

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 **Модельний підхід до визначення оптимальних
параметрів транспортного обслуговування на міських
автобусних маршрутах**

Виконала: студентка 2 курсу, групи

Мн РозТранс 2024-1

спеціальності 275 Транспортні технології
(за видами)

освітньо-наукової програми

«Розумний транспорт і логістика для міст»

Непорада В. А.

Керівник Куш Є. І.

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
Непораді Вікторії Артурівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Модельний підхід до визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах

керівник роботи Куш Євген Іванович, к.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 міських автобусних маршрутів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів та підходів до удосконалення транспортного обслуговування пасажирів під час міських перевезень

2. Розробка моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах 3. Практична апробація моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Графіки зміни параметрів транспортного обслуговування пасажирів на міських автобусних маршрутах

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 та підходів до удосконалення транспортного обслуговування пасажирів під час міських перевезень	27.02.26 – 17.03.26	
2	Розробка моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах	18.03.26 – 21.04.26	
3	Практична апробація моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах	22.04.26 – 20.05.26	

Студент

(підпис)

Непорада В. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Куш Є. І.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з 90 сторінок машинописного тексту, містить 21 ілюстрацію, 21 таблицю, 32 літературних джерела.

Об'єкт дослідження: процес транспортного обслуговування пасажирів на міських автобусних маршрутах.

Мета роботи - розроблення та практична апробація модельного підходу до визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах.

Методи дослідження: математичного моделювання, системного аналізу, техніко-економічного оцінювання, статистичної обробки даних та порівняльного аналізу альтернативних варіантів організації перевезень.

Отримані результати. Сформовано цільову функції оптимізації параметрів транспортного обслуговування. В якості критерію оптимізації прийнято сукупні витрати перевізника та пасажирів, що дозволяє забезпечити баланс між економічною ефективністю роботи маршруту та якістю транспортного обслуговування населення. Проведено практичну апробацію розробленої моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах на прикладі автобусного маршруту №37 міста Львів. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої моделі оптимізації параметрів транспортного обслуговування та можливість її практичного використання.

Рекомендації з впровадження: розробки можуть бути використані для вдосконалення організації міських пасажирських перевезень.

ОПТИМІЗАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ТРАНСПОРТНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ
ПАСАЖИРІВ, МІСЬКІ АВТОБУСНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАСАЖИРІВ ПІД ЧАС МІСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....	9
1.1 Роль громадського транспорту у забезпеченні сталого розвитку міст.....	9
1.2 Чинники покращення послуг маршрутного пасажирського транспорту.....	11
1.3 Суб'єктивний та об'єктивний підходи до оцінювання параметрів транспортного обслуговування пасажирів.....	14
1.4 Методи та підходи до оптимізації міських пасажирських перевезень.....	21
1.5 Вплив рівня заповнення маршрутних транспортних засобів на експлуатаційну ефективність перевезень та задоволеність пасажирів.....	27
1.6 Висновки по розділу.....	36
Розділ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ.....	38
2.1 Вибір методів дослідження.....	38
2.2 Підготовка та проведення опитування.....	41
2.3 Обробка результатів анкетного дослідження.....	44
2.4 Формування цільової функції оптимізації.....	51
2.5 Висновки по розділу.....	55

					ННІ ЕІП ТСЛМн РозТранс 2024-1 РозТранс XXX...Х ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Пояснювальна записка					
Розроб.		Непорада В.А.								
Перевір.		Куш Є. І.								
Н. контр.		Бурко Д. Л.								
Затв.		Куш Є. І.								
					Літера	Аркуш	Аркушіве			
					м	р	д	4		90
					ХНУМГ					

Розділ 3 ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ.....	57
3.1 Методика оптимізації параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах.....	57
3.2 Характеристика автобусного маршруту.....	59
3.3 Проведення модельних розрахунків.....	64
3.4 Вибір оптимального варіанту транспортного обслуговування пасажирів.....	74
3.5 Висновки по розділу.....	79
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	85
ДОДАТКИ.....	89

ВСТУП

Система міського пасажирського транспорту є однією з ключових складових функціонування сучасних міст, оскільки забезпечує мобільність населення, доступність об'єктів соціальної та виробничої інфраструктури, а також впливає на рівень соціально-економічного розвитку територій. Особливе значення у структурі міських перевезень належить автобусному транспорту, який завдяки високій маневреності, гнучкості маршрутної мережі та відносно невисоким витратам на організацію перевезень є основним видом громадського транспорту у більшості міст України.

Водночас функціонування міських автобусних маршрутів супроводжується низкою проблем, серед яких найбільш актуальними є нерівномірність пасажиропотоків, переповнення транспортних засобів у години пік, значні витрати часу пасажирів на очікування та поїздки, недостатній рівень комфортності перевезень, а також високі експлуатаційні витрати перевізників. У сучасних умовах зростання рівня автомобілізації населення та збільшення транспортного навантаження на вулично-дорожню мережу підвищення ефективності функціонування системи міських пасажирських перевезень набуває особливої актуальності.

Одним із найбільш ефективних напрямів удосконалення організації перевезень є використання модельних підходів до визначення раціональних параметрів транспортного обслуговування. Застосування математичного моделювання дозволяє враховувати взаємозв'язок між параметрами перевізного процесу, характеристиками пасажиропотоків, експлуатаційними витратами перевізника та витратами часу пасажирів. Це створює передумови для обґрунтованого вибору параметрів функціонування маршрутів, зокрема кількості транспортних засобів, інтервалів руху, типу та пасажиромісткості автобусів.

Особливого значення при оптимізації параметрів транспортного обслуговування набуває врахування інтересів як перевізника, так і пасажирів.

Ефективність роботи маршруту визначається не лише мінімізацією експлуатаційних витрат, але й забезпеченням належного рівня якості перевезень, що характеризується витратами часу пасажирів, рівнем заповнення транспортних засобів та комфортністю поїздки. Тому виникає необхідність розроблення моделей, які дозволяють комплексно оцінювати різні варіанти організації перевізного процесу та визначати найбільш ефективний з них.

Актуальність теми роботи полягає у необхідності вдосконалення методів визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах з урахуванням економічних показників функціонування маршруту та якості перевезень пасажирів.

Метою роботи є розроблення та практична апробація модельного підходу до визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних підходів до організації міських пасажирських перевезень;
- дослідити фактори, що впливають на ефективність функціонування автобусних маршрутів;
- розробити модель визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування;
- сформулювати методику оцінювання витрат перевізника та пасажирів;
- провести практичну апробацію розробленої моделі на прикладі міського автобусного маршруту;
- визначити найбільш ефективний варіант організації перевізного процесу.

Об'єктом дослідження є процес транспортного обслуговування пасажирів на міських автобусних маршрутах.

