухомого складу, зокрема витрати на електроенергію та технічне обслуговування.

Виконано оцінку економічної ефективності інвестиційного проекту, яка засвідчила доцільність реалізації запропонованих заходів. Оцінювання здійснено на основі розрахунку інвестиційних і грошових потоків з урахуванням дисконтування за ставкою 15 %. Встановлено, що чиста теперішня вартість проекту є додатною та становить 10116088 грн., що свідчить про перевищення приведених грошових надходжень над інвестиційними витратами. Індекс рентабельності інвестицій дорівнює 1,92, що перевищує одиницю та підтверджує ефективність вкладення коштів, а внутрішня норма доходності IRR перевищує 40 %, істотно перевищуючи прийняту ставку дисконту. Розрахунок строку окупності показав, що проєкт окупається в проміжку між третім і четвертим роками реалізації, що в сукупності з високими показниками прибутковості дозволяє зробити висновок про економічну обґрунтованість і фінансову привабливість проєкту закупівлі електробусів як альтернативи тролейбусам.

Отримані результати свідчать про економічну доцільність переходу до використання електробусів на досліджуваному маршруті та можливість зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі за умови реалізації оптимістичного сценарію організації перевезень.

Загалом результати магістерської роботи підтверджують, що комплексне поєднання обстеження пасажиропотоків, транспортного моделювання та економічних розрахунків дозволяє обґрунтовано приймати управлінські рішення щодо удосконалення організації міських пасажирських перевезень і впровадження сучасного електричного рухомого складу в транспортну систему міста Харків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Основні показники економічного та соціального розвитку м. Харкова за 2023 рік : веб-сайт. URL: <https://www.city.kharkiv.ua/en/document/.html> (дата звернення: 25.09.2025).
2. Харківський тролейбус : вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення: 26.05.2024).
3. My maps : веб-сайт. URL: <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer> (дата звернення: 30.09.2025).
4. Про міський електричний транспорт : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text> (дата звернення: 30.09.2025).
5. Цимбал С. В., Тодорашко Г. Ю. Класифікація маршрутів міських пасажирських перевезень. Матеріали XLV Науково-технічної конференції ВНТУ, м. Вінниця, 23-24 березня 2016 р. Вінниця, 2016. 4 с.
6. Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень : ДБН 360-92. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_360_92_ua/1-1-0-116 (дата звернення: 14.11.2025).
7. Правила розміщення та обладнання зупинок міського електро- та автомобільного транспорту. Дата оновлення: 14.11.2025. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0160-95#Text> (дата звернення: 14.11.2025).
8. PTV Visum 2024 Manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2023. 2827 р.
9. CUBE – Multimodal Transportation and Land-Use Modeling Software: Bentley Systems Inc. website. URL: <https://www.bentley.com/software/cube/> (дата звернення: 21.11.2025).
10. MATSim : MATSim Community & MATSim Association website. URL: <https://www.matsim.org/about-matsim/> (дата звернення: 21.11.2025).
11. Lopez P.A., Behrisch M., Bieker-Walz L., Erdmann J., Flötteröd Y.-P., Hilbrich R., Lücken L., Rummel J., Wagner P., Wießner E. Microscopic Traffic Simulation using SUMO. Intelligent Transportation Systems Conference: ITSC conf. pa-

pers, Maui. Maui: IEEE, 2018. P. 2575–2582.

12. Aimsun Next Overview: Aimsun SLU website. URL: <https://www.aimsun.com/aimsun-next-overview/> (дата звернення: 21.11.2025).

13. EMMЕ Multimodal Transport Planning Software. Bentley Systems website. URL: <https://www.bentley.com/software/emme/> (дата звернення: 21.11.2025).

14. TransCAD Transportation Planning Software. Caliper Corporation website. URL: <https://www.caliper.com/tcovu.htm> (дата звернення: 21.11.2025).

15. Біліченко В. В., Цимбал С. В., Цимбал О. В. Аналіз методів визначення кількості та пасажиромісткості рухомого складу на міських маршрутах пасажирських перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вип. № 2 (12), Вінниця, 2020. С. 11-18.

