

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра транспортних систем і логістики

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему Підвищення ефективності перевезень шляхом
оптимізації заповнюваності транспортних засобів
громадського транспорту

Виконав: студент 2 курсу, групи

Мн РозТранс 2024-1

спеціальності 275 Транспортні технології
(за видами)

освітньо-наукової програми

«Розумний транспорт і логістика для міст»

Крюков Д. Я.

Керівник Понкратов Д. П.

Рецензент Давідіч Ю. О.

Харків – 2026 року

**Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова**

Факультет Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Транспортних систем і логістики

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології (за видами)
(шифр і назва)

Освітньо-наукова програма «Розумний транспорт і логістика для міст»
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____

к.т.н., доц. Куш Є. І.

“ ” _____ 2026 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Крюкову Дмитру Ярославовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Підвищення ефективності перевезень шляхом оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту

керівник роботи Понкратов Денис Павлович, д.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “27” 02.26 року № 184-03

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 20.05.26

3. Вихідні дані до роботи Параметри функціонування маршрутів громадського транспорту

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів підвищення ефективності перевезень на громадському транспорті 2. Розробка моделі оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту 3. Оптимізація заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Графіки зміни параметрів перевізного процесу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Перевірка роботи на наявність ознак академічного плагіату	інженер каф. ТСЛ Толмачов І. О.		

7. Дата видачі завдання 27.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз методів підвищення ефективності перевезень на громадському транспорті	27.02.26 – 19.03.26	
2	Розробка моделі оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту	20.03.26 – 3.04.26	
3	Оптимізація заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах	24.04.26 – 20.05.26	

Студент

(підпис)

Крюков Д. Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Понкратов Д. П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з 70 сторінок машинописного тексту, містить 14 ілюстрацій, 3 таблиці, 22 літературних джерела.

Об'єкт дослідження: процес організації перевезень пасажирів на міських автобусних маршрутах.

Мета роботи - підвищення ефективності перевезень на міських автобусних маршрутах шляхом оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту.

Методи дослідження: системного аналізу, транспортного моделювання, математичного моделювання, економічного аналізу та методи оптимізації параметрів перевізного процесу.

Отримані результати. Обґрунтовано використання інтегрального критерію оптимізації заповнюваності транспортних засобів, який базується на мінімізації сумарних витрат перевізника та пасажирів і дозволяє комплексно враховувати економічні та соціальні аспекти організації перевезень. На основі запропонованої методики виконано модельний розрахунок для автобусного маршруту № 9 «с. Муроване – Автовокзал» у м. Львів. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого модельного підходу для оптимізації параметрів роботи міських автобусних маршрутів.

Рекомендації з впровадження: запропонована методика може бути використана транспортними підприємствами та органами місцевого самоврядування для обґрунтування раціональної кількості транспортних засобів на маршрутах, підвищення ефективності використання рухомого складу та покращення якості транспортного обслуговування населення.

ОПТИМІЗАЦІЯ, РІВЕНЬ ЗАПОВНЕННЯ АВТОБУСУ, ГРОМАДСЬКИЙ
ТРАНСПОРТ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ГРОМАДСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ.....	9
1.1 Значення громадського транспорту для функціонування сучасних міст та перспективи його розвитку.....	9
1.2 Проблемні аспекти забезпечення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту.....	16
1.3 Роль заповнюваності транспортних засобів у забезпеченні ефективності роботи системи перевезень.....	20
1.4 Основні методи оцінювання та оптимізації заповнюваності транспортних засобів.....	24
1.5 Висновки по розділу.....	38
Розділ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАПОВНЮВАНOSTІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ.....	40
2.1 Вибір критерію оптимізації.....	40
2.2 Витрати перевізника.....	41
2.3 Витрати пасажирів.....	42
2.4 Цільова функція оптимізації.....	45
2.5 Висновки по розділу.....	46
Розділ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАПОВНЮВАНOSTІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ.....	47
3.1 Методика оптимізації заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах.....	47
3.2 Формування вихідних даних.....	50
3.3 Проведення модельного розрахунку.....	53

ННІ ЕІП ТСЛМн РозТранс 2024-1 РозТранс XXX...X ПЗ					Літера			Аркуш	Аркушів
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	м	р	д	4	70
Розроб.		Крюков Д.Я.			Пояснювальна записка				
Перевір.		Пократов Д. П.							
Н. контр.		Бурко Д. Л.							
Затв.		Куш Є. І.							
					ХНУМГ				

3.4 Інтерпретація результатів модельного розрахунку..... 58

3.5 Висновки по розділу..... 62

ВИСНОВКИ..... 64

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 68

					Архив
					5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

ВСТУП

Сучасний розвиток міст супроводжується постійним зростанням потреб населення у мобільності, що призводить до збільшення навантаження на транспортні системи. Умови урбанізації, зростання рівня автомобілізації та нерівномірність розподілу пасажиропотоків створюють значні проблеми у сфері організації міських пасажирських перевезень. До основних із них належать перевантаження транспортної мережі, збільшення часу пересування, зниження рівня комфортності перевезень, погіршення екологічної ситуації та зростання експлуатаційних витрат транспортних підприємств. У таких умовах особливого значення набуває забезпечення ефективного функціонування системи громадського транспорту як основного елементу сталої міської мобільності.

Одним із важливих напрямів підвищення ефективності роботи міського громадського транспорту є оптимізація заповнюваності транспортних засобів. Рівень заповнення автобусів безпосередньо впливає як на економічні показники роботи перевізника, так і на якість транспортного обслуговування пасажирів. Недостатня заповнюваність транспортних засобів призводить до неефективного використання рухомого складу та збільшення витрат перевізника, тоді як надмірне переповнення салонів автобусів погіршує комфортність перевезень, збільшує час посадки та висадки пасажирів і знижує привабливість громадського транспорту для населення.

Рациональна організація перевезень повинна забезпечувати баланс між економічною ефективністю функціонування транспортного підприємства та потребами пасажирів у якісному транспортному обслуговуванні. Це зумовлює необхідність використання сучасних методів моделювання та оптимізації параметрів перевізного процесу, які дозволяють визначати раціональну кількість транспортних засобів на маршрутах, оптимальні інтервали руху та допустимий рівень заповнення салонів автобусів.

Актуальність теми роботи полягає у необхідності підвищення ефективності функціонування системи міських пасажирських перевезень шляхом удосконалення параметрів організації роботи автобусних маршрутів та забезпечення раціонального рівня заповнюваності транспортних засобів. Використання модельного підходу до оптимізації параметрів перевізного процесу дозволяє врахувати як економічні інтереси перевізника, так і соціальні аспекти транспортного обслуговування населення.

Метою роботи є підвищення ефективності перевезень на міських автобусних маршрутах шляхом оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану та проблем функціонування міського громадського транспорту;
- дослідити вплив рівня заповнюваності транспортних засобів на ефективність перевізного процесу;
- обґрунтувати критерій оптимізації заповнюваності транспортних засобів;
- розробити методику оптимізації параметрів організації перевезень;
- виконати модельний розрахунок для визначення раціональної кількості автобусів на маршруті;
- провести оцінювання ефективності запропонованих заходів.

Об'єктом дослідження є процес організації перевезень пасажирів на міських автобусних маршрутах.

Предметом дослідження є закономірності зміни ефективності перевезень залежно від рівня заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту.

У роботі використано методи системного аналізу, транспортного моделювання, математичного моделювання, економічного аналізу та методи оптимізації параметрів перевізного процесу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованої методики для визначення раціональної кількості транспортних засобів на міських автобусних маршрутах, підвищення якості транспортного обслуговування населення та зниження собівартості перевезень.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ГРОМАДСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

1.1 Значення громадського транспорту для функціонування сучасних міст та перспективи його розвитку

Стрімке зростання міського населення та процеси урбанізації створюють значне навантаження на транспортну інфраструктуру [1 - 5]. Приватний автомобіль забезпечує мобільність, комфорт, індивідуальність поїздки та символізує соціальний статус. Водночас високий рівень автомобілізації формує залежність міста від дорожньої інфраструктури, сприяє розростанню передмість та підвищує потребу у великих площах для доріг і паркування [2, 5].

До негативних наслідків надмірної автомобілізації слід віднести збільшення довжини та часу пересувань через просторове розростання міст. Розселення населення на периферії та концентрація робочих місць у центрі створюють тривалі маятникові переміщення. Іншою проблемою є дорожньо-транспортні пригоди. Щодня у світі внаслідок аварій гинуть тисячі людей, а економічні втрати сягають сотень мільярдів доларів щороку [5].

Не менш важливим наслідком великого рівня автомобілізації є затори. Великі міста світу щорічно втрачають сотні годин часу на простоювання у заторах. Це призводить до економічних збитків, зниження продуктивності праці та погіршення психологічного стану мешканців. Глобальні витрати від заторів оцінюються у трильйони доларів щороку [5].

Транспортний сектор є одним із головних джерел забруднення повітря та викидів парникових газів. Автомобілі спричиняють високі концентрації оксидів азоту та інших шкідливих речовин, що негативно впливають на здоров'я населення. Крім того, транспорт є третім за масштабами джерелом

енергетичних викидів CO₂ у світі, а дорожній транспорт формує понад три чверті цих викидів. Саме тому декарбонізація транспорту розглядається як одна з ключових умов боротьби зі зміною клімату [5]. За таких умов використання приватних автомобілів уже не може повністю задовольнити потреби міст, оскільки спричиняє затори, нестачу паркувальних місць, шумове та екологічне забруднення. Саме тому громадський транспорт розглядається як основний засіб забезпечення ефективної міської мобільності [1].

Громадський транспорт забезпечує доступність пересування для всіх категорій населення, зокрема для людей, які не мають власного автомобіля, студентів, пенсіонерів та осіб з обмеженими можливостями. Таким чином транспорт сприяє соціальній рівності та підвищує якість життя мешканців міста [1].

Автобуси, метрополітен, легкорейковий транспорт та інші системи формують основу сталої мобільності у містах. При цьому, автобуси залишаються найпоширенішим видом громадського транспорту у світі завдяки відносно низькій вартості та гнучкості маршрутів [5].

Громадський транспорт має важливе соціально-економічне значення, що полягає у здатності швидко задовольняти значні обсяги транспортного попиту, забезпечувати своєчасне прибуття людей на роботу, навчання та до інших об'єктів транспортного тяжіння. Це позитивно впливає на продуктивність праці та загальний розвиток міської економіки. Крім того, громадський транспорт значно раціональніше використовує міський простір, ніж приватні автомобілі, які більшу частину часу простоюють на парковках [1].

Комфорт, безпека, зручні пересадки та доступна вартість проїзду є ключовими чинниками при виборі на користь громадського транспорту [1].

З позиції екологічного аспекту функціонування транспортної системи, розвиток громадського транспорту сприяє зменшенню кількості приватних автомобілів на дорогах, що позначається на скороченні шкідливих викидів, зниженні шуму та економії енергетичних ресурсів [1].

Перспективним напрямом вирішенням екологічних проблем сучасних міст є розвиток електричного транспорту, який може зробити міста більш чистими та комфортними для життя [1].

Зважаючи на зазначене, розвиток громадського транспорту є невід'ємною умовою стабільного функціонування сучасних міст. Він забезпечує мобільність населення, підтримує економічну активність, покращує екологічний стан і сприяє сталому розвитку міського середовища. Саме тому майбутнє міст пов'язане з модернізацією та активним розвитком систем громадського транспорту [1].

Перерозподіл пересувань на користь громадського транспорту є одним із ключових напрямів забезпечення сталого розвитку міст, оскільки зростання урбанізації та кількості поїздок у міських агломераціях призводить до посилення транспортних заторів, забруднення повітря, шумового навантаження та підвищення викидів парникових газів. Без зміни транспортної поведінки населення ці проблеми лише загострюватимуться, тому перехід від приватного транспорту до громадського має розглядатись як пріоритет міської транспортної політики [3].

Реалізація такого переходу є складним процесом, оскільки вибір виду транспорту залежить не лише від економічних чинників, а й від соціальних звичок, рівня комфорту, престижності автомобіля, індивідуальних уподобань та якості перевезень громадським транспортом. Для багатьох мешканців автомобіль асоціюється зі свободою пересування, зручністю та особистим простором, тому стимулювання відмови від нього потребує комплексного підходу. Зміна поведінки користувачів транспортної системи можлива лише за умови створення привабливої, доступної та ефективної системи громадського транспорту [3].

Механізми, що сприяють перерозподілу міських пересувань за способами їх реалізації, можуть бути поділені на дві групи: «стимули» та «обмеження» [3]. До першої групи належать заходи, що заохочують користування громадським транспортом: підвищення частоти руху,

надійності, доступності, комфорту, безпеки, якості інформаційного супроводу, інтегрованих квиткових систем та зручних пересадок.

Доступність і простота використання, регулярність руху та комфорт є найбільш важливими характеристиками для пасажирів. До другої групи належать обмежувальні заходи щодо приватного транспорту: плата за в'їзд у центр міста, регулювання паркування, зменшення кількості паркомісць, екологічні обмеження та пішохідні зони. Такі заходи стимулюють населення шукати альтернативу пересуванню автомобілем.

Заходи щодо обмеження використання індивідуальних автомобілів будуть ефективними лише у тому випадку, коли одночасно розвивається якісний громадський транспорт. Інакше подібні заходи викликають суспільний опір та негативну реакцію населення [3].

Короткострокові політичні цикли, недостатнє фінансування, слабка координація між установами та опір автомобільного лобі часто стримують транспортні реформи. Для подолання цих проблем необхідні довгострокові стратегії, міжсекторальна співпраця, залучення громадськості до прийняття рішень та інвестиції в сучасну транспортну інфраструктуру [3].

Автори праці [4] зазначають, що ефективна транспортна система має бути інтегрованою, мультимодальною, доступною та зрозумілою для користувача. Сучасне місто не може покладатися лише на радіальні маршрути, орієнтовані на поїздки до центру. У сучасних поліцентричних містах значна частина пересувань здійснюється між периферійними районами. Через це виникає потреба у нових мережевих структурах, які забезпечують зв'язки між різними частинами міста без необхідності пересадки у центрі.

Під час формування ефективної системи громадського транспорту значну увагу слід приділяти концепції планування маршрутів. Суть такої концепції полягає у створенні прямих і взаємопов'язаних маршрутів з високою частотою руху транспортних засобів, які перетинаються у багатьох точках міста та дозволяють швидко здійснювати пересадки. На відміну від традиційної

радіальної системи, така модель підвищує доступність більшої кількості напрямків і робить громадський транспорт зручнішим для повсякденних пересувань. Наголос робиться на тому, що пересадки не слід сприймати виключно як недолік, оскільки за належної організації вони розширюють можливості переміщення та зменшують дублювання маршрутів [4].

Значення мультимодальності полягає у тому, що різні види транспорту повинні виконувати різні функції. Метрополітен та міська залізниця мають бути орієнтовані на засвоєння великих потоків пасажирів на основних напрямках, легкорейковий транспорт і швидкісні автобуси обслуговують потоки пасажирів середньої потужності, а локальні автобусні маршрути забезпечують підвезення до вузлів пересадки. Такий підхід дозволяє раціонально використовувати ресурси та підвищувати загальну ефективність транспортної мережі [4].

Системи шеренгових технологій (*bike-sharing, ridesharing*), транспорт, що реагує на попит (*demand-responsive transport*), автономні транспортні засоби та інші інновації слід розглядати як інструменти, що можуть доповнювати традиційний громадський транспорт. Зокрема, вони здатні вирішувати проблему «першої» та «останньої милі», тобто забезпечувати доступ до магістральних ліній із районів низької щільності забудови або в години слабого попиту [4].

Як перспективні напрями сталого розвитку міського транспорту автори праці [5] зазначають такі: обмеження використання приватних автомобілів, політика управління транспортним попитом, електрифікація транспорту, впровадження інтелектуальних транспортних систем, розвиток шеренгової мобільності, сервісів «мобільність як послуга» та концепції розвитку міст орієнтованих на громадський транспорт (*transit-oriented development, TOD*).