Предметом дослідження є методи та моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах.

У роботі використано методи математичного моделювання, системного аналізу, техніко-економічного оцінювання, статистичної обробки даних та порівняльного аналізу альтернативних варіантів організації перевезень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого модельного підходу для підвищення ефективності функціонування міських автобусних маршрутів, забезпечення належного рівня транспортного обслуговування населення та обґрунтування вибору раціональних параметрів організації перевезень.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАСАЖИРІВ ПІД ЧАС МІСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

1.1 Роль громадського транспорту у забезпеченні сталого розвитку міст

Громадський транспорт є одним із ключових елементів забезпечення сталого розвитку сучасних міст, оскільки він безпосередньо впливає на екологічний стан урбанізованих територій, соціальну доступність, економічну ефективність транспортної системи та якість життя населення. У сучасних умовах урбанізації, зростання автомобілізації та погіршення екологічної ситуації саме розвиток ефективної системи громадського транспорту розглядається як важливий інструмент досягнення цілей сталого розвитку [1 - 4].

Сталий розвиток міської мобільності неможливий без створення надійної та привабливої альтернативи використанню приватного автомобіля. Громадський транспорт у поєднанні з активними способами пересування (пішохідним рухом і велосипедним транспортом) сприяє формуванню екологічно орієнтованої транспортної системи міста. Особливе значення має інтеграція транспортного та містобудівного планування, що забезпечує формування доступного міського середовища та зменшує залежність населення від індивідуального автотранспорту [1].

Однією з найважливіших переваг громадського транспорту є його позитивний вплив на екологічний стан міст. Використання автобусів, трамваїв, тролейбусів та метрополітену дозволяє зменшити обсяги викидів шкідливих речовин та парникових газів у розрахунку на одного пасажирів порівняно з приватними автомобілями. Як зазначають дослідники,

транспортний сектор є одним із найбільших джерел забруднення атмосферного повітря та викидів CO₂, тому підвищення ролі громадського транспорту є необхідною умовою скорочення негативного екологічного впливу міської мобільності. Крім того, розвиток громадського транспорту сприяє зниженню рівня шумового забруднення, енергоспоживання та використання міського простору під автомобільну інфраструктуру [2].

Важливим аспектом сталого розвитку є також зменшення транспортних заторів. Інвестиції у громадський транспорт здатні скорочувати інтенсивність використання приватних автомобілів, що позитивно впливає на пропускну здатність вулично-дорожньої мережі та якість повітря. Дослідження показують, що розвиток транспортної інфраструктури громадського транспорту сприяє перерозподілу пасажиропотоків на користь більш екологічних видів перевезень, хоча ефективність таких заходів залежить від особливостей конкретного міста, рівня розвитку мережі та транспортної політики. У довгостроковій перспективі громадський транспорт також впливає на структуру міської забудови, стимулюючи розвиток компактних форм міського середовища та скорочення відстаней пересування [3].

Громадський транспорт виконує важливу соціальну функцію, забезпечуючи мобільність населення незалежно від рівня доходів, віку чи фізичних можливостей. Доступність транспортних послуг є необхідною умовою соціальної інтеграції населення та забезпечення рівного доступу до праці, освіти, медичних і культурних послуг. Саме тому концепція сталого транспорту передбачає не лише забезпечення мобільності, але й досягнення соціальної справедливості та підвищення якості життя населення.

Особливого значення набуває розвиток інклюзивної транспортної інфраструктури, орієнтованої на потреби різних категорій користувачів [4].

Економічний аспект сталого розвитку також тісно пов'язаний із функціонуванням громадського транспорту. Ефективна система перевезень сприяє підвищенню продуктивності міської економіки, зменшенню втрат часу внаслідок заторів та скороченню транспортних витрат населення і

підприємств. Крім того, розвиток громадського транспорту дозволяє більш раціонально використовувати міські території та знижувати потребу у значних витратах на будівництво і утримання дорожньої інфраструктури для приватного автотранспорту [2].

Забезпечення сталого розвитку транспортної системи потребує комплексного підходу, який включає удосконалення транспортного планування, розвиток екологічно чистих технологій, впровадження економічних механізмів регулювання транспортного попиту та інтеграцію транспортної і містобудівної політики. До основних стратегій підвищення сталості транспортної системи належать розвиток громадського транспорту, управління транспортним попитом, стимулювання використання альтернативних видів пересування, підвищення енергоефективності транспортних засобів та формування компактної міської забудови [4].

Таким чином, громадський транспорт є важливою складовою сталого розвитку міст, оскільки забезпечує екологічну, соціальну та економічну ефективність міської мобільності. Його розвиток сприяє зменшенню негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, підвищенню доступності міського простору та формуванню комфортного міського середовища. У сучасних умовах саме пріоритетний розвиток громадського транспорту розглядається як один із головних напрямів трансформації транспортних систем міст відповідно до принципів сталого розвитку.

1.2 Чинники покращення послуг маршрутного пасажирського транспорту

У сучасних дослідженнях ефективності міських транспортних систем значна увага приділяється не лише технічним параметрам функціонування транспорту, але й сприйняттю якості послуг користувачами [5]. Дослідники зазначають, що ефективність громадського транспорту визначається не тільки експлуатаційними показниками, а й рівнем задоволеності пасажирів,

їхньою лояльністю та готовністю користуватися транспортом у майбутньому [6 - 10]. Це зумовлює необхідність комплексного підходу до оцінювання якості транспортного обслуговування, який враховує як об'єктивні характеристики транспортного процесу, так і суб'єктивне сприйняття послуг.

У праці [5] показано, що якість транспортного обслуговування є ключовим фактором формування сприйнятої доступності транспортної системи, тобто здатності людини задовольняти свої повсякденні потреби за допомогою громадського транспорту. На відміну від традиційних підходів, де доступність оцінюється переважно через час поїздки або відстань, автори враховують суб'єктивне сприйняття користувачів, що дозволяє більш повно оцінити ефективність транспортної системи.

Результати досліджень [5, 7, 9, 10] свідчать, що найбільший вплив на оцінку якості транспортного обслуговування мають функціональні характеристики транспортного процесу, зокрема регулярність руху, дотримання розкладу, частота обслуговування, швидкість поїздки, зручність пересадок і доступність зупинок тощо. Саме ці параметри формують основу сприйняття надійності транспортної системи та визначають ефективність функціонування автобусних маршрутів.

У дослідженні [10], виконаному із застосуванням структурного моделювання, встановлено, що найбільший вплив на загальну задоволеність пасажирів має блок «планування та надійність перевезень», стандартизований коефіцієнт якого становить 0,697. Це підтверджує, що для пасажирів першочергове значення мають передбачуваність роботи транспорту, регулярність руху, дотримання графіків та якість інформаційного забезпечення. Менший, але також суттєвий вплив мають характеристики маршрутної мережі та параметри комфорту.