16. Про затвердження Правил надання населенню послуг з перевезень міським електротранспортом : Постанова КМУ від 23 грудня 2004 р. N 1735. Дата оновлення: 14.10.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1735-2004-%D0%BF#Text> (дата звернення: 14.10.2025).

17. Cokuyasar T., Stinson M., Sahin O. Prabhakar N., Karbowski D. Comparing Regional Energy Consumption for Direct Drone and Truck Deliveries. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2023. Vol. 2677, Issue 2. P. 310-327.

Додаток А
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Факультет транспортних систем

Кафедра транспортних систем і логістики

**ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
магістра**

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ВИКОРИСТАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ НА
ТРОЛЕЙБУСНОМУ МАРШРУТІ № 2 У МІСТІ ХАРКІВ**

Завідувач кафедри канд. техн. наук, доцент.

Євген ЛЮБИЙ

Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент

Олександр КОЛІЙ

Керівник, канд. техн. наук, доцент

Ольга СВІЧИНСЬКА

Здобувач гр. ТС-61-24

Данило КРАЙНЮК

Харків – 2025

ЗМІСТ

1. Титульний
2. Мета роботи та завдання
3. Характеристика досліджуваного маршруту
4. Результати наявності дублюючих маршрутів та результати обстеження
5. Результати розрахованих ТЕП по напрямках та в різні години доби
6. Переваги та недоліки програмних продуктів транспортного моделювання
7. Методика дослідження та моделювання роботи тролейбусного маршруту
8. Епюра змодельованого пасажиропотоку для ранкової години пік та обґрунтування потрібної кількості транспортних засобів
9. Характеристика пропонованого електробусу
10. Поточні витрати по проекту та планові доходи від перевезень
11. Початкові параметри лізингової угоди
12. Витрати на реалізацію проекту
13. Розрахунок ефективності проекту
14. Висновки

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Факультет транспортних систем
Кафедра транспортних систем і логістики

1

Кваліфікаційна робота магістра

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ВИКОРИСТАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ НА ТРОЛЕЙБУСНОМУ МАРШРУТІ № 2 У МІСТІ ХАРКІВ

Виконав здобувач гр. ТС-61-24
Данило КРАЙНІЮК



Мета роботи та завдання

Мета – підвищення рівня використання рухомого складу тролейбусного маршруту № 2 у місті Харків на основі удосконалення організації руху та обґрунтування доцільності впровадження електробусів із застосуванням моделювання пасажиропотоків.

Завдання дослідження:

- проаналізувати підходи до оцінки ефективності використання рухомого складу міського електротранспорту;
- оцінити рівень використання рухомого складу на досліджуваному маршруті на основі матеріалів обстеження пасажиропотоків;
- виконати моделювання пасажиропотоків тролейбусного маршруту № 2 у програмному середовищі PTV Visum для оцінки впливу запропонованих організаційних змін на роботу маршруту;
- обґрунтувати можливість використання електробусів;
- визначити необхідну кількість рухомого складу із застосуванням існуючої методики розрахунку;
- розробити інвестиційний проект закупівлі електробусів для обслуговування, визначивши обсяг капітальних вкладень та експлуатаційних витрат.
- оцінити економічну ефективність інвестиційного проекту