Інтеграція транспорту із міським плануванням згідно до концепції розвитку міст орієнтованих на громадський транспорт передбачає формування компактної забудови навколо транспортних вузлів, змішане використання територій і зменшення залежності від автомобіля [4, 5]. Станції

та пересадкові вузли мають ставати осередками змішаного використання територій, підвищеної щільності забудови та якісного громадського простору. Це не лише збільшує пасажиропотік, а й сприяє формуванню більш компактного, доступного та екологічного міста [4].

Зміни щодо покращення транспортної ситуації у містах стають можливими за умови централізованого управління, координації між установами, використання сучасних технологій та активної участі громадськості. Водночас бар'єрами залишаються політична фрагментація, відсутність стратегічного бачення, недостатнє фінансування та спротив окремих груп інтересів [4].

Майбутні напрями розвитку міського транспорту є створення привабливих транспортних систем, які природним чином спонукатимуть людей переходити з приватного автомобіля на інші способи пересування. Формування таких транспортних систем значною мірою залежатиме від подальшого розвитку новітніх технологій. Загалом інноваційні технології міських перевезень будуть орієнтовані на три ключові цілі [1]:

- підвищення продуктивності міського транспорту, зокрема завдяки впровадженню автоматизації;
- покращення безпеки, ефективності та якості послуг із досягненням цих результатів економічно доцільним способом;
- підтримка національних пріоритетів, таких як енергозбереження, безпека, відродження центральних частин міст та захист довкілля.

На думку автора праці [1] нові рішення для міського транспорту поєднуюватимуть компоненти мобільності з наступним переліком технологій:

- глобальні платформи постійного M2M-зв'язку (*Machine-to-Machine*), що забезпечують безперервне підключення, надійний збір плати за проїзд у режимі реального часу та включають хмарні системи керування;
- мережні комп'ютеризовані системи управління з використанням технологій реального часу та підвищених стандартів безпеки;

- системи оперативної інформації про дорожній рух, інтегровані з сервісами для водіїв у транспортних засобах, мобільних застосунках та онлайн-платформах;
- платформи на основі моделі SaaS (*Software-as-a-Service*) для інтелектуальної інтеграції геолокаційних технологій, даних та сервісів;
- технології машинного навчання в режимі реального часу, що застосовуються в середовищі Інтернету речей (IoT) та M2M-системах;
- технології взаємодії людини з комп'ютером на основі природної мови, з інтегрованими інтелектуальними системами голосового керування;
- соціальні онлайн-спільноти для спільних поїздок (*ridesharing*) з інтелектуальними алгоритмами підбору між запитами на поїздку та доступними місцями;
- сенсорні системи та технології машинного зору для автоматизованого керування транспортом;
- передові бездротові сенсорні технології та програмне забезпечення для середовищ V2X (*Vehicle-to-Everything*), що підтримують інтелектуальні транспортні сервіси.

Автори праці [2] наголошують, що традиційні підходи до організації транспортного обслуговування вже не відповідають сучасним потребам суспільства, тому необхідним є впровадження кооперативних інтелектуальних транспортних систем (C-ITS), які базуються на використанні цифрових технологій, великих даних та спільному прийнятті рішень. Розглядається п'ять рівнів розвитку, від початкового стану з фрагментарним управлінням до повністю інтегрованої системи з постійним удосконаленням процесів. Такий підхід дозволить органам влади та іншим учасникам транспортної сфери визначити наявні проблеми, оцінювати ресурси та формувати стратегічні напрями модернізації транспортної системи. Така модель є важливим інструментом управління, оскільки враховує як організаційні, так і технологічні аспекти функціонування міського транспорту.

Також, автори праці [2] підкреслюють важливість інтеграції штучного інтелекту, Інтернету речей, хмарних технологій, мереж 5G/6G, цифрових двійників інфраструктури та автономного транспорту. Використання цих рішень дає змогу забезпечити прогнозування транспортного попиту, оптимізацію маршрутів, скорочення часу очікування, електронну оплату послуг та персоналізоване обслуговування пасажирів.

1.2 Проблемні аспекти забезпечення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту

Ефективність функціонування міського пасажирського транспорту є однією з ключових умов сталого розвитку сучасних міст. Від якості транспортної системи залежить мобільність населення, економічна активність, екологічний стан та рівень комфорту життя. Однак у більшості міст існує низка проблем, що знижують ефективність роботи громадського транспорту [6-8].

У праці [8] розглядаються важливі теоретичні та практичні положення, які дозволяють виокремити ключові проблемні аспекти забезпечення ефективності функціонування громадського транспорту сучасних міст. Наголошується, що ефективність міського громадського транспорту слід розглядати як комплексну категорію, що формується під впливом експлуатаційних, фінансових, екологічних чинників та інформаційних технологій. Водночас аналіз показує, що навіть за подібних обсягів перевезень у містах існують суттєві відмінності в ефективності транспортних систем, зумовлені інституційними та ресурсними обмеженнями.

Таким чином, результати дослідження дозволяють узагальнити, що основними проблемними аспектами забезпечення ефективності функціонування громадського транспорту сучасних міст є [8]:

- обмежене фінансування та економічна неефективність;
- зношеність інфраструктури та рухомого складу;

- недостатній рівень цифровізації та інформаційної інтеграції;
- інституційні недоліки управління;
- екологічні виклики та відсутність системної декарбонізації;
- слабка інтеграція транспортного планування.

Однією з ключових проблем є недостатнє фінансове забезпечення громадського транспорту, особливо в містах України. Автори праці [8] зазначають, що значна різниця у доходах в розрахунку на одного пасажирів між європейськими та українськими системами міського пасажирського транспорту обмежує можливості модернізації рухомого складу, впровадження інновацій і підтримання належного рівня сервісу. Це призводить до зниження якості транспортних послуг і, відповідно, до зменшення їх конкурентоспроможності порівняно з приватним транспортом.

Важливим проблемним аспектом є також застарілість інфраструктури та рухомого складу. У багатьох містах транспортні системи функціонують на базі технічно зношених активів, що негативно впливає на надійність перевезень, енергоефективність і комфорт пасажирів [8].

Іншою проблемою є низький рівень цифровізації та інтеграції транспортних систем. Хоча окремі цифрові рішення (наприклад, електронний квиток чи мобільні додатки) вже впроваджуються, відсутність комплексних цифрових платформ і відкритих даних обмежує можливості оптимізації маршрутної мережі, управління пасажиропотоками та підвищення якості обслуговування [8].

Суттєвим обмеженням ефективності є інституційна недосконалість управління транспортом. В європейських містах ефективність забезпечується через поєднання державного регулювання та приватного управління, що сприяє підвищенню прозорості та відповідальності. Натомість у багатьох українських містах централізована модель управління з обмеженою автономією підприємств стримує інновації та знижує ефективність використання ресурсів [8].

Окремо слід виділити екологічний аспект ефективності громадського транспорту. Незважаючи на те, що електротранспорт може забезпечувати низький рівень прямих викидів, загальна екологічна ефективність залежить від структури енергетичного балансу та рівня модернізації інфраструктури. Відсутність системного підходу до декарбонізації транспорту знижує довгострокову ефективність його функціонування [8].

Ще одним важливим проблемним аспектом є низький рівень інтеграції транспортної політики та планування, що проявляється у відсутності узгоджених стратегій розвитку, таких як сталі плани міської мобільності. Це призводить до фрагментарності транспортної системи, дублювання маршрутів і нерационального використання ресурсів [8].

У праці [7] увагу акцентовано на актуальній проблематиці сталого розвитку українських міст із фокусом на інклюзивність міського пасажирського транспорту та його вплив на довкілля. Автори розглядають транспортну систему як ключовий елемент міської інфраструктури, що безпосередньо впливає на соціальну рівність, мобільність населення та екологічну ситуацію. У роботі застосовано комплексний підхід, що поєднує соціальні, економічні та екологічні аспекти розвитку транспортних систем.

Інклюзивність транспорту є важливою складовою сталого розвитку, оскільки забезпечує рівний доступ до послуг для всіх громадян. Аналіз сучасного стану транспортної інфраструктури українських міст показує низку проблем, серед яких: недостатня адаптованість транспорту для осіб з інвалідністю, застарілий рухомий склад, нерівномірність транспортної доступності та низький рівень інтеграції різних видів транспорту [7].

Традиційні види транспорту (автобуси) є вагомим джерелом забруднення повітря та викидів парникових газів. Зменшення негативного впливу міського пасажирського транспорту на довкілля можна досягти за рахунок впровадження екологічно чистих технологій, розвиток електротранспорту, оптимізацію маршрутної мережі та стимулювання використання громадського транспорту замість приватних автомобілів [7].

Авторами праці [7] запропоновано рекомендації щодо покращення послуг громадського транспорту в містах України, зокрема [7]:

- модернізація транспортної інфраструктури;
- впровадження принципів універсального дизайну;
- розвиток екологічного транспорту;
- удосконалення управління міськими транспортними системами.

Успішний розвиток громадського транспорту залежить не лише від інфраструктури чи технологій, а насамперед від якості управління, узгодженості дій і здатності різних учасників працювати разом задля спільної мети [6].

У праці [6] проводиться аналіз проблем і підходів до створення ефективних систем громадського транспорту. Автори наголошують на тому, що створення ефективного громадського транспорту є складним завданням через розподіл відповідальності між багатьма учасниками (державними органами, приватними компаніями, місцевою владою та іншими зацікавленими сторонами). У таких умовах ключову роль відіграють не лише технічні рішення, а передусім питання управління, координації та співпраці між цими стейкхолдерами. Автори наголошують на тому, що, хоча існує достатньо інформації про те, яким має бути ефективний транспорт (висока частота рейсів, швидкість, зручність, інтегровані квиткові системи), значно менше уваги приділено тому, як реалізувати ці зміни на практиці. Основними проблемами є фрагментація системи управління, конфлікти інтересів між учасниками, вплив ринкових механізмів, а також складність узгодження транспортного планування з міським розвитком. Зазначені проблеми можуть бути узагальнені наступним чином [6]:

1. Труднощі координації між різними організаціями, що ускладнює створення цілісної транспортної системи.
2. Інституційні обмеження. Закони, правила та усталені практики, які часто гальмують зміни.

3. Важливу роль відіграє так звана «залежність від попереднього розвитку» (*path dependency*), коли історично сформовані транспортні системи (наприклад, орієнтовані на використання індивідуальних автомобілів) ускладнюють перехід до більш сталих моделей.

Автори праці [6] аналізують різні підходи до вирішення цих проблем:

- створення нових форм співпраці (партнерства, мережне управління);
- використання тимчасових робочих груп або комісій;
- запровадження спільного планування та розвиток неформальних механізмів взаємодії.

Такі підходи дозволяють об'єднати ресурси та інтереси різних сторін, хоча вони не завжди мають достатню юридичну силу [6].

Таким чином, підвищення ефективності громадського транспорту можливе лише за умови комплексної модернізації, яка передбачає поєднання інноваційних технологій, сталого фінансування, ефективного управління та екологічно орієнтованої політики розвитку міських транспортних систем. При цьому, важливою умовою є орієнтація на інклюзивність та екологічну безпеку. Не менш важливим є аспект організації ефективної взаємодії між учасниками ринку транспортних послуг перевезення пасажирів.

1.3 Роль заповнюваності транспортних засобів у забезпеченні ефективності роботи системи перевезень

Рівень заповнюваності транспортних засобів є одним із ключових показників ефективності функціонування системи міських пасажирських перевезень. Аналіз наукових досліджень [9 - 20] свідчить, що саме співвідношення між місткістю транспортного засобу та фактичним пасажиропотоком визначає економічну доцільність перевезень, рівень транспортного обслуговування населення та ефективність використання ресурсів перевізника. Недостатній рівень заповнення призводить до неефективного використання рухомого складу, зростання собівартості

перевезень та збільшення витрат на одного пасажирів. У такому випадку перевізник несе значні експлуатаційні витрати незалежно від фактичної кількості пасажирів, що негативно впливає на фінансові результати діяльності транспортного підприємства. Разом із цим, надмірна заповнюваність транспортних засобів також має негативні наслідки. Переповнення автобусів, тролейбусів чи трамваїв знижує комфорт перевезень, погіршує умови безпеки пасажирів, збільшує час посадки та висадки, а також сприяє прискореному зношенню рухомого складу. Перевищення нормативного рівня наповнення є ознакою недостатньої провізної спроможності маршруту або нераціональної організації руху.

У праці [9] розглядається взаємозв'язок між рівнем заповнюваності транспортних засобів та ефективністю перевезень пасажирів. Автори розглядають заповнюваність транспортних засобів як один із ключових критеріїв оптимізації роботи транспортної системи поряд із мінімізацією часу очікування пасажирів. Рівень заповнення транспортних засобів безпосередньо впливає як на економічні показники роботи перевізника, так і на якість транспортного обслуговування пасажирів. Для перевізника підвищення коефіцієнта заповнюваності є способом зниження експлуатаційних витрат та підвищення рентабельності перевезень. Водночас надмірне прагнення до максимальної заповнюваності може призводити до перепоповнення транспортних засобів, погіршення умов перевезення та збільшення часу очікування пасажирів. Автори наголошують на тому, що ефективна система перевезень повинна забезпечувати баланс між високим рівнем використання провізної спроможності, мінімальним часом очікування пасажирів та допустимим рівнем комфортності перевезень. Також слід враховувати, що у разі надмірного заповнення транспортних засобів частина пасажирів не має можливості здійснити посадку до транспортного засобу та змушена залишатися на зупинці для очікування прибуття наступного. При використанні транспортних засобів недостатньої місткості частина пасажирів не може потрапити до салону та змушена очікувати наступного рейсу. Це

спричиняє збільшення витрат часу пасажирів на очікування, зниження привабливості громадського транспорту та можливий перехід пасажирів на індивідуальний транспорт.

У праці [10] досліджується вплив рівня заповнюваності автобусів на енергетичну, екологічну та транспортну ефективність функціонування системи пасажирських перевезень. Автор розглядає підвищення середньої заповнюваності автобусів як один із найбільш ефективних інструментів підвищення результативності роботи громадського транспорту.

На думку авторів праці [11] надмірно низька заповнюваність призводить до збільшення кількості «порожніх місце-годин», тобто неефективного використання провізної спроможності транспорту. Водночас надмірне заповнення транспортних засобів погіршує якість перевезень і знижує привабливість громадського транспорту для населення. Тому забезпечення раціонального рівня заповнення розглядається як один із головних напрямів підвищення ефективності міських пасажирських перевезень.

Ефективна організація перевезень повинна враховувати [12]:

- динамічну зміну пасажиропотоків;
- коливання попиту протягом доби;
- стохастичний характер транспортних процесів;
- взаємозв'язок між заповнюваністю транспорту та надійністю роботи системи.

Автори праці [14] зазначають, що зі зростанням заповнюваності транспорту різко збільшується негативне сприйняття часу поїздки. Це означає, що навіть без фактичного збільшення тривалості поїздки пасажирів сприймають переповнений транспорт як менш привабливий. При цьому виділено три основні рівні заповнення:

1. Нормальне заповнення (*Standard*) - пасажирів можуть комфортно сидіти чи здійснювати поїздку стоячи.

2. Надмірний рівень заповнення (*Prohibitive*) - переповнення, при якому пасажиром складно пересуватись салоном і здійснювати посадку/висадку.

3. Конвергенція (*Convergence*) - критичне переповнення, яке суттєво погіршує сприйняття поїздки.

На підставі проведеного аналізу роль заповнюваності транспортних засобів у забезпеченні ефективності роботи системи перевезень схематично представлено на рис. 1.1.