Подібні висновки зроблено у праці [9], де застосовано поведінковий підхід до аналізу вибору громадського транспорту. Автори доводять, що рішення пасажирів щодо використання транспорту визначається не лише об'єктивними параметрами системи, а й їх сприйняттям, яке формується у

вигляді латентних змінних. Найбільший вплив на вибір громадського транспорту має фактор «надійність і зручність», у той час як комфорт відіграє другорядну роль.

Водночас дослідження [6, 7, 8, 10] підкреслюють, що поряд із технічними характеристиками важливу роль відіграють параметри, пов'язані з комфортом і якістю обслуговування. До них належать чистота транспортних засобів, рівень заповнення салону, технічний стан транспорту та зупинок, поведінка персоналу, інформаційне забезпечення, безпека та зручність очікування.

У праці [6] здійснено узагальнення численних досліджень щодо факторів задоволеності та лояльності користувачів громадського транспорту. Автори розмежовують поняття задоволеності та лояльності: задоволеність визначається як відповідність фактичного рівня обслуговування очікуванням пасажира, тоді як лояльність пов'язується з готовністю користуватися транспортом у майбутньому та рекомендувати його іншим.

У праці [7] підкреслюється, що задоволеність пасажирів є багатофакторним явищем, яке формується внаслідок взаємодії між очікуваннями користувачів і фактичними характеристиками транспортного обслуговування.

Особливу увагу у працях [7, 8] приділено впливу негативного досвіду користування транспортом. Автори зазначають, що негативні події, зокрема затримки, переповнення транспортних засобів або проблеми з безпекою, мають значно сильніший вплив на оцінку якості транспортного обслуговування, ніж позитивні враження.

У дослідженні [8] також розглядається проблема залучення користувачів приватного автомобільного транспорту до використання громадського транспорту. Автори підкреслюють, що базові характеристики транспортного обслуговування (надійність, швидкість і частота руху) є необхідною умовою конкурентоспроможності громадського транспорту, однак для зміни транспортної поведінки цього недостатньо.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із впливом організаційної моделі функціонування громадського транспорту на якість транспортного обслуговування та ефективність системи перевезень. У праці [11] розглянуто три основні моделі організації громадського транспорту: регульовану (монопольну), модель обмеженої конкуренції та дерегульовану модель. Практичне дослідження, проведене на прикладі муніципалітету Інджія (Сербія), показало, що після переходу до скандинавської моделі кількість пасажирів зростає на 38,3 %, а коефіцієнт використання місткості транспортних засобів збільшився з 0,39 до 0,85.

Таким чином, результати проаналізованих досліджень свідчать, що ключовими чинниками покращення послуг маршрутного пасажирського транспорту є забезпечення надійності та регулярності перевезень, оптимізація маршрутної мережі, підвищення рівня комфорту та безпеки, удосконалення інформаційного забезпечення, а також врахування поведінкових особливостей пасажирів.

1.3 Суб'єктивний та об'єктивний підходи до оцінювання параметрів транспортного обслуговування пасажирів

Оцінювання якості транспортних послуг має базуватися не лише на технічних характеристиках функціонування системи перевезень, але й на рівні задоволеності пасажирів. Саме користувачі транспорту є основними оцінювачами якості послуг, оскільки вони безпосередньо стикаються з усіма перевагами та недоліками транспортної системи. Водночас виключне використання суб'єктивних оцінок може призводити до викривлення результатів через індивідуальні особливості сприйняття, соціальні характеристики пасажирів та різний рівень очікувань щодо якості перевезень [12 - 16].

Суб'єктивний підхід заснований на аналізі думок пасажирів стосовно різних характеристик пересування, що отримують за результатами

проведення опитувань щодо задоволеності користувачів. Ці опитування проводяться шляхом розповсюдження анкет або шляхом особистих інтерв'ю з пасажирями. У таких опитуваннях пасажирі оцінюють своє сприйняття за широким спектром атрибутів (наприклад, чистота, комфорт поїздки, температура), використовуючи якісну або кількісну шкалу. Таким чином, можна з'ясувати думку пасажирів щодо бажань та сприйняття системи громадського транспорту. Наявні дослідження у цій сфері відрізняються підходом до аналізу даних, кількістю та типом характеристик, які вони використовують в своїх дослідженнях, та результатами зроблених висновків [12, 13]. Основними параметрами, які оцінюються користувачами транспорту, є регулярність руху, комфорт, безпека, доступність інформації, вартість проїзду, швидкість перевезень, стан транспортних засобів і транспортної інфраструктури [12 - 16].

Суб'єктивні дослідження можна додатково класифікувати, враховуючи використані шкали оцінювання. Може бути застосована чотири- або п'ятибальна шкала, де 1 означає дуже погано або дуже незадоволено, а 4 або 5 – дуже добре або відмінно. Ця шкала, відома як шкала Лайкерта, є широко використовуваним психометричним інструментом в анкетах, який цінується за його точність в оцінці думок, сприйняття та поведінки. В інших дослідженнях використовувалися шкали від 1 до 9 або 10 балів відповідно. Шкали з більшою кількістю рівнів відповідей пропонують більшу гнучкість і можуть краще відображати ставлення респондентів, а також демонструвати вищу внутрішню узгодженість [12].

Класифікацію підходів щодо оцінки комфорту здійснення поїздки у салоні транспортного засобу наведено на рис. 1.1.

Оцінка комфорту громадського транспорту зазвичай проводиться за допомогою трьох різних підходів: суб'єктивного, об'єктивного та комбінованого [12].



Рисунок 1.1 – Класифікація підходів щодо оцінки комфорту здійснення поїздки у салоні транспортного засобу [12]

Класифікація за атрибутами, що враховується під час оцінювання рівня комфорту передбачає їхній поділ на категорії. Перша категорія складається з факторів, пов'язаних з особистим простором, доступним у салоні транспортного засобу, включаючи місця для сидіння, кількість пасажирів та коефіцієнт заповнення. Аспекти, пов'язані з кліматичними умовами всередині транспортного засобу, включаючи температуру та чистоту, охоплені другою категорією. Третій кластер включає дослідження вібрацій, що відчують пасажирів, та загалом фізичних та кінематичних елементів, пов'язаних з дорожніми умовами та дорожнім рухом. Четверта категорія включає елементи поведінки водія під час керування, охоплюючи поздовжнє прискорення, що виникає внаслідок маневрів розгону та гальмування, поперечні прискорення, що виникають під впливом дорожніх поворотів, та вертикальні прискорення, що виникають внаслідок нерівностей дорожнього

покриття. Нарешті, п'ята група складається з кількох характеристик, які одночасно враховують різні аспекти комфорту, такі як чистота, якість сидінь, поведінка персоналу, рівень скупченості, безпека, температура, звуковий тиск, швидкість зміни прискорення, швидкість руху; вплив вібрацій та шуму на дискомфорт під час виконання певної діяльності (наприклад читання газети чи книги); простір салону транспортного засобу, стиль водіння; зручності для пасажирів, місця для сидіння та особистий простір, комфорт поїздки, умови навколишнього середовища; шум, вібрації, температура тощо [12].