2





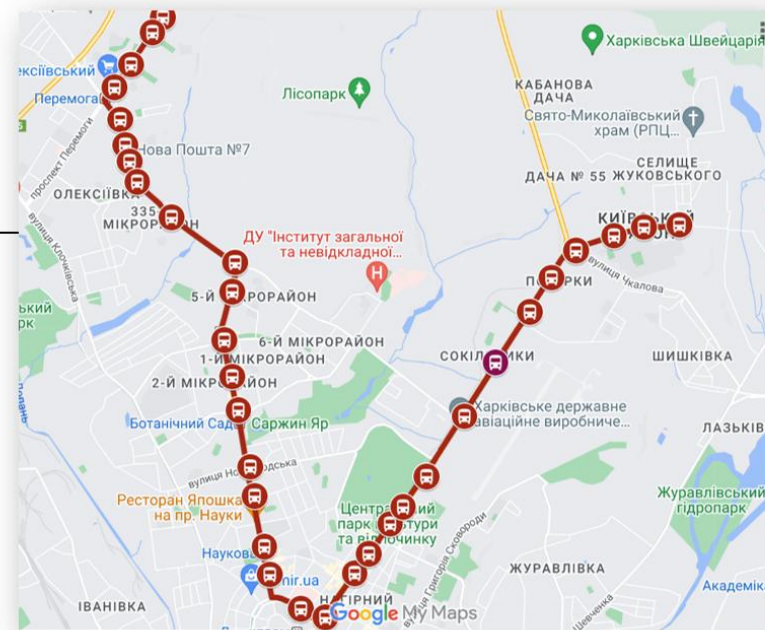
Показник	Модель тролейбусу		
	Богдан Т701	ЛАЗ Е183	ЛАЗ Е 301
Довжина, мм	11 960	12000	18750
Ширина, мм	2 550	2550	2550
Повна маса, т	19	18	17,7
Макс. швидкість, км/год	65	55	75
Місць для сидіння	34	30	56
Повна місткість, чол./ 1 кв.м.	105	100	210
Автономний режим	так	ні	так
Безпечні	так	ні	так
Увігномонішці	102	100	310

Станції метро поруч:

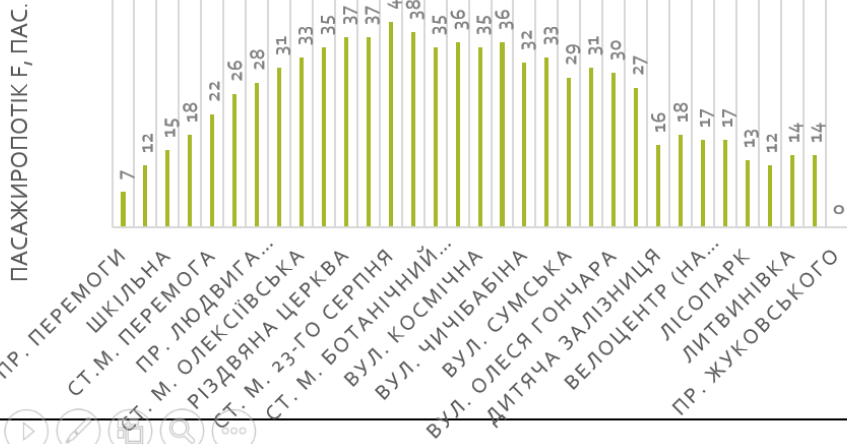
Університет, Держпром, Наукова, Ботанічний сад, 23 Серпня, Олексіївська, Перемога.

Вартість проїзду станом грудень 2025 - 0.00 грн
 Тривалість оборотного рейсу 105 хв.
 Довжина оборотного рейсу 28, 05 км
 Середня експлуатаційна швидкість - 16 км/год.
 Маршрут обслуговує КП «Тролейбусне депо №3»

ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНОВОГО МАРШРУТУ



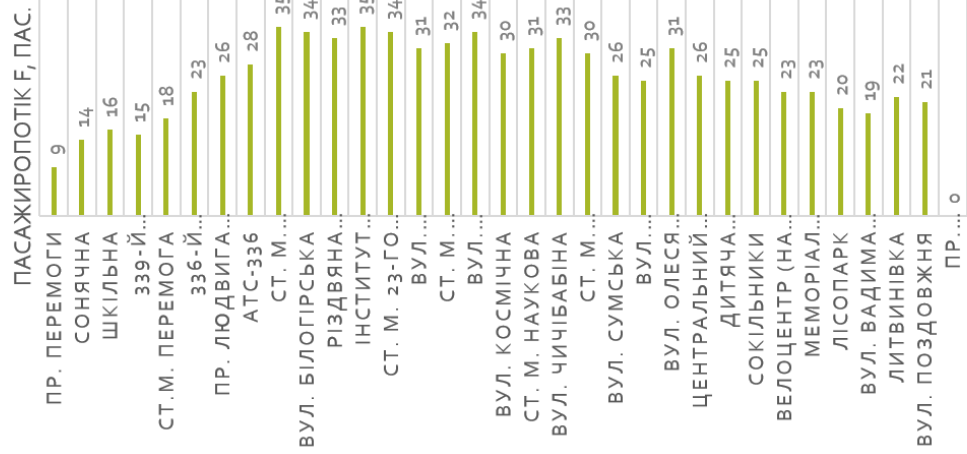
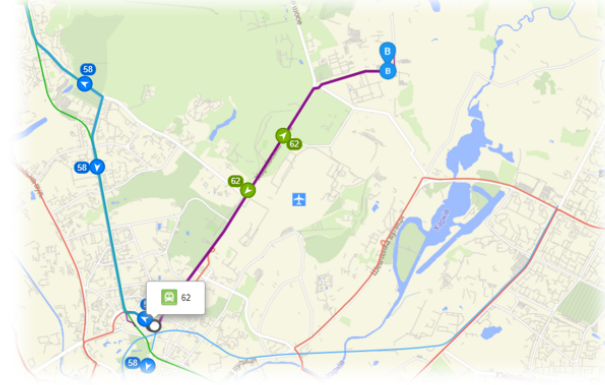
Результати наявності дублюючих маршрутів та результати обстеження



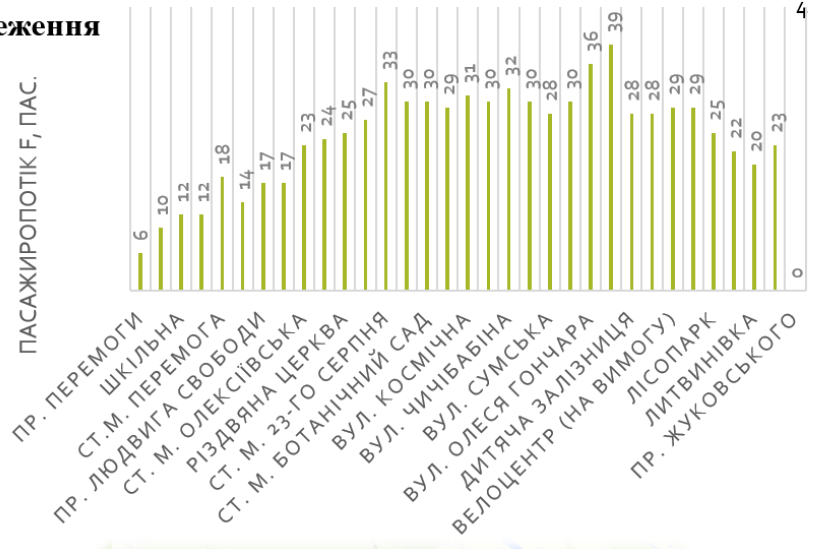
Дублюючі:

автобусний маршрут № 62

тролейбусний маршрут № 58



ПАСАЖИРОПОТІК F, ПАС.



Результати розрахованих ТЕП по напрямках та в різні години доби

- Фактична транспортна робота 259 – 437 пас. км.
- Можлива транспортна робота 1593 пас. км
- Динамічний коефіцієнт використання пасажиромісткості 0,16 – 0,27.
- Середня відстань поїздки пасажирів варіюється в діапазоні 1,6 – 3,5 км.