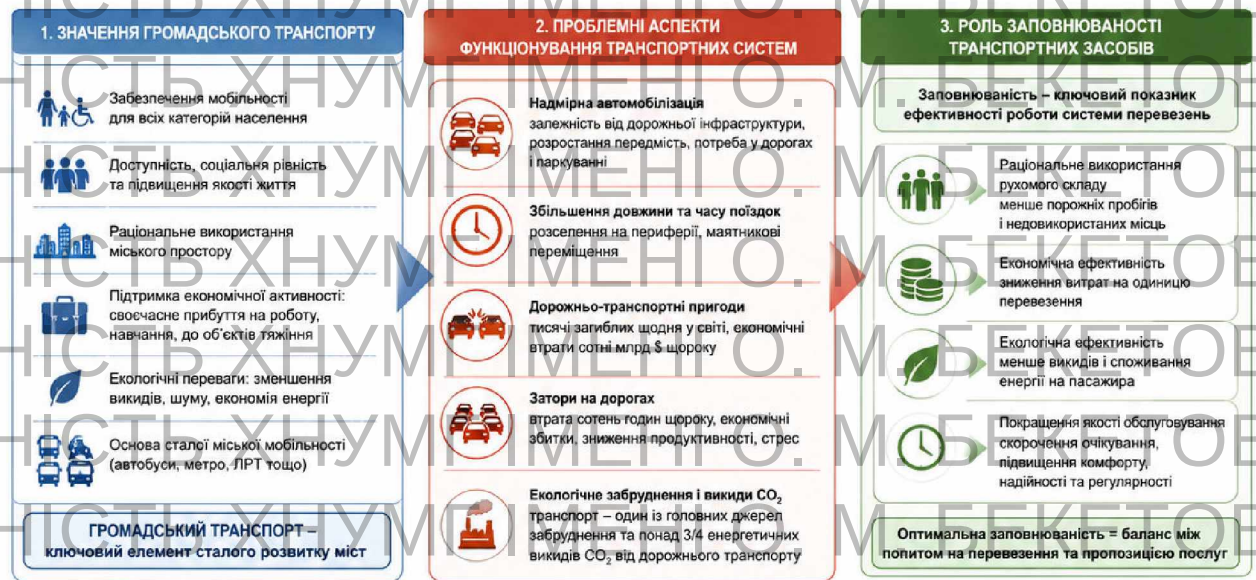


Рисунок 1.1 – Роль заповнюваності транспортних засобів у забезпеченні ефективності роботи системи перевезень

Узагальнюючи слід зазначити, що рівень заповнюваності транспортних засобів є одним із найважливіших показників ефективності роботи системи перевезень. Недостатня заповнюваність призводить до неефективного використання рухомого складу та зростання витрат на перевезення, тоді як надмірне переповнення погіршує комфорт поїздки, збільшує час посадки та висадки пасажирів, знижує якість транспортного обслуговування та негативно впливає на привабливість громадського транспорту.

1.4 Основні методи оцінювання та оптимізації заповнюваності транспортних засобів

Питанням оцінювання та оптимізації заповнюваності транспортних засобів призначена значна кількість досліджень серед яких було виділено [9 - 20]. Загалом існуючі підходи відрізняються методикою та показниками оцінювання рівня заповнення маршрутних транспортних засобів, напрямками та способами оптимізації рівня заповнення.

Автори праці [9] зазначають, що оптимізація розкладу руху та вибору місткості транспортних засобів дозволяє одночасно:

- зменшити кількість пасажирів, які залишаються на зупинках (імовірність відмови пасажирам в посадці);
- скоротити середній час очікування;
- підвищити ефективність використання рухомого складу;
- покращити економічні показники перевезень.

Наголос робиться на тому, що коефіцієнт заповнюваності повинен розглядатися не ізольовано, а у взаємозв'язку з: інтервалами руху; пасажиропотоками; кількістю рейсів (частота руху); графіком руху; місткістю транспортних засобів; рівнем нерівномірності попиту протягом доби. Оптимальний рівень заповнення транспорту повинен забезпечувати компроміс між економічною ефективністю та соціальною якістю транспортного обслуговування. Для урахування цього твердження авторами праці [9] запропоновано математичну модель оптимізації, яка дозволяє одночасно максимізувати коефіцієнт заповнюваності транспортних засобів і мінімізувати час очікування пасажирів. Для цього використовується багатокритеріальний алгоритм оптимізації, який формує оптимальні параметри розкладу руху та використання транспортних засобів різної місткості. За результатами проведених досліджень сформульовано висновок, що раціональне управління рівнем заповнення дозволяє підвищити ефективність використання рухомого складу, зменшити витрати перевізника,

скоротити час очікування пасажирів та забезпечити більш якісне транспортне обслуговування населення.

У праці [10] зазначено, що низька заповнюваність автобусів призводить до неефективного використання транспортних ресурсів, оскільки значні експлуатаційні витрати на перевезення зберігаються незалежно від кількості перевезених пасажирів. Водночас підвищення коефіцієнта використання місткості дозволяє:

- зменшити витрати енергії на одного пасажирів;
- скоротити обсяги шкідливих викидів;
- підвищити продуктивність транспортної системи;
- зменшити кількість приватних автомобілів на дорогах.

У роботі підкреслюється, що традиційні підходи до складання розкладів часто не враховують фактичний рівень заповнення транспортних засобів. Це спричиняє ситуації, коли на одних маршрутах автобуси працюють з переповненням, а на інших спостерігається значна кількість вільних місць. Саме тому автори пропонують використовувати транспортні засоби різної місткості та формувати розклади руху відповідно до нерівномірності пасажиропотоків. В межах такого підходу розглядається сценарій переходу частини пасажирів із приватного транспорту на автобуси шляхом збільшення середньої заповнюваності автобусів із 20% до 50% та 80%. Автор підкреслює, що таке підвищення заповнюваності дозволяє суттєво знизити загальне енергоспоживання транспортної системи без збільшення кількості автобусів або транспортної роботи. На підставі проведених досліджень встановлено, що збільшення використання громадського транспорту сприяє зменшенню інтенсивності автомобільного руху; зниженню рівня заторів; скороченню витрат пального; покращенню екологічної ситуації у містах. Результати моделювання показали, що підвищення заповнюваності автобусів може забезпечити такий самий позитивний ефект щодо скорочення викидів CO₂ та шкідливих речовин, як і масове впровадження електромобілів. Зокрема, встановлено, що збільшення заповнюваності автобусів із 20% до

40–80% дозволяє скоротити викиди NO_x та PM приблизно на 23%, а викиди CO₂ - на 20–35%.

У праці [11] досліджується проблема узгодження розкладів руху громадського транспорту з урахуванням коливань пасажиропотоків та використання транспортних засобів різної місткості. Автори наголошують, що невідповідність між пропозицією транспортних послуг і фактичним пасажирським попитом призводить до виникнення низки проблем серед яких основними є такі: переповнення транспортних засобів; збільшення часу очікування пасажирів; неефективного використання місткості транспорту; зростання експлуатаційних витрат; погіршення якості транспортного обслуговування. Виходячи з цього, правильний вибір пасажиромісткості транспортного засобу відповідно до рівня попиту дозволяє зменшити переповнення транспорту, підвищити комфорт поїздки, скоротити кількість порожніх місць, знизити витрати перевізника та підвищити ефективність використання рухомого складу.

Авторами праці [11] запроваджується поняття розбіжності рівня заповнення (*vehicle load discrepancy*). Цей показник характеризує відхилення фактичного рівня заповнюваності транспортного засобу від бажаного. Даний показник використовується як один із критеріїв оптимізації транспортної системи. Автори вважають, що оптимальний рівень заповнення повинен забезпечувати баланс між комфортом пасажирів, ефективністю використання місткості транспортних засобів, мінімізацією порожнього пробігу, скороченням часу очікування та економічною доцільністю експлуатації транспорту. Для вирішення цього завдання розроблено двокритеріальну модель оптимізації, метою якої є: мінімізація загального часу очікування пасажирів та відхилення заповнюваності транспортних засобів від бажаного рівня. У роботі також обґрунтовано, що узгодження розкладів руху та використання транспортних засобів різної місткості дозволяє суттєво покращити показники функціонування транспортної системи. За результатами моделювання для транспортної мережі міста Окленд

встановлено, що впровадження запропонованого підходу забезпечує скорочення загального часу очікування пасажирів на 68–72% та зменшення дисбалансу заповнення транспортних засобів на 59–65%.

У праці [12] досліджується проблема визначення оптимальної частоти руху та місткості транспортних засобів у системі громадського транспорту з урахуванням нерівномірності пасажиропотоків, переповнення транспорту та надійності транспортного обслуговування. У роботі безпосередньо пов'язано рівень заповнюваності транспортних засобів із якістю транспортного обслуговування, витратами перевізника та ефективністю функціонування транспортної мережі. Автори зазначають, що провізна спроможність маршруту визначається поєднанням двох основних параметрів: частоти руху транспортних засобів та місткості транспортних засобів. Саме ці параметри формують рівень заповнення транспортних засобів та впливають на час очікування пасажирів, рівень комфорту поїздки, ступінь переповнення транспорту, експлуатаційні витрати та надійність транспортного обслуговування.

Автори розглядають три основні негативні ефекти переповнення транспортних засобів [12]: погіршення комфорту пасажирів, неможливість посадки через обмежену місткість, коливання інтервалів руху внаслідок збільшення часу пасажирообміну на зупинках. У роботі наголошується, що ефективність транспортної системи залежить не лише від кількості транспортних засобів, а й від раціонального співвідношення між попитом і місткістю рухомого складу. Для цього автори пропонують одночасно оптимізувати частоту руху, тип та місткість транспортних засобів, розподіл рухомого складу між маршрутами. Особлива увага приділяється використанню транспортних засобів різної місткості. У дослідженні аналізуються автобуси малої місткості, стандартні (12 м) та зчленовані автобуси. Автори доводять, що використання змішаного парку транспортних засобів дозволяє більш ефективно адаптувати провізну спроможність до фактичних пасажиропотоків, що забезпечує: зменшення переповнення

транспорт, скорочення непродуктивних витрат, підвищення рівня комфорту, більш раціональне використання рухомого складу. В результаті моделювання транспортної мережі м. Амстердам, встановлено, що оптимізація заповнюваності транспортних засобів дозволяє суттєво скоротити витрати часу пасажирів. У ранковий період витрати часу на очікування транспортних засобів можуть бути знижені приблизно на 18,5%. Аналогічне зниження витрат часу у вечірній період зафіксовано на рівні 10,6%. На підставі проведених досліджень зроблено висновок, що застосування транспортних засобів меншої місткості на маршрутах із невеликим попитом дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та водночас збільшити частоту руху без додаткових фінансових витрат. Це свідчить про важливість раціонального управління заповнюваністю транспортних засобів як інструменту підвищення ефективності перевезень [12].

У праці [13] розглядається взаємозв'язок між якістю транспортного обслуговування, рівнем заповнюваності транспортних засобів, тарифами та задоволеністю пасажирів у системі міських автобусних перевезень міста Бандунг (Індонезія). При цьому заповнюваність автобусів як один із ключових показників ефективності та якості функціонування системи громадського транспорту. Автори зазначають, що однією з головних причин зниження популярності громадського транспорту є незадовільна якість транспортного обслуговування. У статті наведено статистику скорочення кількості пасажирів автобусів у Бандунзі, що пов'язується з низьким рівнем комфорту та незадоволеністю пасажирів умовами перевезень. У дослідженні підкреслюється, що важливими складовими якості транспортного обслуговування є: рівень заповнюваності транспортних засобів; комфорт поїздки; тарифна політика; стан транспортних засобів; інформаційне забезпечення пасажирів. Особливу увагу автори приділяють оцінці коефіцієнта використання пасажиромісткості (*load factor*). Значення коефіцієнту заповнення менше 1,0 свідчить про недостатнє заповнення транспорту, у той час як значення коефіцієнту більше за 1,0 означає

перевищення місткості транспортного засобу та переповнення салону. Автори наголошують, що хоча високий рівень заповнюваності дозволяє перевізнику отримувати більший прибуток за рахунок перевезення більшої кількості пасажирів, надмірне переповнення транспорту негативно впливає на комфорт та задоволеність пасажирів. Таким чином, у статті підкреслюється необхідність забезпечення оптимального рівня заповнюваності транспортних засобів, який дозволяє забезпечити економічну ефективність перевезень, уникнути надмірного рівня заповнення, підтримувати належний рівень комфорту та підвищувати привабливість громадського транспорту.

Для оптимізації рівня заповнення запропоновано використання методу визначення коефіцієнту заповнення беззбитковості (*break-even load factor*), який дозволяє встановлювати економічно доцільний рівень заповнюваності транспортних засобів з урахуванням доходів перевізника, експлуатаційних витрат, потреб пасажирів та тарифів на перевезення. За допомогою методу структурного моделювання доведено, що якість транспортного обслуговування має суттєвий позитивний вплив на задоволеність і лояльність пасажирів. Наголос робиться на тому, що для формування більш раціонального рівня заповнення транспортних засобів доцільно проводити перерозподіл рухомого складу між маршрутами [13].

У праці [14] автори зазначають, що сучасні транспортні моделі часто не враховують зміну рівня заповнюваності транспортних засобів при зростанні попиту на громадський транспорт. У більшості випадків передбачається автоматичне пропорційне збільшення провізної спроможності, хоча на практиці це обмежується фінансовими ресурсами, тривалими строками закупівлі рухомого складу, необхідністю розвитку інфраструктури, організаційними обмеженнями транспортної системи. Для оцінки рівня заповнення автори використовують коефіцієнт заповнення, який характеризує співвідношення між кількістю пасажирів і кількістю місць для проїзду пасажирів сидячі у транспортному засобі (*seat load factor*).

Результати оцінювання середнього рівня заповнення громадського транспорту у Німеччині показують, що: середній коефіцієнт заповнення протягом доби становить близько 37%; у піковий період (7:00 - 8:00) він зростає до 65%; у найбільших містах (Берлін, Гамбург) піковий рівень заповнення перевищує 130 - 160%. Особливу увагу автори приділяють взаємозв'язку між рівнем заповнення транспорту та сприйняттям пасажирами якості поїздки. У роботі використовується показник вартості витрат часу (*value of time factor*), який відображає зміну суб'єктивної оцінки витрат часу залежно від рівня переповнення транспорту [14].

Авторами праці [14] шляхом проведення модельного розрахунку аналізують сценарії зниження тарифів на громадський транспорт на 50% та введення додаткової плати за використання приватного автомобіля. Результати моделювання показали, що за умов незмінної місткості транспортної системи зростання попиту на громадський транспорт призводить до суттєвого збільшення заповнюваності транспортних засобів. Переповнення транспорту знижує ефективність заходів із залучення пасажирів до громадського транспорту. Зокрема, навіть значне зниження тарифів дає менший ефект у разі високої заповнюваності транспортних засобів, оскільки погіршується комфорт перевезень. Отже, підвищення попиту на громадський транспорт повинно супроводжуватися відповідним збільшенням провізної спроможності. Інакше перевантаження транспортних засобів може суттєво знизити позитивний ефект транспортної політики та погіршити якість транспортного обслуговування населення [14].

У праці [15] досліджується проблема підвищення ефективності роботи міського громадського транспорту шляхом оптимізації розкладів руху та використання транспортних засобів різної місткості. Автори безпосередньо аналізують взаємозв'язок між рівнем заповнюваності транспортних засобів, інтервалами руху, витратами перевізника та якістю транспортного обслуговування.

Автори зазначають, що традиційні підходи до формування розкладів руху переважно базуються на забезпеченні рівномірних інтервалів руху (*even headways*). Проте такий підхід не гарантує ефективного використання рухомого складу в умовах нерівномірного пасажиропотоку. Це призводить до того, що певні транспортні засоби працюють з надлишковим рівнем заповнення в той час як інші — з низькою, погіршується надійність перевізного процесу та неефективно використання енергетичні ресурси.