Суб'єктивні оцінки дозволяють враховувати очікування, потреби та поведінкові особливості пасажирів. Зокрема, у праці [15] підкреслюється, що рівень задоволеності пасажирів є важливим індикатором привабливості громадського транспорту та безпосередньо впливає на готовність населення користуватися транспортними послугами. Автори розробили систему оцінювання задоволеності пасажирів міського мультимодального транспорту, яка базується на поєднанні методів аналітичної ієрархії, ентропійного аналізу та нечіткої комплексної оцінки. Такий підхід дозволяє враховувати багатофакторність процесу оцінювання та мінімізувати суб'єктивність визначення вагових коефіцієнтів показників.

Перевагою суб'єктивного підходу є можливість отримання інформації про реальне сприйняття транспортних послуг користувачами, визначення найбільш проблемних аспектів обслуговування та пріоритетних напрямів удосконалення транспортної системи. Крім того, результати оцінювання задоволеності пасажирів дозволяють враховувати соціальні та психологічні аспекти функціонування громадського транспорту [12, 15]. Водночас суб'єктивні оцінки можуть суттєво залежати від індивідуальних особливостей респондентів, їхнього соціального статусу, досвіду користування транспортом, рівня очікувань та особистих уподобань [12, 13].

Це може призводити до значної варіативності результатів та ускладнювати

формування об'єктивних висновків щодо фактичного рівня якості транспортного обслуговування [17].

На відміну від суб'єктивного підходу, об'єктивний підхід ґрунтується на використанні кількісних показників функціонування транспортної системи. До таких показників належать швидкість руху, інтервали руху транспортних засобів, регулярність перевезень, коефіцієнт використання місткості, тривалість поїздки, рівень аварійності, кількість рейсів, витрати часу на очікування, доступність транспортної інфраструктури та інші експлуатаційні характеристики [13]. Основною перевагою цього підходу є можливість отримання стандартизованих, порівнюваних і кількісно вимірюваних результатів оцінювання.

Об'єктивні вимірювання гарантують отримання точних та кількісно вимірюваних даних, що дозволяють проводити послідовні та повторювані оцінки рівня транспортного обслуговування в різних умовах та налаштуваннях, забезпечуючи надійність процесу оцінювання. Вони дозволяють проводити прямі порівняння між різними видами транспорту, маршрутами або транспортними засобами, щоб планувальники та перевізники могли приймати обґрунтовані рішення. Збір даних може відбуватися в статичних умовах у лабораторії або безпосередньо на транспортних засобах під час їхньої експлуатації. Проте, одних лише об'єктивних вимірювань, хоча їх більш легко отримати та оцінити, може бути недостатньо для вимірювання комфорту, оскільки їм бракує врахування людського чинника. Рівень шуму, вібрації та прискорення надають кількісні дані, але не враховують нюанси почуттів та уподобань окремих пасажирів [12, 13].

У праці [12] наведено порівняльну оцінку застосування суб'єктивного та об'єктивного підходів до оцінювання параметрів транспортного обслуговування громадським транспортом (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки суб'єктивного та об'єктивного підходу [12]

Підхід	Переваги	Недоліки
Суб'єктивний	Відображає сприйняття пасажирів якості транспортних послуг	Досвід пасажирів та їхні індивідуальні особливості щодо уподобань відносно параметрів транспортного обслуговування можуть впливати на суб'єктивну оцінку
Об'єктивний	Застосування підходу дає змогу отримати точні та кількісні показники оцінювання Дають змогу проводити пряме порівняння між різними видами транспорту, маршрутами, транспортними засобами	Вони не враховують індивідуального відношення пасажирів до параметрів транспортної послуги

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють поєднанню суб'єктивного та об'єктивного підходів до оцінювання транспортного обслуговування. Так, у роботі [13] запропоновано методологію інтегрованого оцінювання якості транспортного обслуговування, яка враховує як суб'єктивні оцінки пасажирів, так і об'єктивні показники роботи транспортної системи. Автори підкреслюють, що використання лише одного з підходів не дозволяє отримати повну та достовірну характеристику якості транспортного обслуговування. Поєднання двох груп показників забезпечує більш комплексне оцінювання та дозволяє мінімізувати вплив недоліків кожного окремого підходу.

Дослідження [16] також підтверджує необхідність інтеграції суб'єктивних та об'єктивних методів оцінювання. Автори аналізували відповідність між суб'єктивним сприйняттям якості громадського транспорту та об'єктивними характеристиками транспортної доступності у Відні (Австрія). Результати дослідження показали, що між суб'єктивними та об'єктивними оцінками існує як відповідність, так і певні розбіжності, які залежать від соціально-демографічних характеристик населення,

особливостей міського середовища та індивідуального досвіду користувачів. Це свідчить про те, що навіть за наявності високих об'єктивних показників транспортного обслуговування пасажирів можуть оцінювати його недостатньо позитивно, і навпаки.

Схему поєднання суб'єктивного та об'єктивного підходів під час проведення оцінки рівня комфорту здійснення поїздки представлено на рис.

1.2.

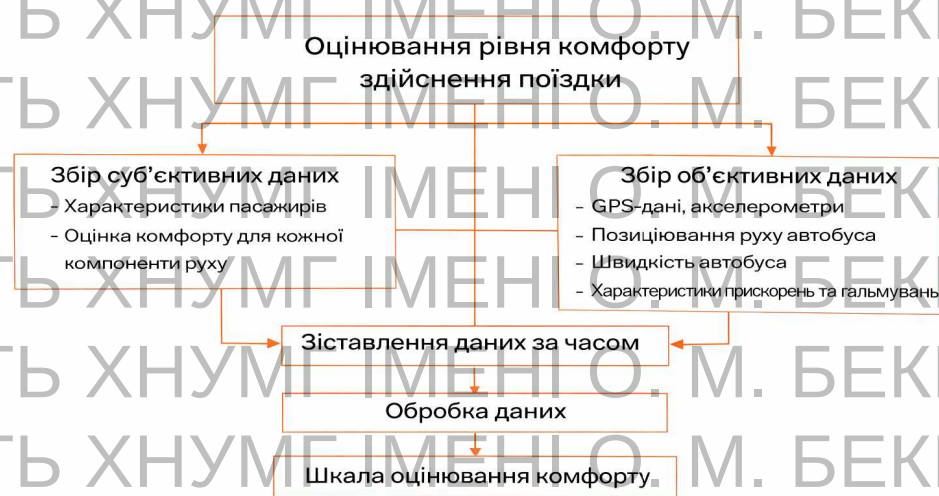


Рисунок 1.2 – Схема застосування змішаної методології оцінювання рівня комфорту здійснення поїздки [12]

Залежно від типу застосованих моделей підходи до оцінювання рівня транспортного обслуговування пасажирів можуть бути поділені на три групи [12]:

1. Перша група, яка називається описовими моделями, складається з досліджень, що використовують описову статистику для кількісної оцінки рівня транспортного обслуговування. Використовуючи основні статистичні методи, такі як кореляційний аналіз та відсоткові значення, ці моделі прагнуть встановити зв'язок між суб'єктивним сприйняттям комфорту та об'єктивними параметрами. Цей підхід допомагає визначити порогові комфорту, які відповідають уподобанням пасажирів.