Напрямок	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній
Місткість тролейбусу	105	105	105	105	105	105
Обсяг перевезення, ВСЬОГО	141	137	136	146	140	137
пільгових	43	33	37	33	39	39
школярів	31	34	31	29	31	31
Коеф. змінюваності	4,03	4,28	3,49	3,56	3,5	3,5
Факт. тр-тна робота	405	314	394	420	397	397
Можл. тр-тна робота	1593	1593	1593	1593	1593	1593
Динам. коеф. використ. місткості	0,25	0,2	0,25	0,26	0,25	0,25
Коеф. нерівномір. пас-потуку	1,4	1,61	1,64	1,59	1,6	1,6
Сер. відстань поїздки пас-ра	2,872	2,292	2,897	2,877	2,836	2,90

Напрямок	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній
Місткість тролейбусу	105	105	105	105	105	105
Обсяг перевезення, ВСЬОГО	145	158	142	142	142	155
пільгових	39	24	38	20	43	29
школярів	23	38	32	31	29	29
Коеф. змінюваності	4,03	6,87	3,94	5,46	4,06	3,37
Факт. тр-тна робота	376	259	437	271	388	542
Можл. тр-тна робота	1593	1593	1593	1593	1593	1593
Динам. коеф. використ. місткості	0,24	0,16	0,27	0,17	0,24	0,34
Коеф. нерівномір. пас-потуку	1,45	1,34	1,33	1,47	1,45	1,34
Сер. відстань поїздки пас-ра	2,593	1,639	3,077	1,908	2,732	3,50

Напрямок	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній	Середні
Місткість тролейбусу	105	105	105	105	105	105	105
Обсяг перевезення, ВСЬОГО	117	121	146	152	142	134	141
пільгових	32	32	41	26	31	22	33
школярів	29	29	41	31	21	24	30
Коеф. змінюваності	3,77	3,77	5,84	5,84	4,18	4,18	4
Факт. тр-тна робота	290	283	308	303	386	380	364
Можл. тр-тна робота	1593	1593	1593	1593	1593	1593	1593
Динам. коеф. використ. місткості	0,18	0,18	0,19	0,19	0,24	0,24	0,23
Коеф. нерівномір. пас-потуку	1,73	1,73	1,29	1,29	1,42	1,42	1,48
Сер. відстань поїздки пас-ра	2,479	2,339	2,110	1,993	2,718	2,836	2,59

Переваги та недоліки програмних продуктів транспортного моделювання

Програмний продукт	Переваги	Недоліки
CUBE	Потужний інструмент макромоделювання; підтримка великих транспортних мереж; гнучка структура сценаріїв	Висока вартість; складність налаштування; потребує значного обсягу вихідних даних
TransCAD	Поєднання ГІС і транспортного аналізу; зручний для просторових досліджень; підтримка моделей попиту	Обмежені можливості мікромоделювання; складні налаштування для великих мереж
EMME	Орієнтація на стратегічне планування; ефективне моделювання попиту та потоків; стабільність	Відсутність мікромоделювання; обмежена візуалізація
PTV Visum	Комплексне моделювання; зручний інтерфейс; широкі можливості сценарного аналізу, студентська версія	Висока вартість ліцензії; потребує підготовки користувача
VISSIM	Детальне мікромоделювання; висока точність відтворення руху; візуалізація, наявність студентської версії	Високі вимоги до даних; значні обчислювальні ресурси; не придатний для стратегічних оцінок
RTA	Підходить для аналізу громадського транспорту; відносна простота	Обмежена масштабованість; слабка підтримка сценарного аналізу
McTrans	Модульний підхід; можливість комбінування моделей	Вузька спеціалізація; складність інтеграції
TRANZI	Простота реалізації; низькі вимоги до ресурсів	Обмежені можливості; відсутність сучасних модулів

6



МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРОЛЕЙБУСНОГО МАРШРУТУ

- 1.Формування теоретико-методичної бази дослідження
- 2.Збір вихідної інформації та обстеження пасажиропотоків
- 3.Обробка результатів обстеження та аналіз фактичної роботи маршруту
- 4.Моделювання роботи маршруту у середовищі PTV Visum
- 5.Визначення потреби у рухомому складі
- 6.Обґрунтування вибору типу рухомого складу, а саме аналіз можливості використання електробусів на досліджуваному маршруті
- 7.Розрахунок експлуатаційних та поточних витрат
- 8.Розробка інвестиційного проєкту
- 9.Оцінка економічної ефективності проєкту
- 10.Формування висновків і практичних рекомендацій