Основною ідеєю дослідження є поєднання двох підходів: забезпечення рівномірних інтервалів руху та забезпечення рівномірного рівня заповнюваності транспортних засобів. Для цього автори пропонують використовувати змішаний парк транспортних засобів різної місткості: малі, стандартні (12 м) та великі (зчленовані) автобуси. У роботі використовується поняття бажаний рівень заповнюваності транспортного засобу (*desired occupancy level*). Автори рекомендують формувати розклади таким чином, щоб рівень завантаження наближався до кількості сидячих місць, що дозволяє мінімізувати кількість пасажирів, які їдуть стоячи, забезпечити комфорт перевезень, підвищити енергоефективність роботи транспорту та скоротити непродуктивні витрати.

Запропонований алгоритм формування розкладів руху передбачає виконання наступних етапів [15]:

- аналіз фактичних пасажиропотоків;
- визначення максимального пасажиропотоку на маршруті;
- підбір транспортного засобу відповідної місткості;
- коригування часу відправлення транспортних засобів для

вирівнювання рівня заповнення. Встановлено, що незначне зміщення часу відправлення транспортних засобів дозволяє суттєво покращити рівномірність заповнення автобусів.

Особливо важливими є результати реального кейсу. Результати впровадження оптимізованого розкладу руху для міста Окленд (Нова Зеландія) показали, що [15]:

- час очікування пасажирів скоротився приблизно на 15%;
- кількість порожніх місць зменшилась приблизно на 47%;
- рівень заповнюваності транспортних засобів став більш стабільним протягом доби.

У праці [16] досліджується проблема підвищення ефективності функціонування систем швидкісного автобусного транспорту (BRT) шляхом оптимізації диспетчеризації та використання транспортних засобів різної місткості. Результати розрахунків енергоспоживання для 12-метрових та 18-метрових автобусів при різних рівнях завантаження показали, що зі збільшенням кількості пасажирів у салоні транспортного засобу витрати пального систематично зростають.

У дослідженні запропоновано багатокритеріальну модель оптимізації, цільовими функціями якої є мінімізація часу очікування пасажирів та мінімізація енергоспоживання транспортних засобів. Результати її використання показали, що оптимізація заповнюваності транспортних засобів є важливим інструментом забезпечення ефективності функціонування системи громадського транспорту. Зокрема, раціональний вибір місткості транспортних засобів відповідно до фактичного пасажиропотоку дозволяє підвищити енергоефективність перевезень, скоротити експлуатаційні витрати, покращити якість транспортного обслуговування, зменшити непродуктивне використання рухомого складу.

У праці [17] детально аналізуються механізми виникнення переповнення транспортних засобів, вплив переповненості на пасажирів та особливості моделювання цих процесів у транспортних системах. Автори виділяють три основні наслідки надмірної заповнюваності транспортних засобів:

- погіршення комфортності поїздки через переповнення салону (*crowding discomfort*);
- виникнення відмов пасажирам у посадці через досягнення граничної місткості (*denied boarding*);

- погіршення регулярності руху через збільшення часу посадки та висадки пасажирів (*service reliability deterioration*).

Акцент у роботі зроблено на тому, що традиційні моделі транспортного планування часто недостатньо точно враховують вплив заповнюваності транспортних засобів на поведінку пасажирів. Автори наголошують, що середня заповнюваність не відображає реальних умов перевезень, оскільки рівень завантаження може суттєво змінюватися навіть протягом одного рейсу. У статті розглядаються два підходи до моделювання рівня заповнення транспортних засобів: модель, заснована на розкладі руху (*schedule-based assignment model*) та агентно-орієнтована модель (*agent-based assignment model*). Агентно-орієнтована модель BusMezzo дає змогу відстежувати заповнення кожного транспортного засобу, моделювати реальні черги на посадку, враховувати обмеження місткості автобусів та аналізувати повторний вибір маршруту пасажирями при неможливості посадки.

Результати моделювання показали, що переповнення транспортних засобів має нелінійний характер. Після досягнення певного рівня заповнення транспортної мережі середній час поїздки починає різко зростати. Це пояснюється тим, що збільшується кількість пасажирів, які не можуть здійснити посадку у транспортний засіб з першої спроби (відмови в посадці).

У праці [18] автори досліджують вплив різних механізмів державного субсидування громадського транспорту на рівень заповнюваності транспортних засобів та якість транспортного обслуговування пасажирів. Основна увага приділяється аналізу взаємозв'язку між державною підтримкою автобусних перевезень та середнім коефіцієнтом заповнюваності транспортних засобів (*average passenger load factor*). Автори зазначають, що в сучасних містах Китаю громадський транспорт виконує важливу соціальну функцію, тому держава підтримує перевізників шляхом надання субсидій. Водночас, незважаючи на постійне зростання обсягів фінансування, проблема переповненості транспортних засобів залишається актуальною. У дослідженні підкреслюється, що високий рівень заповнюваності

транспортних засобів має суперечливий характер. З одного боку, він сприяє підвищенню ефективності використання рухомого складу, зменшенню витрат палива на одного пасажирів, зниженню екологічного навантаження. З іншого боку, надмірна заповнюваність призводить до зниження комфортності перевезень, погіршення сприйняття якості транспортного сервісу, зростання часу посадки та висадки пасажирів та відмови пасажирів від використання громадського транспорту на користь приватного автомобіля.

У роботі запропоновано математичну модель транспортного забезпечення, засновану на мінімізації очікуваних втрат перевізника. Автори розглядають два типи втрат: втрати через надлишкову транспортну пропозицію (*ineffective supply loss*); втрати через недостатню транспортну пропозицію та неможливість перевезення пасажирів (*lack of service opportunity loss*).

Розглядаються чотири основні види субсидування громадського транспорту: фіксовані субсидії, субсидії залежно від кількості перевезених пасажирів, субсидії за кількість виконаних рейсів та стимулюючі субсидії з механізмом штрафів та заохочень. Ефективна система субсидування має враховувати попит на перевезення, місткість рухомого складу, частоту руху, комфортність перевезень, економічні інтереси перевізників та соціальні потреби населення. Автори наголошують, що головною метою державної транспортної політики має бути забезпечення оптимального рівня середнього коефіцієнту заповнюваності транспортних засобів, який дозволяє підтримувати комфортність перевезень, забезпечувати прийнятний час очікування, уникати переповнення транспортних засобів та раціонально використовувати транспортні ресурси.

У статті також враховується так званий ефект Морінга (*Mohring effect*), згідно з яким покращення транспортного обслуговування та збільшення частоти руху можуть призводити до додаткового зростання попиту на

громадський транспорт. Це означає, що після покращення якості перевезень система може знову стикнутися з перевантаженням.

Найефективнішим підходом визначено поєднання субсидій за транспортну роботу та стимулюючих механізмів, які дозволяють одночасно покращити комфортність перевезень, знизити переповнення транспортних засобів, підвищити якість транспортного обслуговування та забезпечити ефективніше використання транспортних ресурсів.

У праці [19] досліджуються методи визначення та оцінювання коефіцієнта заповнюваності міського громадського транспорту. У статті зазначається, що в умовах активного розвитку міського громадського транспорту в Китаї особливого значення набуває оцінювання ефективності функціонування транспортної мережі. Одним із головних показників такої оцінки автори визначають коефіцієнт заповнюваності транспортних засобів.

У роботі проведено аналіз різних підходів до визначення коефіцієнта заповнюваності. Автори зазначають, що традиційні методи мають певні недоліки через до яких відносять наступні: нечіткість визначення показника, різний часовий інтервал оцінювання, відмінності у виборі базового пасажиропотоку та неврахування нерівномірності пасажирських потоків. Розглянуто кілька варіантів визначення рівня заповнюваності: коефіцієнт заповнення ділянки маршруту, середній коефіцієнт заповнення маршруту, піковий коефіцієнт заповнюваності та середній коефіцієнт заповнення транспортної мережі загалом. Автори пропонують використання максимального пасажиропотоку на найбільш завантаженій ділянці маршруту як основи для оцінювання ефективності роботи транспортної системи.

Автори підкреслюють, що саме максимальне значення заповнюваності є найбільш інформативним показником, оскільки воно дозволяє оцінити критичні умови роботи транспортної системи у години пік. Значення коефіцієнта понад 0,8 свідчать про високе навантаження на транспортну систему та потребу в удосконаленні організації перевезень.

Також увагу приділено аналізу нерівномірності пасажиропотоків. Автори вводять поняття коефіцієнта дисбалансу (*imbalance coefficient*) пасажиропотоку, який характеризує різницю між транспортним попитом за напрямками руху в години пік. При цьому наведено градацію цього показника: коефіцієнт до 1,2 свідчить про відносно рівномірний розподіл пасажирів, коефіцієнт понад 1,2 вказує на виражений маятниковий характер перевезень. Автори пов'язують наявність маршрутів із найбільш вираженим дисбалансом пасажиропотоків у ранкові та вечірні години пік з особливостями розселення населення та функціональним зонуванням міста.

У праці [20] автори досліджують формування комплексної системи оцінювання ефективності функціонування громадського транспорту на основі показників якості транспортного обслуговування та провізної спроможності. Автори зазначають, що в умовах розвитку конкурентного середовища у сфері громадського транспорту виникає необхідність створення універсальної системи оцінювання якості та ефективності транспортного обслуговування. Така система повинна дозволяти: оцінювати роботу окремих елементів транспортної мережі, аналізувати маршрути та їх ділянки, оцінювати ефективність транспортної системи загалом, визначати проблемні ділянки функціонування транспорту. Значну увагу автори приділяють взаємозв'язку між провізною спроможністю та якістю транспортного обслуговування. У статті зазначається, що ефективність громадського транспорту повинна оцінюватися не лише за технічною пропускнуною спроможністю, але й з урахуванням комфортності перевезень та впливу рівня заповнення транспортних засобів на стабільність роботи системи. Автори виділяють чотири рівні провізної спроможності: теоретична місткість, експлуатаційна місткість, комфортно-орієнтована місткість та фактична місткість у змішаному транспортному потоці.

У роботі підкреслюється, що саме комфортно-орієнтована місткість (*comfort-oriented capacity*) є найбільш важливою для оцінювання якості перевезень, оскільки вона враховує небажання пасажирів користуватись

переповненим транспортом. Особливе значення у роботі приділяється показнику щільності стоячих пасажирів у салоні транспортного засобу (*standing passenger density*). Автори розглядають цей показник як основний критерій оцінювання рівня заповнення транспорту. Згідно до запропонованої шкали оцінювання рівня транспортного сервісу залежно від щільності пасажирів у салоні виділено три категорії:

- низька щільність пасажирів практично не впливає на тривалість посадки та висадки;
- середній рівень заповнення викликає помірне збільшення часу обслуговування;
- високий рівень заповнюваності суттєво погіршує функціонування маршрутів.

На підставі проведеного аналізу було схематично представлено основні напрями оптимізації заповнюваності транспортних засобів (див. рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Основні напрями оптимізації заповнюваності транспортних засобів

Узагальнюючи проведений аналіз слід зазначити наступне.

Рівень заповнюваності транспортних засобів є одним із найважливіших показників ефективності роботи системи перевезень. Недостатня заповнюваність призводить до неефективного використання рухомого складу та зростання витрат на перевезення, тоді як надмірне переповнення погіршує комфорт поїздки, збільшує час посадки та висадки пасажирів, знижує якість

транспортного обслуговування та негативно впливає на привабливість громадського транспорту.

Оптимальний рівень заповнюваності повинен забезпечувати баланс між економічною ефективністю перевезень та комфортністю транспортного обслуговування пасажирів. Досягнення такого балансу можливе за рахунок оптимізації розкладів руху, використання транспортних засобів різної місткості, урахування нерівномірності пасажиропотоків, впровадження інтелектуальних транспортних систем та сучасних методів прогнозування транспортного попиту.

Рациональне управління заповнюваністю транспортних засобів дозволяє підвищити ефективність використання провізної спроможності маршрутів, скоротити витрати перевізників, зменшити енергоспоживання та обсяги шкідливих викидів, а також підвищити якість транспортного обслуговування населення. Таким чином, оптимізація заповнюваності транспортних засобів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності функціонування міського громадського транспорту та забезпечення сталого розвитку транспортних систем сучасних міст.

1.5 Висновки по розділу

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що громадський транспорт є ключовим елементом забезпечення сталої мобільності сучасних міст, оскільки саме він дозволяє зменшити негативні наслідки надмірної автомобілізації, зокрема транспортні затори, екологічне забруднення, надмірне споживання енергетичних ресурсів та неефективне використання міського простору. Ефективне функціонування системи громадського транспорту безпосередньо впливає на економічний розвиток міст, соціальну доступність перевезень та якість життя населення.

2. Встановлено, що серед основних проблем функціонування міського пасажирського транспорту слід виділити недостатній рівень фінансування,

зношеність рухомого складу, низький рівень цифровізації, недосконалість систем управління, слабку інтеграцію транспортного планування та екологічні проблеми. Наявність зазначених недоліків призводить до зниження конкурентоспроможності громадського транспорту порівняно з індивідуальними автомобілями.

4. На підставі аналізу наукових досліджень визначено, що рівень заповнюваності транспортних засобів є одним із найважливіших показників ефективності роботи системи перевезень. Недостатня заповнюваність призводить до неефективного використання рухомого складу та зростання витрат на перевезення, тоді як надмірне переповнення погіршує комфорт поїздки, збільшує час посадки та висадки пасажирів, знижує якість транспортного обслуговування та негативно впливає на привабливість громадського транспорту.

5. Встановлено, що оптимальний рівень заповнюваності повинен забезпечувати баланс між економічною ефективністю перевезень та комфортністю транспортного обслуговування пасажирів. Досягнення такого балансу можливе за рахунок оптимізації розкладів руху, використання транспортних засобів різної місткості, урахування нерівномірності пасажиропотоків, впровадження інтелектуальних транспортних систем та сучасних методів прогнозування транспортного попиту.

6. Проведений аналіз показав, що раціональне управління заповнюваністю транспортних засобів дозволяє підвищити ефективність використання провізної спроможності маршрутів, скоротити витрати перевізників, зменшити енергоспоживання та обсяги шкідливих викидів, а також підвищити якість транспортного обслуговування населення. Таким чином, оптимізація заповнюваності транспортних засобів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності функціонування міського громадського транспорту та забезпечення сталого розвитку транспортних систем сучасних міст.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАПОВНЮВАНOSTІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

2.1 Вибір критерію оптимізації

Одним із ключових етапів розроблення моделі оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту є вибір критерію оптимізації, який дозволяє визначити раціональні параметри організації перевезень. Від правильного вибору критерію оптимізації залежить обґрунтованість прийнятих рішень щодо кількості транспортних засобів на маршруті, рівня їх заповнення, інтервалу руху та якості транспортного обслуговування пасажирів.

У системах міського пасажирського транспорту оптимізація перевізного процесу повинна враховувати інтереси як перевізника, так і пасажирів. Для перевізника основними показниками ефективності є рівень експлуатаційних витрат, продуктивність використання рухомого складу та рентабельність перевезень. Для пасажирів пріоритетними є мінімізація часу очікування транспортних засобів, комфортність поїздки, доступність транспортного обслуговування та надійність роботи маршруту. У зв'язку з цим використання лише окремих локальних критеріїв, наприклад мінімізації витрат перевізника або максимізації прибутку, не дозволяє забезпечити комплексну ефективність функціонування громадського транспорту.

Під час вибору критерію оптимізації заповнюваності транспортних засобів необхідно враховувати, що надмірне скорочення кількості автобусів на маршруті призводить до підвищення рівня заповнення салонів, збільшення часу очікування пасажирів та погіршення комфортності перевезень.

Водночас надмірне збільшення кількості транспортних засобів забезпечує покращення умов перевезення, однак супроводжується значним зростанням

експлуатаційних витрат перевізника та неефективним використанням рухомого складу. Таким чином, задача оптимізації має компромісний характер і потребує застосування інтегрального критерію, який враховує економічні та соціальні аспекти функціонування маршруту.