2. Друга група включає дослідження, які оцінюють параметри

транспортного обслуговування за допомогою різних формулювань висновкових моделей. Ці моделі ілюструють, як різні змінні впливають на сприйняття рівня транспортного обслуговування, і розглядають суб'єктивне сприйняття користувачів як залежну змінну, а атрибути, що спостерігаються під час поїздки автобусом, як незалежні змінні. Ці моделі мають здатність оцінювати вплив окремих факторів на рівень транспортного обслуговування та дотримуватися узагальненого лінійного припущення.

3. Третя група включає моделі машинного навчання для проведення оцінки. Моделі машинного навчання представляють функціональні зв'язки між входами та виходами системи, причому параметри не мають фізичної інтерпретації. Використання моделей машинного навчання дає можливість виявити складні, часто нелінійні взаємодії між параметрами комфорту та факторами, що на нього впливають.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу можна дійти висновку, що сучасні підходи до оцінювання параметрів транспортного обслуговування дедалі більше орієнтуються на комплексне використання суб'єктивних та об'єктивних показників. Суб'єктивний підхід дозволяє враховувати потреби, очікування та поведінкові особливості пасажирів, тоді як об'єктивний забезпечує кількісне оцінювання експлуатаційної ефективності транспортної системи. Їх поєднання створює передумови для більш повного та достовірного аналізу якості транспортного обслуговування пасажирів і формування ефективної транспортної політики.

1.4 Методи та підходи до оптимізації міських пасажирських перевезень

Сучасні підходи до оптимізації пасажирських перевезень базуються на комплексному аналізі транспортного попиту, параметрів функціонування маршрутної мережі, характеристик пасажиропотоків та умов дорожнього руху [18 - 27].

Для отримання інформації про пасажиропотоки можуть бути застосовані різні сенсорні технології. Візуальні методи, такі як відеоспостереження або тепловізійні камери, забезпечують високу точність, однак потребують значних обчислювальних ресурсів і викликають питання захисту персональних даних. Натомість невізуальні технології, включаючи інфрачервоні датчики, датчики тиску та радіочастотні методи (Wi-Fi, Bluetooth, RFID), є більш доступними та простими у впровадженні, хоча можуть мати нижчу точність вимірювань. Вибір конкретної технології залежить від умов експлуатації, типу об'єкта транспортної інфраструктури та вимог до точності отриманих даних. Автори праці [19] наголошують на тому, що використання сенсорних технологій дозволяє суттєво покращити показники функціонування транспортних систем. Зокрема, завдяки отриманню даних у реальному часі стає можливим прогнозування перевантажень, більш рівномірний розподіл пасажирів у мережі та скорочення часу очікування. Це особливо актуально в умовах пікових навантажень або кризових ситуацій, коли необхідно забезпечити безпечні умови перевезень. Крім того, впровадження таких систем сприяє підвищенню привабливості громадського транспорту та зменшенню використання приватних автомобілів.

Одним із найпоширеніших напрямів оптимізації є удосконалення маршрутної мережі громадського транспорту. Оптимізація маршрутів передбачає вибір раціональних схем руху транспортних засобів, визначення довжини маршрутів, розташування зупинок та забезпечення ефективних пересадочних зв'язків між різними видами транспорту. Основним завданням у цьому випадку є забезпечення максимальної транспортної доступності для населення при мінімізації дублювання маршрутів та надлишкових транспортних витрат [27].

Важливим напрямом оптимізації є формування раціональних параметрів перевізного процесу на окремих маршрутах. До таких параметрів належать інтервали руху, частота рейсів, швидкість сполучення, графіки

роботи маршрутів та режим використання рухомого складу. Рациональний вибір інтервалів руху дозволяє зменшити час очікування пасажирів, підвищити рівень заповнюваності транспортних засобів та знизити експлуатаційні витрати перевізників. При цьому важливе значення має врахування нерівномірності пасажиропотоків у різні періоди доби, дні тижня та сезони року [18, 26].

У статті [26] розглянуто проблему визначення оптимальних інтервалів руху автобусів на міському маршруті з урахуванням факторів невизначеності, що істотно впливають на якість транспортного обслуговування. Автори наголошують, що традиційні моделі планування роботи автобусних маршрутів часто базуються на сталому попиті та фіксованому часі руху, однак у реальних умовах ці параметри змінюються під впливом дорожньої ситуації, коливань пасажиропотоку та поведінки пасажирів. Саме тому для підвищення ефективності міських перевезень необхідно застосовувати більш гнучкі модельні підходи. У роботі запропоновано математичну модель оптимізації інтервалів руху автобусів, яка враховує три основні джерела невизначеності: еластичність пасажирського попиту залежно від частоти руху, випадковий характер часу руху між зупинками та втрати (не обслуговування) пасажирів, які залишають зупинку через переповненість автобуса або надто довге очікування. Такий підхід є особливо важливим для міських маршрутів у години пік, коли навіть незначне порушення графіка руху призводить до накопичення пасажирів на зупинках, нерівномірного рівня заповнення автобусів і зниження рівня пасажирського сервісу.

Цільова функція моделі спрямована на мінімізацію кількості пасажирів, які не змогли здійснити посадку (відмова в посадці), та зменшення числа пасажирів, що очікують транспорт на зупинках. Для розв'язання задачі використано метод перебору в поєднанні з рекурсивним алгоритмом і моделюванням Монте-Карло, що дозволило врахувати випадкові зміни часу руху транспортних засобів. У результаті числового експерименту

встановлено, що модель, яка одночасно враховує всі три фактори невизначеності, забезпечує найкращі результати: скорочення середнього часу очікування пасажирів, збільшення кількості перевезених осіб та зменшення інтервалу руху. Практичне використання отриманих результатів полягає у можливості формування адаптивних графіків руху. Замість сталого інтервалу доцільно застосовувати змінний інтервал залежно від часу доби, завантаження маршруту та прогнозованої дорожньої ситуації. Крім того, модель може бути основою для цифрових систем диспетчерського управління, які в реальному часі коригують випуск автобусів на маршрут [26].