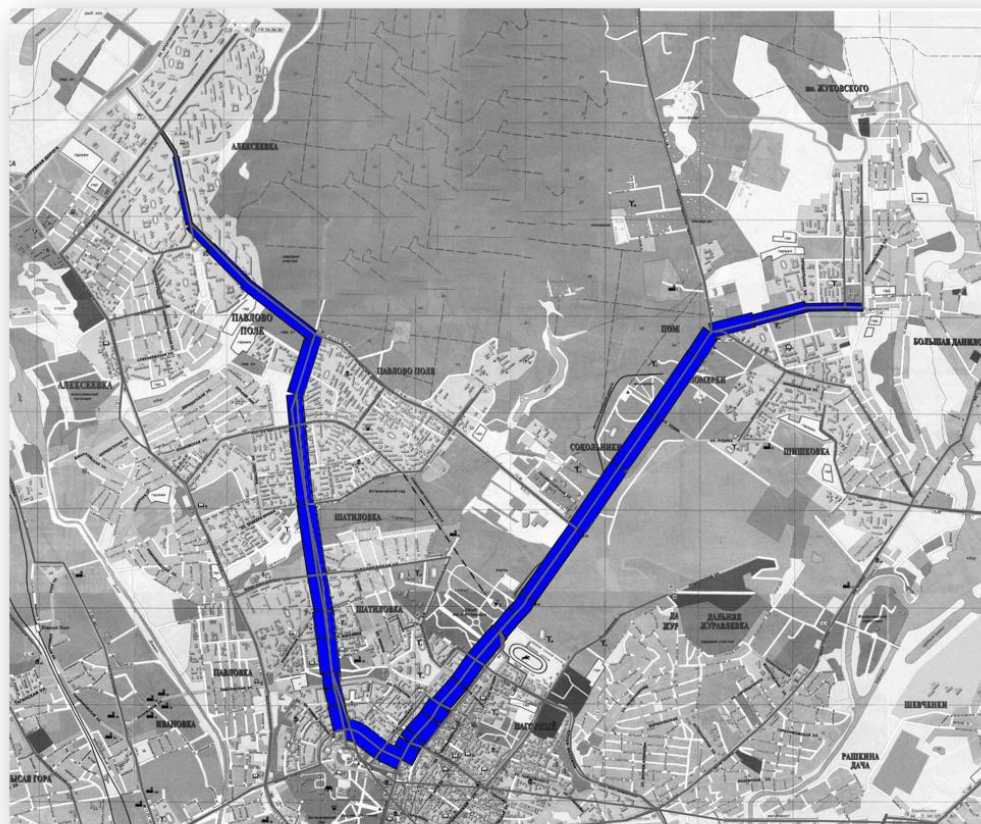
Епюра змодельованого пасажиропотоку для ранкової години пік та обґрунтування потрібної кількості транспортних засобів

- ❑ обсяг пасажирів в ранковий пік: 1544 пас.
- ❑ пасажиропотік в одному напрямку 618 пас./год

Рекомендована місткість транспортних засобів залежно від годинного пасажиропотоку

Годинний пасажиропотік, пас./год	Рекомендована місткість транспортного засобу, пас.
200 – 1000	до 40
1000 – 1800	до 65
1800 – 2600	до 80
2600 – 3800	до 100
понад 3800	до 160