Як критерій оптимізації заповнюваності транспортних засобів доцільно використовувати мінімум сумарних витрат перевізника та пасажирів. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити ефективність організації перевезень і забезпечити баланс між витратами транспортного підприємства та якістю транспортного обслуговування населення. Сумарні витрати можуть бути подані у вигляді:

$$B_{\text{заг}} = B_{\text{АТП}} + B_{\text{ПАС}}, \quad (2.1)$$

де $B_{\text{АТП}}$, $B_{\text{ПАС}}$ - відповідно експлуатаційні витрати перевізника та витрати часу пасажирів приведені до грошового вираження, грн.

Вказані види витрат необхідно подати у формі математичних залежностей з урахуванням факторів, що впливають на їх величину.

2.2 Витрати перевізника

Величина експлуатаційних витрат перевізника безпосередньо впливає на економічну ефективність функціонування маршруту та визначає доцільність зміни параметрів організації перевезень.

Експлуатаційні витрати перевізника формуються під впливом обсягу транспортної роботи, кількості автобусів на маршруті, тривалості їх роботи, довжини маршруту та технічних характеристик рухомого складу. До складу експлуатаційних витрат входять витрати на паливо, технічне обслуговування і ремонт автобусів, оплату праці водіїв, амортизаційні відрахування, витрати на шини, мастильні матеріали та інші витрати, пов'язані з експлуатацією транспортних засобів.

Експлуатаційні витрати поділяють на змінні та постійні. Змінні витрати безпосередньо залежать від пробігу транспортних засобів і змінюються пропорційно обсягу транспортної роботи. До них належать витрати на паливо, мастильні матеріали, технічне обслуговування, ремонт, зношування шин тощо. Постійні витрати визначаються тривалістю роботи автобусів на маршруті та включають оплату праці водіїв, амортизаційні відрахування, адміністративні витрати та інші витрати, що не залежать безпосередньо від величини пробігу.

Згідно до праць [21, 22] експлуатаційні витрати можуть бути визначені за формулою:

$$B_{ATP} = \left[B_{зм}(q_n) + \frac{B_{пост}(q_n)}{V_e} \right] \cdot \tau \cdot A \cdot V_e. \quad (2.2)$$

де $B_{зм}$ - змінні витрати, грн./км;

$B_{пост}$ - постійні витрати грн./год;

V_e - експлуатаційна швидкість, км/год;

τ - тривалість аналізованого періоду, год;

A - кількість транспортних засобів на маршруті у період τ , од.

На наступному етапі здійснюється формалізація витрат пасажирів шляхом подання їх у вигляді відповідних математичних залежностей.

2.3 Витрати пасажирів

На відміну від витрат перевізника, які мають переважно економічний характер, витрати пасажирів відображають рівень якості транспортного обслуговування населення та характеризують часові втрати, які виникають під час користування громадським транспортом. Урахування витрат пасажирів дозволяє оцінити ефективність організації перевезень не лише з позиції транспортного підприємства, а й з точки зору потреб населення.

Основну частину витрат пасажирів формують витрати часу на підхід до зупинок громадського транспорту, очікування транспортного засобу та безпосереднє здійснення поїздки. Величина цих витрат значною мірою залежить від параметрів організації перевезень, зокрема інтервалу руху автобусів, рівня заповнення салонів транспортних засобів тощо.

Для можливості використання витрат пасажирів у моделі оптимізації їх доцільно подати у вартісному вираженні через оцінку витрат часу пасажирів.

Витрати часу на підхід до зупинок визначаються залежно від щільності транспортної мережі, середньої швидкості руху пішохода та умов розташування зупинок [21, 22]:

$$t_{\text{підх}} = \frac{2 \cdot K_{\text{підх}} \cdot K_{\text{вб}}}{V_{\text{підх}}} \left(\frac{1}{3 \cdot \delta} + \frac{l_{\text{пер}}}{4} \right), \quad (2.3)$$

де $K_{\text{підх}}$, $K_{\text{вб}}$ – коефіцієнти непрямолінійності підходу та вибору зупинки;

$V_{\text{підх}}$ – швидкість руху пішохода, км/год;

δ – щільність маршрутної мережі, км/км²;

$l_{\text{пер}}$ – середня довжина перегону маршруту, км.

Витрати часу на очікування транспортного засобу безпосередньо залежать від часу обертів та кількості автобусів, що працюють на маршруті [21, 22]:

$$t_{\text{оч}} = \frac{l_{\text{м}} \cdot (1 + a^2)}{V_{\text{е}} \cdot A}, \quad (2.4)$$

де a – коефіцієнт, що характеризує нерегулярність руху автобусів;

$l_{\text{м}}$ – довжина маршруту, км.

Витрати часу на поїздки визначаються залежно від середньої відстані поїздки пасажирів та швидкості сполучення.

Важливим фактором, що впливає на величину витрат пасажирів, є рівень заповнення транспортних засобів. При надмірному заповненні салонів погіршуються умови перевезення, збільшується час посадки та висадки пасажирів, а також знижується комфортність поїздки. Тому під час оптимізації перевізного процесу необхідно забезпечувати раціональний рівень заповнення автобусів, який дозволяє підтримувати належну якість транспортного обслуговування.

З урахуванням зазначеного витрати пасажирів можуть бути представлені у грошовому вимірюванні наступним чином:

$$B_{ПАС} = Q_{заг} \cdot C_{год} \cdot (t_{ниш} + t_{оч}) + Q_{прям} \cdot C_{год} \cdot t_{поїзд}^{прям} \cdot (1 + \varepsilon_d \cdot \alpha_{прям}) + Q_{звор} \cdot t_{поїзд}^{звор} \cdot C_{год} \cdot (1 + \varepsilon_d \cdot \alpha_{звор}), \quad (2.5)$$

де $C_{год}$ - вартісна оцінка витрат часу, грн./год;

ε_d - коефіцієнт, що характеризує вплив рівня заповнення на дискомфорт пасажирів;

$Q_{заг}$ - сумарний обсяг перевезень на маршруті у період τ , пас.;

$Q_{прям}$, $Q_{звор}$ - обсяг перевезень у прямому та зворотному напрямку маршруту, пас.;

$t_{поїзд}^{прям}$, $t_{поїзд}^{звор}$ - відповідно середній час здійснення поїздки у транспортному засобі у прямому та зворотному напрямках руху, год;

$\alpha_{прям}$, $\alpha_{звор}$ - відповідно рівень заповнення транспортного засобу під час здійснення поїздки у прямому та зворотному напрямках руху, пас./м².

Сумарний обсяг перевезень на маршруті може бути визначений за формулою:

$$Q_{\text{заг}} = \frac{F_{\text{max}} \cdot \eta_{\text{зм}}^{\text{прям}}}{K_{\text{довж}}} \cdot \left(1 + \frac{k_{l_{\text{cp}}}}{K_{\text{напр}}}\right). \quad (2.6)$$

де F_{max} - максимальний пасажиропотік, пас./год;

$k_{l_{\text{cp}}}$ - коефіцієнт відношення середньої довжини поїздки пасажирів у прямому та зворотному напрямках;

$\eta_{\text{зм}}^{\text{прям}}$ - коефіцієнт змінюваності у прямому напрямку руху;

$K_{\text{довж}}$, $K_{\text{напр}}$ - коефіцієнти нерівномірності пасажиропотоку за довжиною та напрямками руху.

2.4 Цільова функція оптимізації

З урахуванням представлених залежностей цільова функція оптимізації:

$$\begin{aligned} B_{\text{ЗАГ}} = & \tau \cdot A \cdot V_e \left[B_{\text{зм}}(q_n) + \frac{B_{\text{пост}}(q_n)}{V_e} \right] + \frac{F_{\text{max}} \cdot C_{\text{зод}} \cdot \eta_{\text{зм}}^{\text{прям}}}{K_{\text{довж}}} \cdot \left(1 + \frac{k_{l_{\text{cp}}}}{K_{\text{напр}}}\right) \times \\ & \times \left[\frac{2 \cdot K_{\text{ин}} \cdot K_{\text{вз}}}{V_{\text{ниш}}} \left(\frac{1}{3 \cdot \delta} + \frac{l_{\text{пер}}}{4} \right) + \frac{l_m \cdot (1 + \alpha^2)}{V_e \cdot A} \right] + \\ & + \frac{F_{\text{max}} \cdot l_m \cdot C_{\text{зод}}}{K_{\text{довж}} \cdot V_c} \cdot \left[\left(1 + \frac{\varepsilon_d \cdot \alpha_n}{1 - \mu(\alpha_n)} \left(\frac{2 \cdot l_m \cdot F_{\text{max}}}{K_{\text{довж}} \cdot q_n \cdot A \cdot V_e \cdot \tau} - \mu(\alpha_n) \right) \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{K_{\text{напр}}} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_d \cdot \alpha_n}{1 - \mu(\alpha_n)} \left(\frac{2 \cdot l_m \cdot F_{\text{max}}}{K_{\text{напр}} \cdot K_{\text{довж}} \cdot q_n \cdot A \cdot V_e \cdot \tau} - \mu(\alpha_n) \right) \right) \right] \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де V_e - швидкість сполучення на маршруті, км/год;

α_n - максимально допустимий рівень заповнення салону транспортного засобу, пас./м²;

$\mu(\alpha_n)$ - частка місць для проїзду пасажирів сидячі у номінальній пасажиромісткості автобусу.

Згідно до цільової функції, в якості керованої змінної виступає кількість транспортних засобів, що працюють на маршруті. Результат оптимізації має забезпечувати рівень заповнення салону автобусу, що не перевищує допустимого рівня (8 пас./м²).

2.5 Висновки по розділу

Обґрунтовано вибір критерію оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту, який базується на мінімізації сумарних витрат перевізника та пасажирів. Встановлено, що використання локальних критеріїв, орієнтованих виключно на інтереси перевізника або пасажирів, не забезпечує комплексної оцінки ефективності функціонування транспортної системи. Тому для розв'язання задачі оптимізації доцільно використовувати інтегральний критерій, який враховує як економічні, так і соціальні аспекти організації перевезень.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАПОВНЮВАНOSTІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ

3.1 Методика оптимізації заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах

Оптимізація заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах є важливим напрямом підвищення ефективності функціонування системи громадського транспорту. Рациональний рівень заповнення автобусів дозволяє забезпечити баланс між економічною ефективністю роботи перевізника та комфортністю транспортного обслуговування пасажирів.

Проводити оптимізацію будемо відповідно до схеми, що наведена на рис. 3.1. Основною метою методики є визначення таких параметрів організації перевезень, за яких досягається мінімізація сумарних витрат перевізника та пасажирів при забезпеченні належної якості транспортного обслуговування.

Методика оптимізації заповнюваності транспортних засобів передбачає послідовне виконання декількох етапів. На першому етапі здійснюється формування вихідних даних щодо функціонування автобусного маршруту.

Для цього визначаються основні техніко-експлуатаційні характеристики маршруту, зокрема довжина маршруту, експлуатаційна швидкість руху, час обертів автобусів, тип та кількість рухомого складу, пасажиромісткість автобусів, параметри пасажиропотоків, а також показники нерівномірності пасажиропотоків. Крім того, враховуються середня дальність поїздки пасажирів, коефіцієнти змінюваності пасажирів, щільність транспортної мережі та показники, що характеризують умови підходу пасажирів до зупинок громадського транспорту.

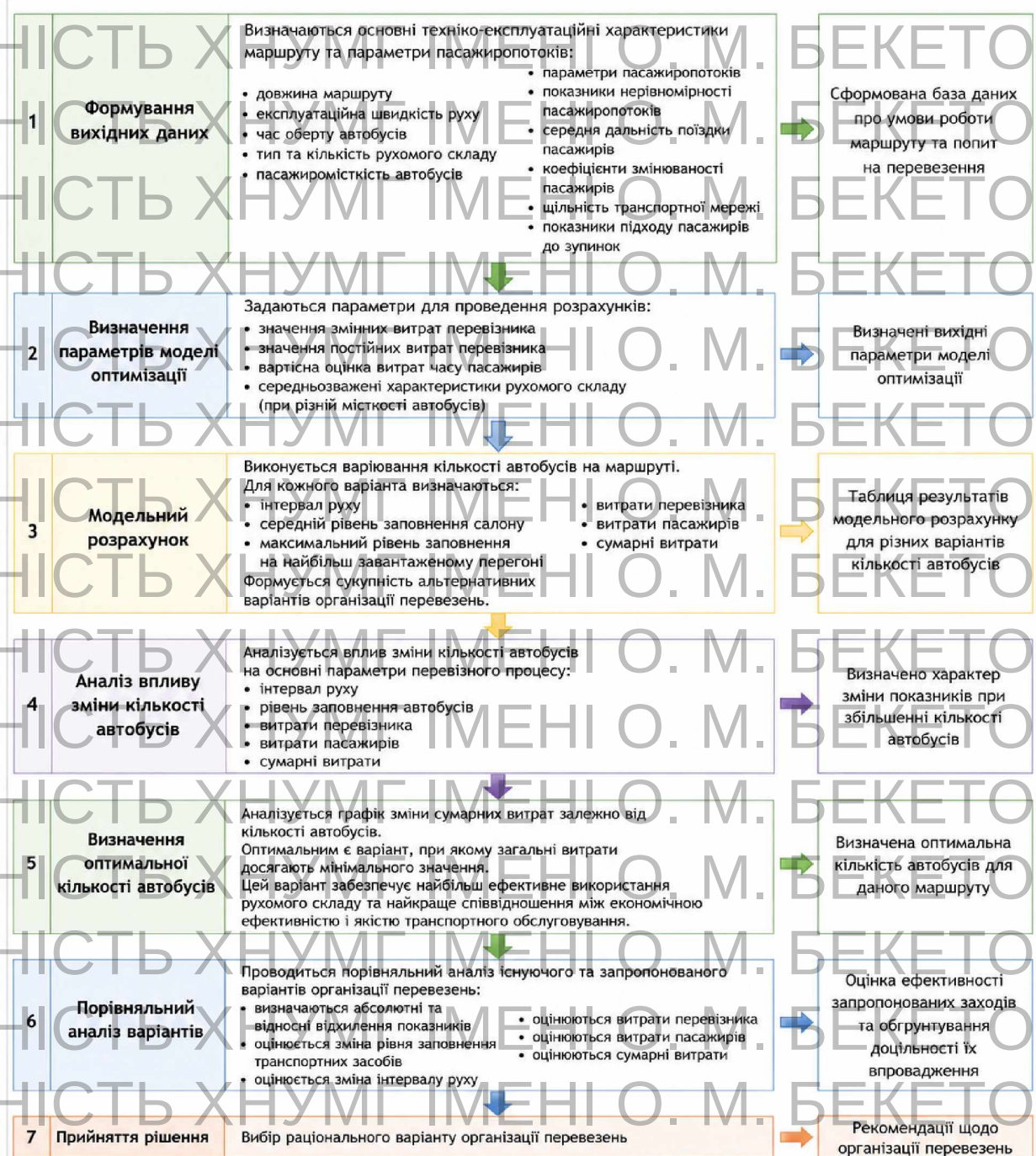


Рисунок 3.1 – Схема методики оптимізації заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах

Наступним етапом виконується визначення параметрів моделі оптимізації. Для проведення розрахунків задаються значення змінних та постійних витрат перевізника, вартісна оцінка витрат часу пасажирів, а також середньозважені характеристики рухомого складу у випадку використання автобусів різної місткості. Це дозволяє врахувати як економічні показники

функціонування маршруту, так і показники якості транспортного обслуговування пасажирів.

Оснoву методики становить проведення модельного розрахунку шляхом варіювання кількості автобусів на маршруті. Для кожного варіанта кількості транспортних засобів визначаються значення інтервалу руху, середнього рівня заповнення салону автобусів, максимального рівня заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту, витрат перевізника, витрат пасажирів та сумарних витрат. Таким чином формується сукупність альтернативних варіантів організації перевезень, які можуть бути використані для подальшого аналізу та вибору раціонального рішення.

Під час проведення модельного розрахунку аналізується вплив зміни кількості автобусів на основні параметри перевізного процесу.