У праці [18] запропоновано комплексний підхід до оптимізації розкладів руху автобусів на основі багатокритеріального моделювання, що дозволяє одночасно враховувати інтереси пасажирів і перевізників. Основною проблемою, яку розглядають автори, є неефективність традиційних фіксованих розкладів, що призводить до перевитрат ресурсів та зниження якості обслуговування. Запропонована модель базується на багатокритеріальній оптимізації, де цільова функція включає два основні компоненти: мінімізацію витрат часу очікування пасажирів та мінімізацію експлуатаційних витрат перевізника. Таким чином, задача формулюється як компроміс між підвищенням комфорту користувачів і забезпеченням економічної ефективності роботи транспортної системи. Важливим елементом моделі є врахування реальних параметрів функціонування системи, зокрема часу руху між зупинками, місткості автобусів, інтенсивності пасажиропотоків та обмежень на інтервали руху. Для опису пасажирських потоків використовується ймовірнісний підхід, зокрема припущення про пуассонівський розподіл прибуття пасажирів на зупинки, що дозволяє більш точно оцінити час очікування та рівень заповнення транспорту.

Особливістю дослідження є застосування еволюційного алгоритму NSGA-II для розв'язання задачі оптимізації. Даний метод дозволяє отримати

множину Парето-оптимальних рішень, серед яких можна обрати найбільш доцільний варіант залежно від пріоритетів системи. Практична апробація моделі на прикладі автобусного маршруту в місті Лхаса показала її ефективність. Зокрема, оптимізація розкладу дозволила зменшити кількість рейсів при одночасному скороченні кількості пасажирів, що очікують на зупинках, приблизно на 37%. Крім того, було встановлено, що перехід від фіксованих інтервалів руху до гнучких розкладів дозволяє краще адаптувати транспортну систему до змін попиту протягом доби. Після оптимізації розкладів руху інтервали між автобусами стають нерівномірними, що забезпечує більш ефективний розподіл транспортних засобів у часі [18].

Значну роль у процесі оптимізації відіграють економіко-математичні методи. Для вирішення задач організації пасажирських перевезень застосовуються методи лінійного та нелінійного програмування, транспортні задачі, методи багатокритеріальної оптимізації, генетичні алгоритми, імітаційне моделювання та методи штучного інтелекту. Використання математичних моделей дозволяє знаходити компроміс між економічною ефективністю перевезень та рівнем транспортного обслуговування населення. Найчастіше критеріями оптимізації виступають мінімізація загальних витрат перевізника і пасажирів, скорочення часу поїздки, підвищення регулярності руху, зменшення переповненості транспортних засобів та підвищення екологічної ефективності транспортної системи [11, 18, 27].

Суттєвого поширення набувають інтелектуальні транспортні системи, які дозволяють здійснювати оперативне управління пасажирськими перевезеннями на основі сучасних інформаційних технологій. До таких систем належать автоматизовані системи диспетчерського управління, GPS-моніторинг руху транспорту, системи електронної оплати проїзду, автоматизований облік пасажиропотоків та адаптивне управління дорожнім рухом. Використання цифрових технологій дає змогу оперативно реагувати

на зміни транспортної ситуації, коригувати графіки руху та забезпечувати більш раціональне використання рухомого складу [19, 28, 29].

Одним із перспективних підходів до оптимізації є інтеграція різних видів міського транспорту в єдину транспортну систему. Інтермодальна та мультимодальна організація перевезень дозволяє забезпечити узгодженість роботи автобусного, тролейбусного, трамвайного, метрополітенного та приміського транспорту. Важливими складовими такого підходу є створення транспортно-пересадочних вузлів, єдиної тарифної системи, синхронізація графіків руху та розвиток інформаційного забезпечення пасажирів [30].

У сучасних умовах значна увага приділяється також екологічній оптимізації міських перевезень. Основними напрямками є впровадження екологічно чистих видів транспорту, використання електробусів, підвищення енергоефективності рухомого складу, зменшення обсягів викидів шкідливих речовин та стимулювання використання громадського транспорту замість приватних автомобілів. Екологічний аспект оптимізації тісно пов'язаний із концепцією сталого розвитку міської мобільності та формуванням комфортного міського середовища [2, 3, 4].

Важливим напрямом оптимізації є також підвищення якості транспортного обслуговування пасажирів. Це включає забезпечення комфорту поїздок, безпеки перевезень, доступності транспорту для маломобільних груп населення, інформування пасажирів та скорочення часу очікування. У сучасних дослідженнях дедалі більшого значення набуває орієнтація транспортної системи на потреби користувачів та оцінювання ефективності перевезень з позиції пасажирів [5, 10 - 12, 18].

Таким чином, оптимізація міських пасажирських перевезень є багатокомпонентним процесом, що охоплює технічні, економічні, організаційні, соціальні та екологічні аспекти функціонування транспортної системи. Ефективне застосування сучасних методів і підходів до оптимізації дозволяє забезпечити підвищення якості транспортного обслуговування

населення, раціональне використання ресурсів та формування сталої міської транспортної системи.

1.5 Вплив рівня заповнення маршрутних транспортних засобів на експлуатаційну ефективність перевезень та задоволеність пасажирів

Рівень заповнення маршрутних транспортних засобів є одним із ключових показників ефективності функціонування системи міських пасажирських перевезень. Він характеризує співвідношення між фактичною кількістю перевезених пасажирів і місткістю рухомого складу та безпосередньо впливає як на економічні результати роботи перевізника, так і на якість транспортного обслуговування населення. Раціональний рівень заповнення транспортних засобів забезпечує ефективне використання рухомого складу, зниження експлуатаційних витрат і підтримання належного рівня комфорту для пасажирів [20 - 25].

З позиції перевізника рівень заповнення є важливим показником експлуатаційної ефективності перевезень. Підвищення кількості пасажирів у транспортному засобі дозволяє збільшити доходи від перевезень без суттєвого зростання витрат на виконання перевезень. Основна частина експлуатаційних витрат (витрати на паливо або електроенергію, заробітну плату водіїв, технічне обслуговування та амортизацію рухомого складу) залишається відносно стабільною величиною незалежно від кількості пасажирів у салоні. У зв'язку з цим збільшення рівня заповнення транспортних засобів до певної межі сприяє зниженню собівартості перевезення одного пасажирів та підвищенню економічної ефективності роботи маршруту [22].

Разом із тим надмірне прагнення до максимального заповнення транспортних засобів може негативно впливати на якість перевезень і загальну ефективність транспортної системи. Переповнення салонів призводить до погіршення умов поїздки, зниження рівня комфорту,

збільшення часу посадки та висадки пасажирів, а також уповільнення руху транспортних засобів. Це, своєю чергою, може викликати порушення графіків руху, зниження регулярності перевезень та зростання часу поїздки.