$$N = \frac{T_{об}}{t} \quad N = \frac{105}{8} = 13 \text{ од.}$$

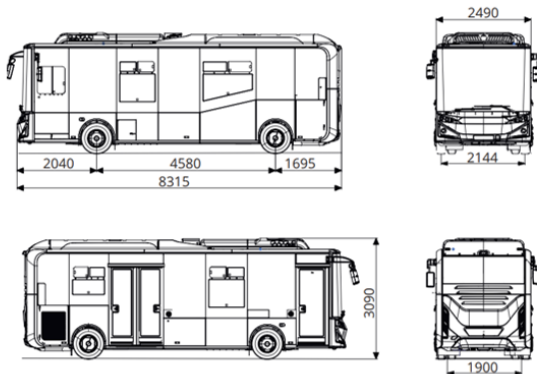


Характеристика пропонованого електробусу



Електробус e-ATAK – основні характеристики

- Категорія МЗ, клас І – призначений для міських маршрутів
- Низькопідлогова конструкція – зручна посадка, доступність для МН
- Пасажиромісткість – 47 осіб
 - 21 сидяче місце
 - 25 стоячих
 - 1 місце для інвалідного візка
- Літій-іонна батарея 220 кВт·год
- Запас ходу до 300 км без проміжної зарядки
- Відповідає вимогам міських пасажирських перевезень в Україні



Розрахунок експлуатаційних витрат на 1 електробус

- Річний пробіг: 102 382 км
- Витрати на електроенергію:
 - питомі – 3,15 грн/км
 - річні – 322,5 тис. грн
- Мастильні матеріали (пластичні мастила):
 - 0,041 грн/км
 - 75,0 тис. грн/рік
- Автомобільні шини:
 - 0,677 грн/км
 - 901068 грн/рік
- Технічне обслуговування та поточний ремонт:
 - 0,416 грн/км
 - 42,6 тис. грн/рік
- Оплата праці водія:
 - 300 тис. грн/рік
- Оплата праці ремонтного персоналу:
 - 96 тис. грн/рік на одного працівника



Поточні витрати по проекту та планові доходи від перевезень

Рік	0	1	2	3	4	5	6	7
Заробітна плата водіїв, тис. грн.	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800
Єдиний соціальний внесок з заробітної плати водіїв, тис. грн.	1716	1716	1716	1716	1716	1716	1716	1716
Витрати на електроенергію, тис. грн.	4193	4193	4193	4193	4193	4193	4193	4193
Витрати на мастильні матеріали, тис. грн.	976	976	976	976	976	976	976	976
Витрати на технічне обслуговування і ремонт автомобілів, тис. грн.	554	554	554	554	554	554	554	554
Витрати на автомобільні шини, тис. грн.	901	901	901	901	901	901	901	901
Загальногосподарські витрати, тис. грн.	721	721	721	721	721	721	721	721
Сума поточних експлуатаційних витрат, тис. грн.	16860	16860	16860	16860	16860	16860	16860	16860

Рік	0				1	2	3	4	5	6
Квартал	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
Обсяг перевезень, тис. пас	1014	1014	1014	1014	4058	4058	4058	4058	4058	4058
Дохід, тис. грн.	10144	10144	10144	10144	40576	40576	40576	40576	40576	40576



Початкові параметри лізингової угоди

Показник	Значення
Ціна з ПДВ, грн.	34650000
ПДВ, %	20
Ціна без ПДВ, грн.	28875000
Авансовий платіж, %	30
Авансовий платіж, грн.	10395000
Лізингова сума, грн.	24255000
Відсоткова ставка (річних), %	15,00
Відсоткова ставка (за квартал), %	3,75
Кількість кварталів, од.	28
Залишкова вартість, грн.	0



Квартал	Виплата основного боргу, грн.	Виплата відсотків, грн.	Виплата ПДВ, грн.	Разом по лізингу, грн.
1	835878	909563	349088	2094529
2	867224	878217	349088	2094529
3	899744	845696	349088	2094529
4	933485	811956	349088	2094529
5	968491	776950	349088	2094529
6	1004809	740632	349088	2094529
7	1042489	702951	349088	2094529
8	1081583	663858	349088	2094529
9	1122142	623299	349088	2094529
10	1164222	581218	349088	2094529
11	1207881	537560	349088	2094529
12	1253176	492264	349088	2094529
13	1300170	445270	349088	2094529
14	1348927	396514	349088	2094529
15	1399511	345929	349088	2094529
16	1451993	293448	349088	2094529
17	1506443	238998	349088	2094529
18	1562934	182506	349088	2094529
19	1621545	123896	349088	2094529
20	1682352	63088	349088	2094529
Разом	24255000	15335741	7918148	47508889