Ключовим етапом методики є визначення оптимальної кількості автобусів. Для цього аналізується графік зміни сумарних витрат перевізника та пасажирів залежно від кількості автобусів. Оптимальним вважається варіант, при якому загальні витрати досягають мінімального значення. Саме цей варіант забезпечує найбільш ефективне використання рухомого складу та найкраще співвідношення між економічною ефективністю і якістю транспортного обслуговування.

Завершальним етапом методики є проведення порівняльного аналізу існуючого та запропонованого варіантів організації перевезень. На цьому етапі визначаються абсолютні та відносні відхилення параметрів перевізного процесу, оцінюється зміна рівня заповнення транспортних засобів, інтервалу руху, витрат перевізника, витрат пасажирів та сумарних витрат. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність запропонованих заходів та обґрунтувати доцільність їх впровадження на практиці.

3.2 Формування вихідних даних

Для оптимізації заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах було розглянуто автобусний маршрут № 9, що працює у м. Львів. Схема маршруту зображена на рис. 3.2.

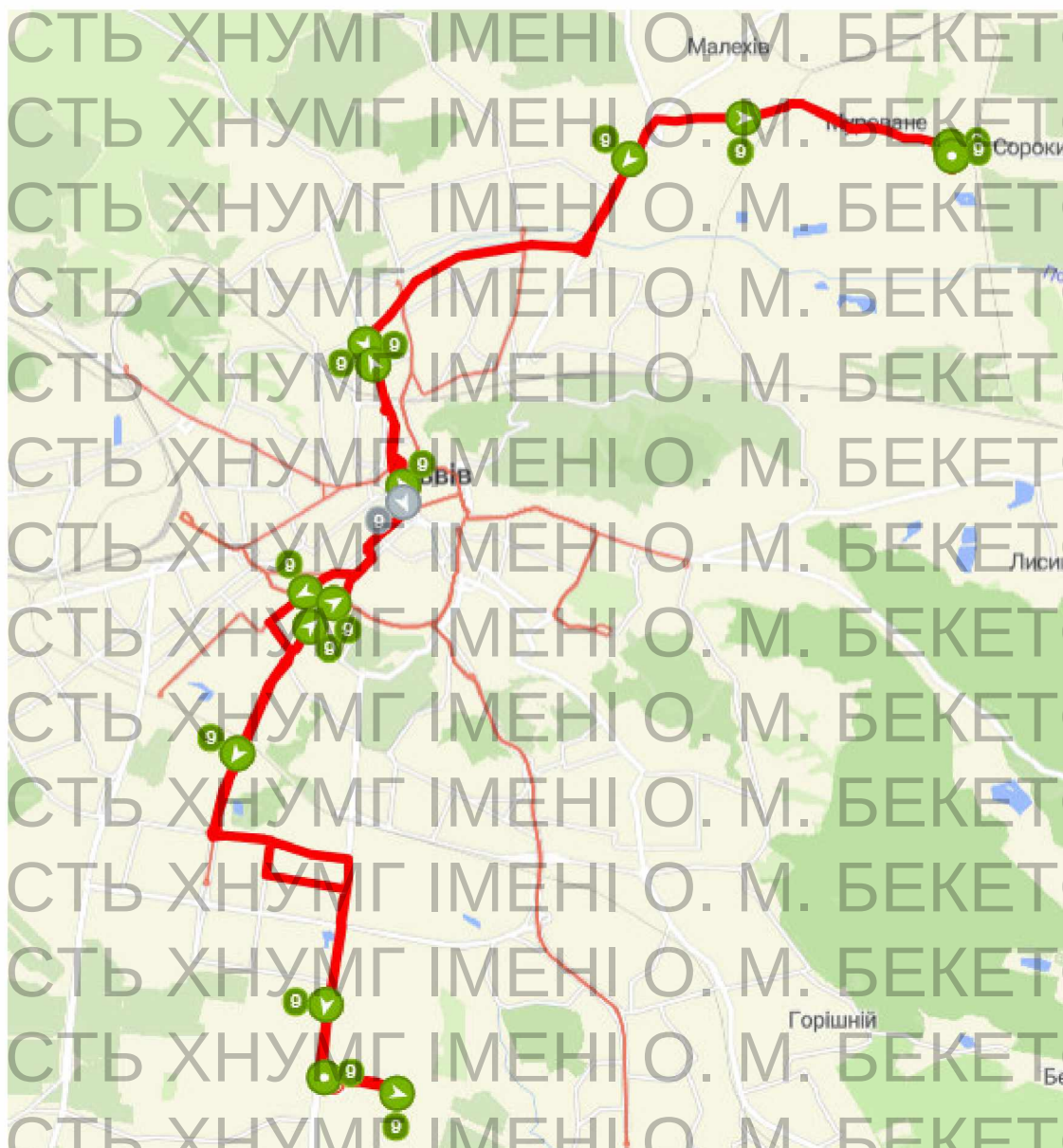


Рисунок 3.2 – Схема маршруту № 9 (м. Львів)

Автобусний маршрут №9 «с. Муроване – Автовокзал» є одним із важливих маршрутів Львова, який забезпечує транспортне сполучення між

північною приміською зоною, центральною частиною міста та південним транспортним вузлом автовокзалом на вул. Стрийській. Маршрут обслуговується комунальним перевізником ЛК АТП №1 та виконує важливу функцію підвезення мешканців с. Муроване і прилеглих територій до центральних районів Львова. Маршрут обслуговується комунальним перевізником ЛК АТП №1 та виконує важливу функцію підвезення мешканців с. Муроване і прилеглих територій до центральних районів Львова.

Найбільш завантаженими ділянками маршруту є: Галицьке перехрестя – Автостанція №2; проспект Чорновола; центральна частина міста; вул. Стрийська – Автовокзал.

Для маршруту характерний виражений маятниковий пасажиропотік. У ранкові години пік спостерігається переважання перевезень у напрямку центральної частини міста, а у вечірні години у напрямку с. Муроване.

Параметри організації перевезень на маршруті у ранкову годину пік представлено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри організації перевезень на маршруті

№ з/п	Показник	Значення
1	2	4
1	Сполучення	с. Муроване - Автовокзал
2	Довжина маршруту, км	18,48
3	Середня довжина перегону маршруту, км	0,49
4	Марка та кількість автобусів	Electron A185 (6 од.); Богдан А701 (5 од.); МАЗ 203 (3 од.)
5	Пасажиромісткість автобусів	Electron A185 (115 пас.); Богдан А701 (106 пас.); МАЗ 203 (105 пас.)
6	Кількість місць для сидіння	Electron A185 (35 місць); Богдан А701 (34 місць); МАЗ 203 (30 місць)
7	Експлуатаційна швидкість, км/год	18,5
8	Час оберт, хв.	120
9	Швидкість сполучення, км/год	22,1

Продовження табл. 3.1

1	2	4
10	Максимальний пасажиропотік на маршруті, пас./год	720
11	Обсяг перевезень (у годину пік), пас.	2018
12	Коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку за довжиною маршруту	1,65
13	Коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку за напрямками руху	1,18
14	Середня відстань поїздки пасажирів у (прямий напрямок)	7,21
15	Середня відстань поїздки пасажирів (зворотний напрямок)	6,84
16	Коефіцієнт змінюваності пасажирів (прямий напрямок)	2,56
17	Коефіцієнт змінюваності пасажирів (зворотний напрямок)	2,70

Значення інших показників, що містяться у моделі оптимізації заповнюваності транспортних засобів приймали: коефіцієнт непрямолінійності підходу пасажирів до зупинок – 1,20; коефіцієнт вибору зупинок – 1,17; середня швидкість руху пішохода – 4 км/год; щільність транспортної мережі – 2,68 км/км²; коефіцієнт моделі a – 0,218; коефіцієнт моделі ε_d – 0,087; вартісна оцінка витрат часу пасажирів – 74,22 грн./год.

Оскільки на маршруті працює різномарочний рухомий склад, то під час проведення розрахунків використовували середньозважені значення номінальної пасажиромісткості автобусів та кількості місць для сидіння.

Середньозважена пасажиромісткість автобусів дорівнює 110 пас., а середньозважена кількість місць для сидіння – 34 місця.

Величину змінних витрат приймали – 45,44 грн./км, постійні витрати – 388,51 грн./год.

Виходячи зі сформованих вихідних даних наступним кроком було проведено модельний розрахунок щодо оптимізації заповнюваності автобусів на маршруті.

3.3 Проведення модельного розрахунку

Під час проведення модельного розрахунку виконували варіювання кількості автобусів в діапазоні від 12 до 27 од. Для кожного значення кількості автобусів визначали величину інтервалу руху, середній рівень заповнення на маршруті та рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні, експлуатаційні витрати перевізника, витрати пасажирів у грошовому вираженні та загальні витрати перевізника та пасажирів. Результати проведених розрахунків наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати модельного розрахунку

Кількість автобусів, од.	Інтервал руху, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Максимальний рівень заповнення, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
1	2	3	4	5	6	7
12	9,99	4,07	9,04	14749,8	59984,48	74734,28
13	9,22	3,48	8,07	15978,95	58071,31	74050,26
14	8,56	2,98	7,24	17208,1	56431,45	73639,55
15	7,99	2,54	6,52	18437,25	55010,24	73447,49
16	7,49	2,16	5,88	19666,4	53766,68	73433,08

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7
17	7,05	1,82	5,33	20895,55	52669,43	73564,98
18	6,66	1,52	4,83	22124,7	51694,1	73818,8
19	6,31	1,25	4,39	23353,9	50821,4	74175,3
20	5,99	1,01	3,99	24583,0	50036,0	74619,0
21	5,71	0,79	3,63	25812,2	49325,4	75137,6
22	5,45	0,59	3,30	27041,3	48728,0	75769,3
23	5,21	0,41	3,00	28270,5	48307,8	76578,3
24	4,99	0,24	2,73	29499,6	47922,7	77422,3
25	4,79	0,09	2,48	30728,8	47568,3	78297,1
26	4,61	0,00	2,24	31957,9	47305,7	79263,6
27	4,44	0,00	2,03	33187,1	47173,1	80360,2

За результатами модельного розрахунку побудовано графіки зміни інтервалу руху (рис. 3.3), середнього та максимального рівня заповнення на маршруті (рис. 3.4 та рис. 3.5), витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.6) та сумарних витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.7).