У години пік надмірне перевантаження маршрутних транспортних засобів часто стає причиною погіршення якості транспортного обслуговування та зниження привабливості громадського транспорту для населення [20, 21, 22].

Рівень заповнення транспортних засобів безпосередньо впливає на задоволеність пасажирів транспортними послугами. Одним із найважливіших критеріїв оцінювання якості перевезень є комфорт поїздки, який значною мірою визначається кількістю пасажирів у салоні транспортного засобу. За високого рівня заповнення пасажирів відчувають фізичний дискомфорт, обмеження особистого простору, складнощі під час посадки та висадки, а також зниження безпеки поїздки. Особливо негативно переповнення впливає на перевезення осіб похилого віку, пасажирів з інвалідністю, батьків із дітьми та інших маломобільних груп населення [23, 25].

Надмірне завантаження транспортних засобів також може призводити до психологічного дискомфорту пасажирів. Висока щільність людей у салоні викликає втому, стрес та негативне сприйняття громадського транспорту загалом. У результаті частина населення може відмовлятися від користування громадським транспортом на користь приватних автомобілів, що, у свою чергу, сприяє збільшенню транспортних заторів і погіршенню екологічної ситуації в містах [23].

Водночас занадто низький рівень заповнення транспортних засобів також є небажаним. Недостатнє використання провізної спроможності призводить до зростання експлуатаційних витрат у розрахунку на одного пасажирів, погіршення економічних показників роботи перевізника та необхідності збільшення тарифів або дотацій на перевезення. Низька заповнюваність часто свідчить про невідповідність параметрів маршруту реальному транспортному попиту, нераціональне використання рухомого складу або недостатню привабливість транспортних послуг [22].

Рациональний рівень заповнення транспортних засобів визначається з урахуванням компромісу між економічною ефективністю перевезень та забезпеченням комфортних умов для пасажирів. У практиці організації міських перевезень використовуються нормативні показники коефіцієнта заповнення, які враховують тип транспортного засобу, тривалість поїздки, умови руху та характер пасажиропотоку. Для коротких міських поїздок допускається вищий рівень заповнення салонів, тоді як на тривалих маршрутах або у приміських перевезеннях вимоги до комфортності є більш жорсткими [22].

Оптимізація рівня заповнення транспортних засобів здійснюється шляхом вибору раціональних параметрів роботи маршрутів. До основних заходів належать зміна інтервалів руху, коригування кількості транспортних засобів на маршруті, використання рухомого складу різної місткості залежно від величини пасажиропотоку та удосконалення маршрутної мережі. Важливе значення має врахування нерівномірності пасажиропотоків у часі та просторі, оскільки рівень завантаження транспортних засобів суттєво змінюється протягом доби [22].

На теперішній час для контролю рівня заповнення дедалі ширше використовуються автоматизовані системи обліку пасажиропотоків, GPS-моніторинг руху транспорту та інтелектуальні транспортні системи. Це дозволяє отримувати оперативну інформацію про завантаження маршрутів, прогнозувати зміни транспортного попиту та приймати обґрунтовані рішення щодо організації перевезень [24].

Сучасні дослідження спрямовані на встановлення причин виникнення надмірного рівня заповнення громадського транспорту, визначення раціональних рівнів, що забезпечують компроміс між інтересами перевізника та пасажирів, а також розробці заходів планувального та регулювального характеру щодо покращення ситуації [20 - 25].

У праці [20] досліджується вплив перевантаженості громадського транспорту на поведінку пасажирів, зокрема через явище відмови в посадці

(*denied boarding*), коли пасажир не може здійснити посадку у транспортний засіб через його переповненість. Автори підкреслюють, що перевантаженість є характерною проблемою для багатьох великих міських транспортних систем і суттєво впливає на привабливість громадського транспорту та його доступність.

У дослідженні виділяються три основні наслідки перевантаженості: зниження комфорту під час поїздки, погіршення регулярності руху та виникнення ситуацій, коли пасажир змушений чекати наступного транспортного засобу через неможливість посадки. Особлива увага приділяється саме останньому фактору, оскільки він безпосередньо впливає на час очікування та невизначеність поїздки. Автори зазначають, що додатковий час очікування, спричинений відмовою в посадці, сприймається пасажиром значно негативніше, ніж звичайний час очікування, оскільки він пов'язаний із затримками та порушенням запланованого графіка [20].

Методологічною основою дослідження [20] є використання моделей вибору маршруту на основі реальних даних про переміщення пасажирів (*smart card data*), що дозволяє оцінити поведінку користувачів без застосування анкетування. Зокрема, у роботі застосовано підхід виявлених вподобань (*revealed preference*), який дає змогу визначити, як пасажир оцінює різні компоненти поїздки, включаючи час поїздки, очікування та ризик відмови в посадці. Для цього поєднуються дані автоматизованих систем оплати проїзду та дані позиціонування транспортних засобів, що дозволяє відстежувати як маршрути пасажирів, так і рівень завантаженості транспорту. Результати дослідження свідчать, що час очікування після відмови в посадці оцінюється пасажиром приблизно на 68% більш негативно порівняно з початковим очікуванням. Одна хвилина звичайного очікування еквівалентна приблизно 1,62 хв. перебування у транспорті, тоді як одна хвилина очікування після відмови в посадці вже еквівалентна 2,72 хв. Це підтверджує, що перевантаженість має значно більший вплив на

сприйняття якості обслуговування, ніж це враховується у традиційних моделях.

Отримані авторами праці [20] результати доводять необхідність врахування не лише середнього часу поїздки та очікування, але й імовірності переповнення та відмови в посадці. У контексті модельного підходу це означає включення до цільової функції додаткових параметрів, що характеризують комфорт і надійність обслуговування. Крім того, врахування підвищеної «вартості» часу очікування після відмови в посадці дозволяє більш точно оцінити ефективність заходів щодо підвищення пропускну здатності транспортної системи, таких як збільшення частоти руху або використання транспортних засобів більшої місткості.