Витрати на реалізацію проекту

Рік	0				1	2	3	4	5	6	Разом
	1	2	3	4							
Квартал											
Капітальні вкладення, тис. грн.	11230878	867224	899744	933485	4747421	4747421	5500602	6373274	0	0	34650000
Виплати по позиковому капіталу, тис. грн.	909563	878217	845696	811956	2234341	2234341	1481161	608488	0	0	10653813
Сума ПДВ ¹ , тис. грн.	284966	284966	284966	284966	1139865	1139865	1139865	1139865	1139865	1139865	7979057
Величина виплат у бюджет ПДВ, тис. грн.	1405714	1405714	1405714	1405714	5622855	5622855	5622855	5622855	5622855	5622855	39359983
Чистий прибуток по проекту, тис. грн.	7828804	7860149	7892670	7926411	32719124	32719124	33472304	34344977	34953465	34953465	234020444
Величина податку з прибутку для періоду, тис. грн.	1409185	1414827	1420681	1426754	5889442	5889442	6025015	6182096	6291624	6291624	42123682
Податки з урахуванням податку при сплаті лізингу, тис. грн.	3592987	5344069	3255395	3261468	13228297	13228297	13363870	13520951	13630479	13630479	95939281
Витрати на реалізацію проекту, тис. грн.	19948425	11304508	9215833	9221906	37070051	37070051	37205624	37362705	30490470	30490470	259263038



РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТУ

Рік	0	1	2	3	4	5	6	Сума
Інвестиційний потік, ІП, грн.	-9114353	3623277	3506269	3370696	3213615	10085850	10085850	24771202
Приведений інвестиційний потік, ІП', грн.	-9114353	3150675	2651243	2216287	1837395	5014450	4360391	10116088
Приведений грошовий потік, ГП', грн.	1850420	3150675	2651243	2216287	1837395	5014450	4360391	21080862
Приведені інвестиційні кошти, ІС', грн.	10964774	0	0	0	0	0	0	10964774

Період	Потік, грн.	Кумулятив, грн.
0	-9114353	-9114353
1	3150675	-5963678
2	2651243	-3312435
3	2216287	-1096147
4	1837395	741247
5	5014450	5755697
6	4360391	10116088

$$NPV = 21080862 - 10964774 = 10116088 \text{ грн}$$

$$T_{ок} = 3 + \frac{-1096147}{1837395} = 3,56 \text{ роки}$$

$$PI = \frac{21080862}{10964774} = 1,92$$

13



ВИСНОВКИ

На основі матеріалів попереднього обстеження пасажиропотоків проаналізовано оцінку фактичного рівня використання рухомого складу на досліджуваному маршруті. Виявлено нерівномірність розподілу пасажиропотоків упродовж доби, а також нераціональне використання рухомого складу в години ранкового піку при існуючих інтервалах руху. Отримані результати свідчать про наявність резервів підвищення ефективності роботи маршруту за рахунок удосконалення організації руху та коригування параметрів перевезень. Зокрема, обґрунтовано доцільність зменшення інтервалу руху до 8 хвилин та розгляду використання транспортних засобів меншої пасажиромісткості.

У програмному середовищі PTV Visum виконано моделювання пасажиропотоків тролейбусного маршруту № 2 для базового та альтернативних сценаріїв організації руху. Моделювання дозволило кількісно оцінити вплив зміни інтервалів руху на величину пасажиропотоку, а отримані значення були використані для визначення необхідної кількості альтернативних транспортних засобів – електробусів марки e-АТАК пасажиромісткістю 47 осіб, з яких 21 місце призначене для сидіння та 25 – для стоячих пасажирів. Визначено, що для обслуговування маршруту в ранковий період пікового навантаження достатньо 13 одиниць електробусів.

Розроблено інвестиційний проєкт закупівлі електробусів, у межах якого визначено обсяг капітальних вкладень, а також прогностичні експлуатаційні витрати на їх утримання та обслуговування. При формуванні витратної частини враховано специфіку експлуатації електричного рухомого складу, зокрема витрати на електроенергію та технічне обслуговування.