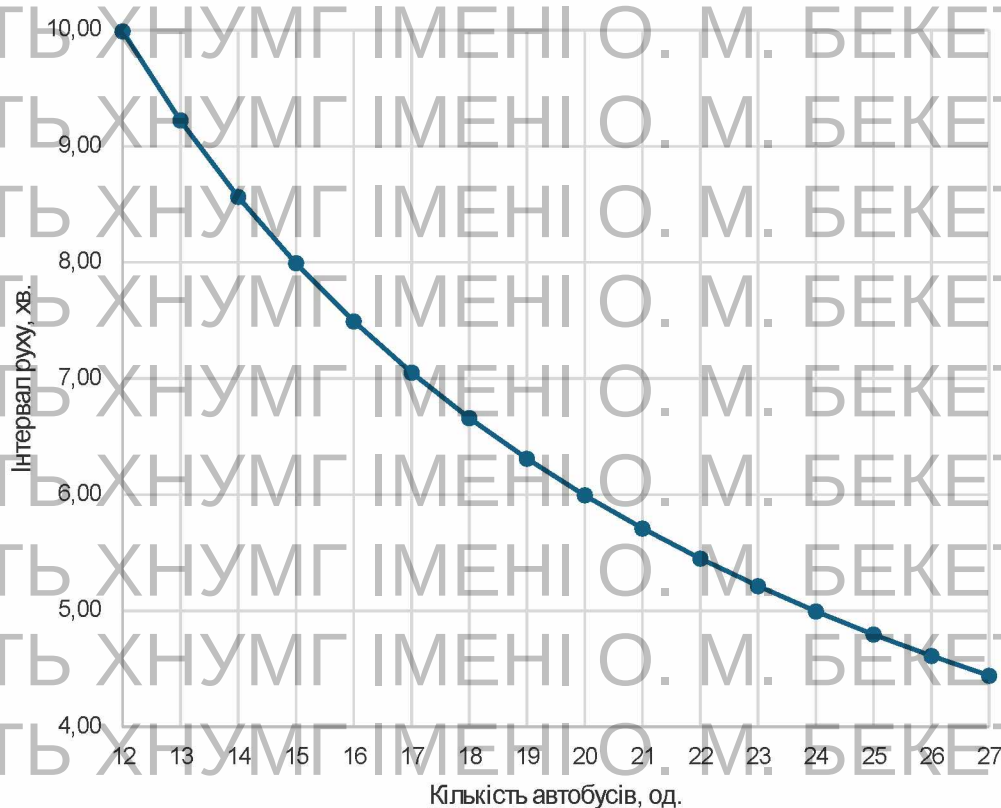


Рисунок 3.3 – Графік зміни інтервалу руху автобусів

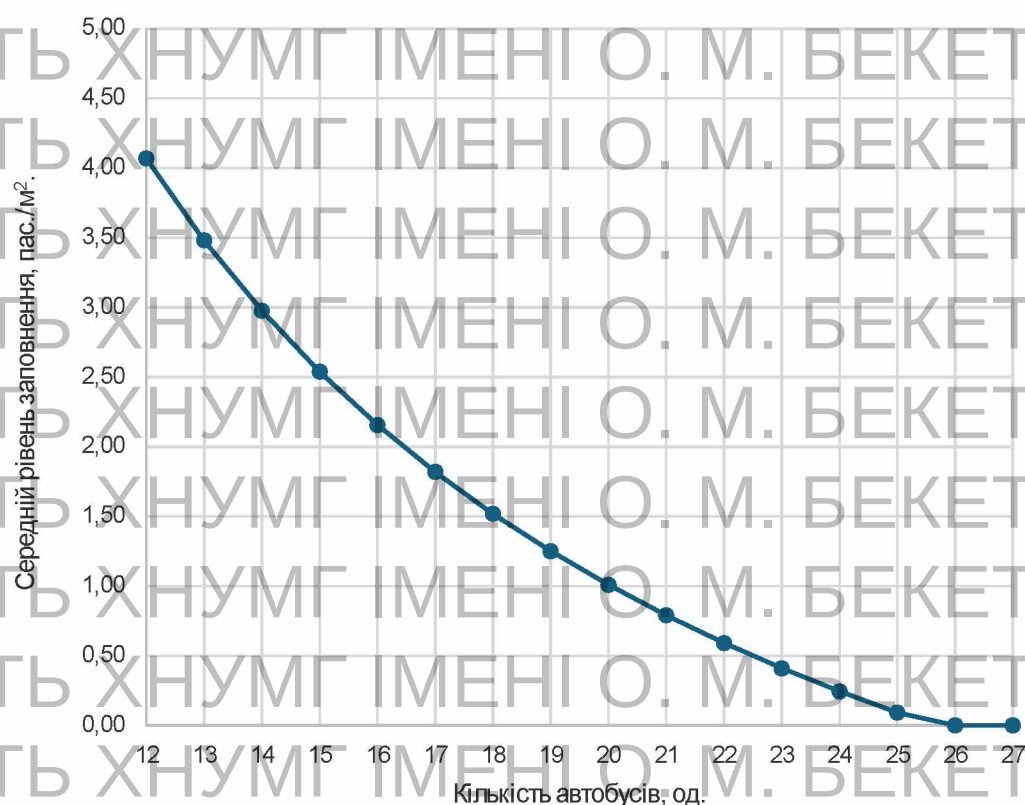


Рисунок 3.4 – Графік зміни середнього рівня заповнення салону автобусів

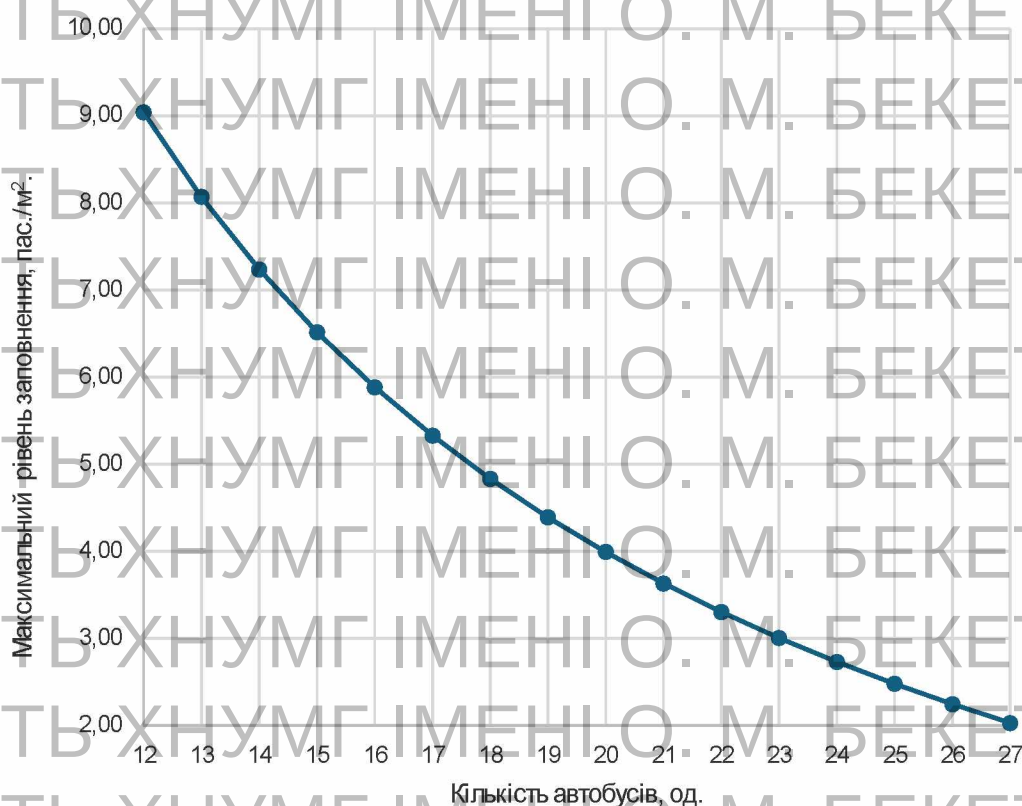


Рисунок 3.5 – Графік зміни максимального рівня заповнення салону автобусів

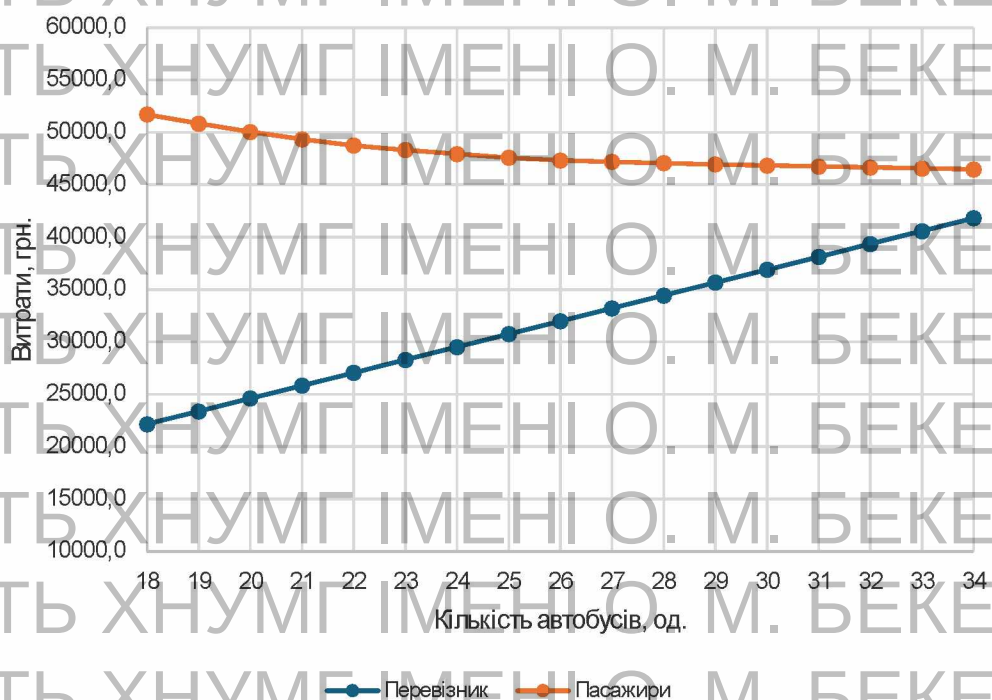


Рисунок 3.6 – Графік зміни витрат перевізника і пасажирів

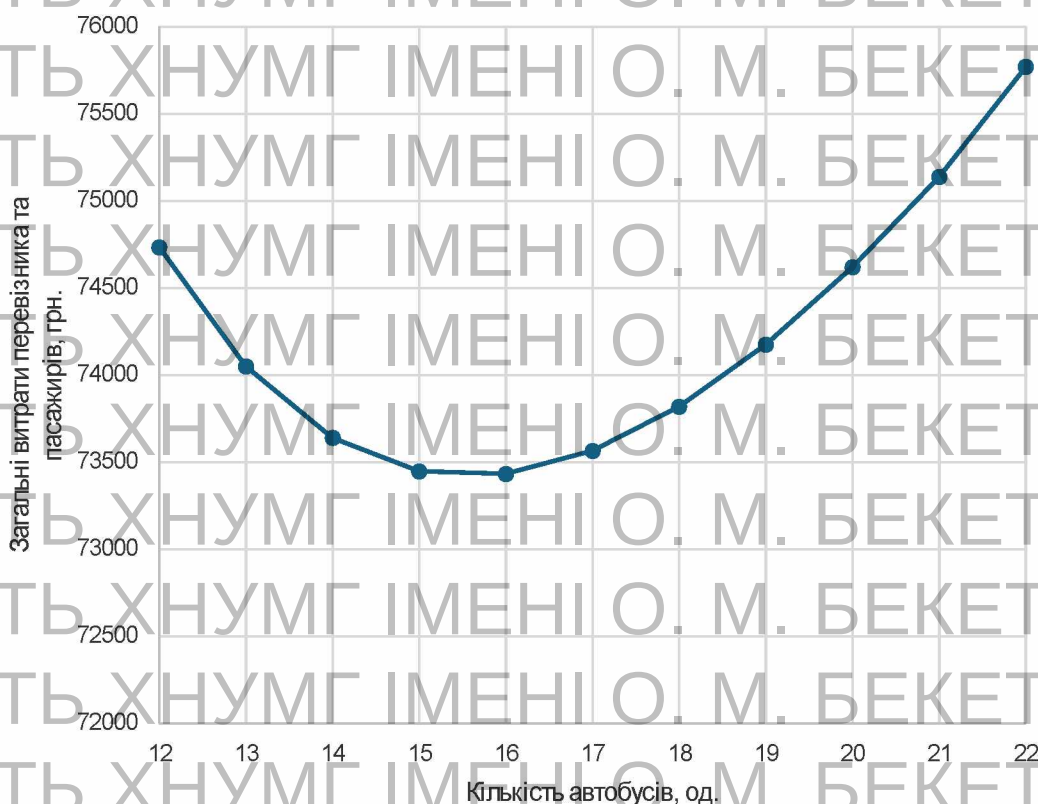


Рисунок 3.7 – Графік зміни загальних витрат перевізника і пасажирів

Аналіз графіка залежності інтервалу руху автобусів від кількості транспортних засобів на маршруті (рис. 3.3) показує, що зі збільшенням кількості автобусів від 12 до 27 од. інтервал руху поступово зменшується з 9,99 до 4,44 хв. Це свідчить про покращення транспортного обслуговування пасажирів за рахунок скорочення часу очікування автобусів на зупинках. При цьому характер зміни показника є нелінійним. Найбільш інтенсивне зменшення інтервалу спостерігається при збільшенні кількості автобусів на початковому етапі.

З рис. 3.4 видно, що зі збільшенням кількості транспортних засобів середній рівень заповнення зменшується з 4,07 до 2,03 пас./м². Це пояснюється підвищенням провізної спроможності маршруту. Зменшення середнього рівня заповнення позитивно впливає на комфортність перевезень та умови поїздки пасажирів. Аналогічно зменшується максимальний рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту зменшується з 9,04 до 2,03 пас./м² (див. рис. 3.5). Отримані результати свідчать про зниження рівня переповнення транспортних засобів у години найбільшого пасажиропотоку, що сприяє підвищенню якості транспортного обслуговування та покращенню умов перевезення пасажирів.

З рис. 3.6 можна побачити, що зі збільшенням кількості автобусів витрати перевізника поступово зростають, що пояснюється збільшенням транспортної роботи та експлуатаційних витрат. Одночасно витрати пасажирів зменшуються внаслідок скорочення часу очікування та покращення умов перевезення. Таким чином, графік демонструє наявність компромісу між інтересами перевізника та пасажирів при виборі раціональної кількості транспортних засобів на маршруті.

Графік зміни загальних витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.7) показує, що зі збільшенням кількості автобусів загальні витрати спочатку зменшуються, досягаючи мінімального значення, після чого починають зростати. Це свідчить про те, що оптимальної кількості автобусів на

маршруті, за якої забезпечується мінімум сумарних витрат перевізника та пасажирів дорівнює 16 од.

Наступним кроком переходимо до інтерпретації результатів модельного розрахунку.

3.4 Інтерпретація результатів модельного розрахунку

Інтерпретацію результатів модельного розрахунку проводимо на підставі проведення порівняльного аналізу існуючих та запропонованих параметрів перевізного процесу. Результати порівняльного аналізу існуючих та запропонованих параметрів перевізного процесу наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Результати порівняльного аналізу існуючих та запропонованих параметрів перевізного процесу

Кількість автобусів, од.	Інтервал руху, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Максимальний рівень заповнення, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
Існуючий варіант організації перевезень						
14	8,56	2,98	7,24	17208,1	56431,45	73639,55
Запропонований варіант організації перевезень						
16	7,49	2,16	5,88	19666,4	53766,68	73433,08
Зміна показників перевізного процесу						
<i>Абсолютне відхилення</i>						
+2	-1,07	-0,82	-1,36	+2458,3	-2665	-206,5
<i>Відносне відхилення, %</i>						
+14,29	-12,50	-27,52	-18,78	+14,29	-4,72	-0,28

На підставі даних табл. 3.3 було побудовано діаграми зміни параметрів перевізного процесу в результаті впровадження запропонованого варіанту організації перевезень (рис. 3.8 – 3.12).

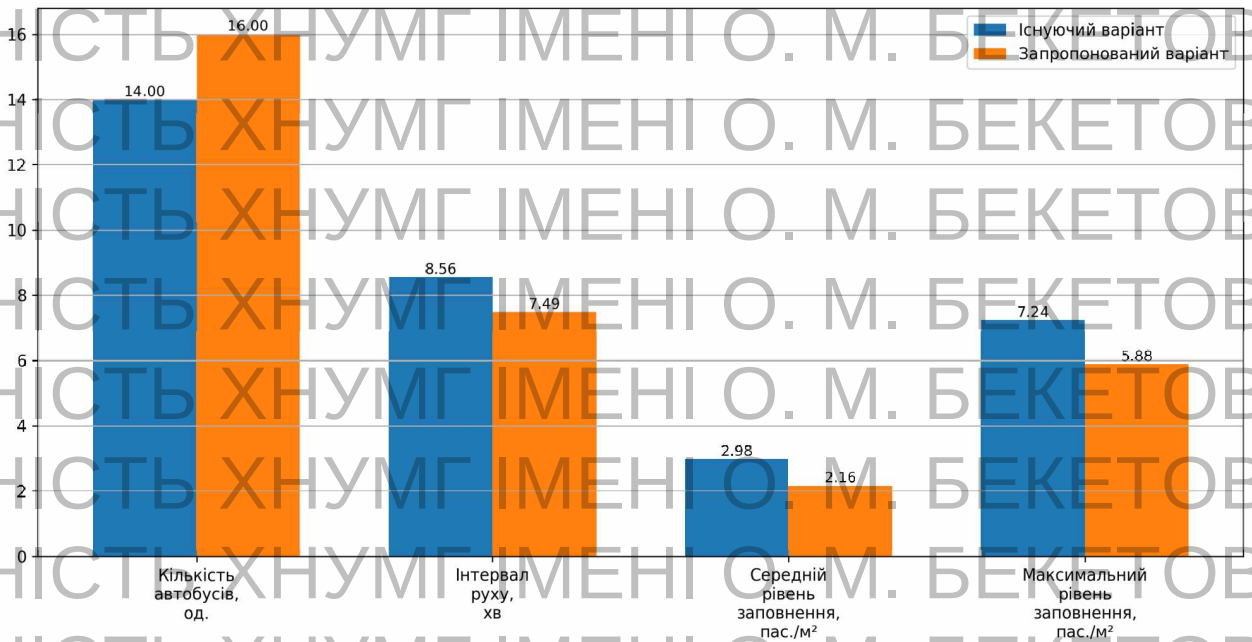


Рисунок 3.8 – Діаграма зміни параметрів перевізного процесу

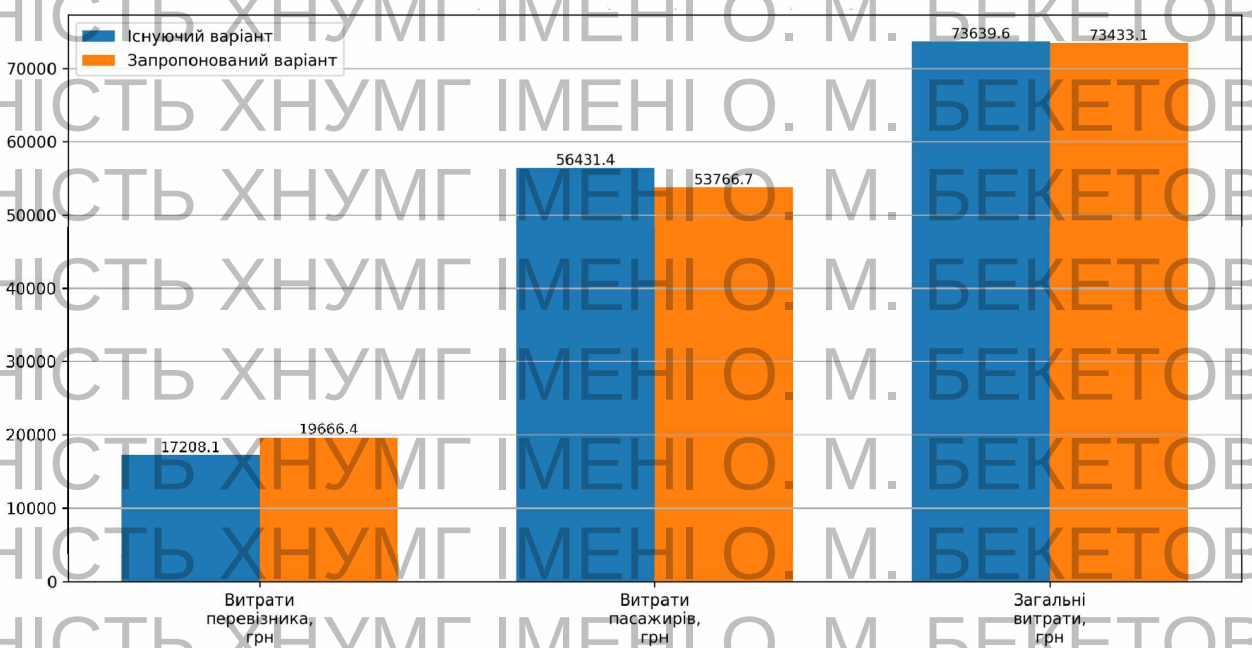


Рисунок 3.9 – Діаграма зміни витрат перевізника, пасажирів та загальних витрат



Рисунок 3.10 – Діаграма зміни абсолютних відхилень параметрів перевізного процесу

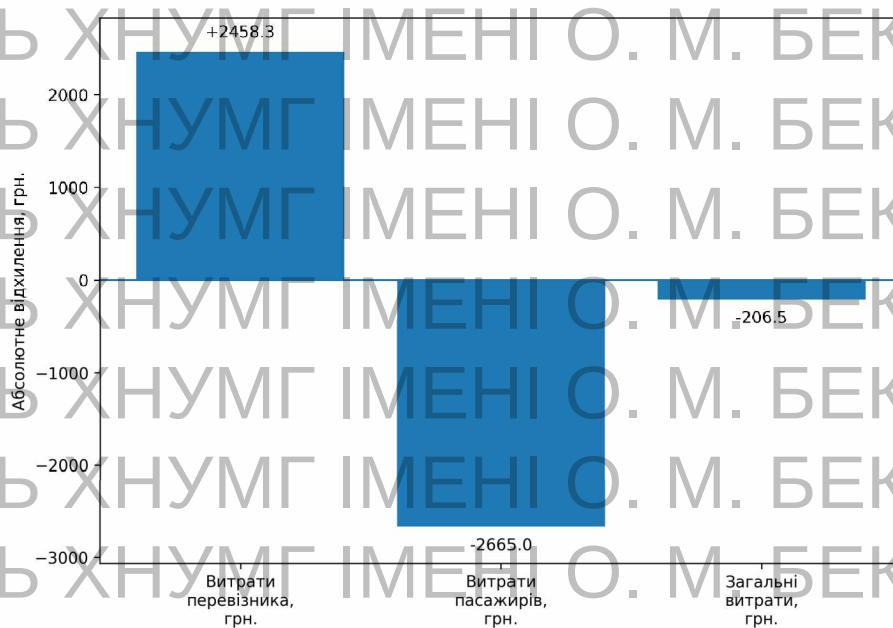


Рисунок 3.11 – Діаграма зміни абсолютних відхилень витрат перевізника, пасажирів та загальних витрат



Рисунок 3.12 – Діаграма зміни відносних відхилень показників перевізного процесу

Проведений порівняльний аналіз існуючого та запропонованого варіантів організації перевезень на автобусному маршруті показав вплив зміни параметрів перевезень на рівень транспортного обслуговування пасажирів та економічні показники роботи маршруту.

Запропонований варіант організації перевезень передбачає збільшення кількості автобусів на маршруті з 14 до 16 одиниць, тобто на 2 автобуси або на 14,29 %. Це дозволить зменшити інтервал руху з 8,56 до 7,49 хв., що сприятиме скороченню часу очікування транспорту пасажирями.

У результаті збільшення кількості рухомого складу спостерігається суттєве зниження рівня заповнення автобусів. Середній рівень заповнення зменшиться з 2,98 до 2,16 пас./м², тобто на 27,52 %, а максимальний рівень заповнення 7,24 до 5,88 пас./м² або на 18,78 %. Це свідчить про підвищення комфортності поїздок та покращення умов перевезення пасажирів, особливо у години пік.

Разом із тим збільшення кількості автобусів спричинить зростання витрат перевізника з 17208,1 до 19666,4 грн., що становить приріст на 2458,3 грн. або

14,29 %. Зростання витрат обумовлене збільшенням експлуатаційних витрат на паливо, технічне обслуговування автобусів, оплату праці водіїв тощо.

Водночас витрати пасажирів зменшаються з 56431,45 до 53766,68 грн., тобто на 2665 грн. або 4,72 %. Це пояснюється скороченням часу очікування транспорту та більш комфортними умовами здійснення поїздки з позиції рівня заповнення.

Загальні витрати перевізника та пасажирів у запропонованому варіанті також дещо зменшаються (з 73639,55 до 73433,08 грн.), тобто на 206,5 грн. або 0,28 %. Отримані результати свідчать про те, що запропонований варіант організації перевезень є більш ефективним, оскільки забезпечує покращення якості транспортного обслуговування населення при помірному зростанні експлуатаційних витрат перевізника.

3.5 Висновки по розділу

1. Розроблено методику оптимізації заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах, яка базується на визначенні раціональних параметрів організації перевезень з урахуванням економічних показників роботи перевізника та якості транспортного обслуговування пасажирів. Запропонована методика передбачає послідовне формування вихідних даних, визначення параметрів моделі оптимізації, проведення модельного розрахунку, аналіз отриманих результатів та порівняльну оцінку існуючого і запропонованого варіантів організації перевезень.

2. Для проведення дослідження було обрано міський автобусний маршрут №9 «с. Муроване – Автовокзал» у м. Львів, який характеризується значним пасажиропотоком та вираженою нерівномірністю перевезень у години пік. У ході дослідження сформовано вихідні дані, що характеризують техніко-експлуатаційні показники функціонування маршруту, параметри пасажиропотоків, рухомого складу та економічні показники перевізного процесу.

3. Проведений модельний розрахунок показав, що збільшення кількості автобусів на маршруті призводить до скорочення інтервалу руху та зниження рівня заповнення салонів автобусів. Встановлено, що зі збільшенням кількості автобусів від 12 до 27 од. інтервал руху зменшується з 9,99 до 4,44 хв., середній рівень заповнення – з 4,07 до 2,03 пас./м², а максимальний рівень заповнення – з 9,04 до 2,03 пас./м². Це свідчить про покращення комфортності перевезень та підвищення якості транспортного обслуговування пасажирів.

4. У результаті аналізу залежності загальних витрат перевізника та пасажирів від кількості автобусів встановлено, що мінімальне значення сумарних витрат досягається при використанні 16 автобусів на маршруті. Таким чином, визначено оптимальний варіант організації перевезень, який забезпечує найбільш ефективне співвідношення між витратами перевізника та рівнем транспортного обслуговування пасажирів.

5. Порівняльний аналіз існуючого та запропонованого варіантів організації перевезень показав, що впровадження запропонованих заходів дозволяє зменшити інтервал руху автобусів на 12,5 %, середній рівень заповнення салону – на 27,52 %, а максимальний рівень заповнення – на 18,78 %. Одночасно витрати пасажирів скорочуються на 4,72 %, тоді як загальні витрати транспортної системи зменшуються на 0,28 %. Незважаючи на зростання витрат перевізника на 14,29 %, запропонований варіант забезпечує покращення якості транспортного обслуговування та підвищення ефективності функціонування маршруту в цілому.

6. Отримані результати підтверджують доцільність використання модельного підходу для оптимізації параметрів роботи міських автобусних маршрутів. Запропонована методика може бути використана транспортними підприємствами та органами місцевого самоврядування для обґрунтування раціональної кількості транспортних засобів на маршрутах, підвищення ефективності використання рухомого складу та покращення якості транспортного обслуговування населення.

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що громадський транспорт є ключовим елементом забезпечення сталої мобільності сучасних міст, оскільки саме він дозволяє зменшити негативні наслідки надмірної автомобілізації, зокрема транспортні затори, екологічне забруднення, надмірне споживання енергетичних ресурсів та неефективне використання міського простору. Ефективне функціонування системи громадського транспорту безпосередньо впливає на економічний розвиток міст, соціальну доступність перевезень та якість життя населення.

2. Встановлено, що серед основних проблем функціонування міського пасажирського транспорту слід виділити недостатній рівень фінансування, зношеність рухомого складу, низький рівень цифровізації, недосконалість систем управління, слабку інтеграцію транспортного планування та екологічні проблеми. Наявність зазначених недоліків призводить до зниження конкурентоспроможності громадського транспорту порівняно з індивідуальними автомобілями.

4. На підставі аналізу наукових досліджень визначено, що рівень заповнюваності транспортних засобів є одним із найважливіших показників ефективності роботи системи перевезень. Недостатня заповнюваність призводить до неефективного використання рухомого складу та зростання витрат на перевезення, тоді як надмірне переповнення погіршує комфорт поїздки, збільшує час посадки та висадки пасажирів, знижує якість транспортного обслуговування та негативно впливає на привабливість громадського транспорту.

5. Встановлено, що оптимальний рівень заповнюваності повинен забезпечувати баланс між економічною ефективністю перевезень та комфортністю транспортного обслуговування пасажирів. Досягнення такого балансу можливе за рахунок оптимізації розкладів руху, використання

транспортних засобів різної місткості, урахування нерівномірності пасажиропотоків, впровадження інтелектуальних транспортних систем та сучасних методів прогнозування транспортного попиту.

6. Проведений аналіз показав, що раціональне управління заповнюваністю транспортних засобів дозволяє підвищити ефективність використання провізної спроможності маршрутів, скоротити витрати перевізників, зменшити енергоспоживання та обсяги шкідливих викидів, а також підвищити якість транспортного обслуговування населення. Таким чином, оптимізація заповнюваності транспортних засобів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності функціонування міського громадського транспорту та забезпечення сталого розвитку транспортних систем сучасних міст.

7. Обґрунтовано вибір критерію оптимізації заповнюваності транспортних засобів громадського транспорту, який базується на мінімізації сумарних витрат перевізника та пасажирів. Встановлено, що використання локальних критеріїв, орієнтованих виключно на інтереси перевізника або пасажирів, не забезпечує комплексної оцінки ефективності функціонування транспортної системи. Тому для розв'язання задачі оптимізації доцільно використовувати інтегральний критерій, який враховує як економічні, так і соціальні аспекти організації перевезень.

8. Розроблено методику оптимізації заповнюваності транспортних засобів на міських автобусних маршрутах, яка базується на визначенні раціональних параметрів організації перевезень з урахуванням економічних показників роботи перевізника та якості транспортного обслуговування пасажирів. Запропонована методика передбачає послідовне формування вихідних даних, визначення параметрів моделі оптимізації, проведення модельного розрахунку, аналіз отриманих результатів та порівняльну оцінку існуючого і запропонованого варіантів організації перевезень.

9. Для проведення дослідження було обрано міський автобусний маршрут №9 «с. Муроване – Автовокзал» у м. Львів, який характеризується

значним пасажиропотоком та вираженою нерівномірністю перевезень у години пік. У ході дослідження сформовано вихідні дані, що характеризують техніко-експлуатаційні показники функціонування маршруту, параметри пасажиропотоків, рухомого складу та економічні показники перевізного процесу.

10. Проведений модельний розрахунок показав, що збільшення кількості автобусів на маршруті призводить до скорочення інтервалу руху та зниження рівня заповнення салонів автобусів. Встановлено, що зі збільшенням кількості автобусів від 12 до 27 од. інтервал руху зменшується з 9,99 до 4,44 хв., середній рівень заповнення – з 4,07 до 2,03 пас./м², а максимальний рівень заповнення – з 9,04 до 2,03 пас./м². Це свідчить про покращення комфортності перевезень та підвищення якості транспортного обслуговування пасажирів.

11. У результаті аналізу залежності загальних витрат перевізника та пасажирів від кількості автобусів встановлено, що мінімальне значення сумарних витрат досягається при використанні 16 автобусів на маршруті. Таким чином, визначено оптимальний варіант організації перевезень, який забезпечує найбільш ефективне співвідношення між витратами перевізника та рівнем транспортного обслуговування пасажирів.

12. Порівняльний аналіз існуючого та запропонованого варіантів організації перевезень показав, що впровадження запропонованих заходів дозволяє зменшити інтервал руху автобусів на 12,5 %, середній рівень заповнення салону – на 27,52 %, а максимальний рівень заповнення – на 18,78 %. Одночасно витрати пасажирів скорочуються на 4,72 %, тоді як загальні витрати транспортної системи зменшуються на 0,28 %. Незважаючи на зростання витрат перевізника на 14,29 %, запропонований варіант забезпечує покращення якості транспортного обслуговування та підвищення ефективності функціонування маршруту в цілому.

13. Отримані результати підтверджують доцільність використання модельного підходу для оптимізації параметрів роботи міських автобусних

маршрутів. Запропонована методика може бути використана транспортними підприємствами та органами місцевого самоврядування для обґрунтування раціональної кількості транспортних засобів на маршрутах, підвищення ефективності використання рухомого складу та покращення якості транспортного обслуговування населення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ceder A. Urban mobility and public transport: future perspectives and review. *International Journal of Urban Sciences*. 2021. Vol. 25(4). P. 455-479.
2. Visan M., Negrea S. L., Mone F. Towards intelligent public transport systems in Smart Cities; Collaborative decisions to be made. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 199. P. 1221–1228.
3. Batty P., Palacin R., González-Gil A. Challenges and opportunities in developing urban modal shift. *Travel Behaviour and Society*. 2015. Vol. 2(2). P. 109–123.
4. McLeod S., Scheurer J., Curtis C. Urban public transport: planning principles and emerging practice. *Journal of Planning Literature*. 2017. Vol. 32(3). P. 223–239.
5. Gao Y., Zhu J. Characteristics, impacts and trends of urban transportation. *Encyclopedia*. 2022. Vol. 2(2). P. 1168–1182.
6. Hrelja R., Khan J., Pettersson F. How to create efficient public transport systems? A systematic review of critical problems and approaches for addressing the problems. *Transport Policy*. 2020. Vol. 98. P. 186–196.
7. Vakulenko K., Burko D., Lynnyk I., Sokolova N., Kush Y. Sustainable development of Ukrainian cities: Inclusiveness of urban passenger transport services and environmental impact. *International scientific conference intelligent transport systems: Ecology, safety, quality, comfort*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2024. P. 63–73.
8. Jacyna-Golda I., Gavkalova N., Salwin M. Managing Innovation for a Sustainable Transport System: A Comparative Study of the EU and Ukraine. *Sustainability*. 2026. Vol. 18(1). P. 504.-516.
9. Hartmann Tolić I., Nyarko E. K., Ceder A. Optimization of public transport services to minimize passengers' waiting times and maximize vehicles' occupancy ratios. *Electronics*. 2020. Vol. 9(2). P. 360.-372.

10. Silva C. At what extent the benefits of introducing alternative light-duty vehicles offset those of increasing the buses average occupancy? *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 70. P. 211–219.
11. Liu T., Ceder A. Synchronization of public transport timetabling with multiple vehicle types. *Transportation Research Record*. 2016. Vol. 2539(1). P. 84–93.
12. Cats O., Glück S. Frequency and vehicle capacity determination using a dynamic transit assignment model. *Transportation Research Record*. 2019. Vol. 2673(3). P. 574–585.
13. Novirani D., Adianto H. Relation of service quality, load factors and tariff on bus city of Bandung. *International Review of Management and Marketing*. 2020. Vol. 10(4). P. 152–158.
14. Hellekes J., Winkler C. Incorporating passenger load in public transport systems and its implementation in nationwide models. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 184. P. 115–122.
15. Ceder A., Hassold S., Dunlop C., Chen I. Improving urban public transport service using new timetabling strategies with different vehicle sizes. *International Journal of Urban Sciences*. 2013. Vol. 17(2). P. 239–258.
16. Yang X., Liu L. A multi-objective bus rapid transit energy saving dispatching optimization considering multiple types of vehicles. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 459–471.
17. Cats O., Hartl M. Modelling public transport on-board congestion: comparing schedule-based and agent-based assignment approaches and their implications. *Journal of Advanced Transportation*. 2016. Vol. 50(6). P. 1209–1224.
18. Shen X., Feng S. How public transport subsidy policies in China affect the average passenger load factor of a bus line. *Research in Transportation Business & Management*. 2020. Vol. 36. P. 526–533.

19. Yu K., Wang Z. Research on Survey and Calculation of Load Factor in Urban Public Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 189(6). P. 35-47.

20. Orth H., Weidmann U., Dorbritz R. Development of measurement system for public transport performance. *Transportation Research Record*. 2012. Vol. 2274(1). P. 135–143.

21. Понкратов Д. П., Доля В. К. Цільова функція вибору пасажиромісткості транспортних засобів на міських маршрутах. *Зб. наук. пр. Української державної університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. № 161. С. 44–52.

22. Доля В. К. Пасажирські перевезення: підручник. Харків: Форт, 2010. 504 с.