У праці [21] досліджується взаємозв'язок між об'єктивною щільністю пасажирів та суб'єктивним сприйняттям перевантаженості в громадському транспорті. Автори акцентують увагу на тому, що комфорт поїздки є ключовим фактором для підвищення привабливості громадського транспорту, особливо в умовах конкуренції з приватними видами пересування. Дослідження базується на польових експериментах у метро Пекіна, де пасажирів оцінювали рівень комфорту безпосередньо під час поїздки за різних рівнів щільності, від низьких до високих значень (до 6 осіб на m^2). Отримані результати підтверджують, що перевантаженість є найбільш критичним фактором дискомфорту: близько 69% респондентів поставили її на перше місце серед усіх факторів. Проте важливим висновком є те, що суб'єктивне сприйняття перевантаженості формується не лише кількістю пасажирів. Згідно з результатами регресійного аналізу, рівень шуму має навіть більший вплив на оцінку перевантаженості, ніж фактична щільність пасажирів, а запах є другим за значущістю фактором. Також встановлено, що інші параметри середовища (якість повітря, температура, безпека та освітлення) у сукупності формують майже половину ($\approx 47\%$) варіації сприйняття переповнення. Це означає, що комфорт у транспорті є багатофакторним явищем, де фізичні та сенсорні чинники взаємодіють між

собою. Наприклад, шум підсилює негативне сприйняття запахів і навпаки, що свідчить про комплексний характер впливу середовища на пасажирів.

Таким чином, результати досліджень [21] розширюють традиційне уявлення про перевантаженість як суто фізичний показник і доводять необхідність інтеграції параметрів комфорту у транспортні моделі. Це дозволяє формувати більш точні та поведінково обґрунтовані моделі оптимізації, що враховують реальні відчуття пасажирів і сприяють підвищенню ефективності функціонування міських транспортних систем.

У праці [22] розглядається сучасний підхід до оцінки перевантаженості громадського транспорту на основі обробки великих масивів даних, отриманих із систем автоматизованої оплати проїзду (*smart card*) та GPS-моніторингу транспортних засобів. Автори підкреслюють, що комфорт поїздки, зокрема рівень завантаженості автобусів, є одним із ключових факторів, який впливає на вибір пасажирів громадського транспорту. У дослідженні запропоновано метод інтеграції двох незалежних джерел даних, що дозволяє визначати щільність пасажирів у транспортному засобі та на зупинках у різні моменти часу. На відміну від традиційних методів, які базуються на польових обстеженнях і мають обмежену точність та масштабованість, запропонований підхід забезпечує більш повний і динамічний аналіз транспортної системи. Основною ідеєю є відновлення повних маршрутів пасажирів (початкових і кінцевих точок поїздки) шляхом поєднання даних про оплату проїзду та переміщення автобусів, що дозволяє визначити реальну завантаженість транспорту в просторі та часі.

Також у праці [22] особливу увагу приділено оцінці ефективності різних підходів до організації руху автобусів. Зокрема, розглянуто два основні варіанти: перерозподіл рейсів у часі без збільшення загальної кількості транспортних засобів та збільшення кількості рейсів у пікові періоди. Результати моделювання показали, що зміна розкладу дозволяє зменшити рівень заповнення до певного порогового значення, після якого подальше покращення можливе лише за рахунок збільшення кількості

транспортних засобів. Водночас другий підхід є більш ефективним з точки зору зниження щільності пасажирів, але супроводжується зростанням експлуатаційних витрат.

Автори праці [23] наголошують, що традиційні моделі вибору транспорту переважно враховують час поїздки, вартість та частоту руху, однак недостатньо уваги приділяють умовам поїздки, зокрема наявності сидячих місць і рівню скупченості пасажирів. Саме ці чинники мають суттєвий вплив на сприйняття якості транспортних послуг та готовність користувачів обирати громадський транспорт. Методологічною основою дослідження є побудова моделі дискретного вибору на базі методу вказаних вподобань, під час застосування якого респонденти порівнювали існуючі транспортні альтернативи з новою лінією метрополітену. У моделі одночасно враховувалися різні показники доступності: час доступу до зупинки, тривалість поїздки, частота руху, кількість пересадок, вартість проїзду та параметри заповнення транспортних засобів. Особливістю дослідження стало кількісне представлення рівня заповнення транспортного засобу через дві змінні: імовірність отримання місця для проїзду сидячи та кількість пасажирів, які змушені стояти у салоні. Для цього використовувалися як текстові описи, так і графічні схеми заповненості транспортного засобу, що дозволило більш точно оцінити поведінкову реакцію пасажирів.

Результати моделювання показали, що перевантаженість є статистично значущим фактором вибору транспорту нарівні з часом і вартістю поїздки. Збільшення кількості стоячих пасажирів та зменшення ймовірності отримати сидяче місце істотно знижують корисність поїздки і, відповідно, зменшують імовірність вибору громадського транспорту. Водночас встановлено, що негативний вплив перевантаженості посилюється зі збільшенням тривалості поїздки, тобто дискомфорт у переповненому транспорті значно відчутніший за більшого часу поїздки. Це свідчить про нелінійний характер впливу перевантаженості на поведінку пасажирів. Також важливим висновком дослідження є те, що пасажир готові сплачувати додаткову вартість за

покращення умов перевезення, зокрема за вищу ймовірність отримати місце для сидіння або за меншу щільність пасажирів у салоні. Таким чином, комфорт має вимірювану економічну цінність і може бути включений до моделей оцінки ефективності транспортних рішень. Це особливо важливо для сучасних міських автобусних систем, де переповнення транспортних засобів у години пік є однією з основних причин відмови населення від громадського транспорту на користь приватного автомобіля [23].

У праці [25] досліджується поведінка пасажирів у перевантажених міських транспортних мережах, коли через надмірне заповнення вони змушені обирати нетипові стратегії пересування. Однією з таких стратегій є так званий рух у зворотному напрямку, коли пасажир сідає у транспорт, що їде у протилежний бік, доїжджає до кінцевої або менш завантаженої станції, після чого повертається у потрібному напрямку, отримуючи можливість здійснювати поїздки сидячи та уникнути переповненого транспорту. Автори розглядають це явище як індикатор системної перевантаженості мережі та як поведінкову реакцію користувачів на низьку якість обслуговування.

Дослідження виконано на основі даних автоматизованої системи оплати проїзду та розкладів руху метро Пекіна. Для моделювання використано дискретні моделі вибору маршруту, які дозволяють визначити, як пасажир оцінюють різні складові поїздки: час очікування, перебування в салоні, щільність пасажирів на платформі та рівень заповнення транспортного засобу. Отримані результати показали, що пасажир набагато чутливіший до очікування в умовах перевантаження, ніж до самого часу руху. Одна хвилина очікування на переповненій платформі сприймається значно гірше, ніж хвилина поїздки у вагоні, а додатковий час у зворотному напрямку є прийнятним компромісом заради зменшення дискомфорту. Авторами було встановлено, що пасажир починають відчувати суттєвий дискомфорт вже при щільності близько трьох осіб на квадратний метр на платформі та при перевищенні нормативного заповнення рухомого складу. За таких умов користувачі готові витратити додатковий час, аби уникнути переповнених

платформ або ризику не потрапити до першого транспортного засобу. Це свідчить про те, що поведінка пасажирів визначається не лише часовими параметрами, а й суб'єктивним сприйняттям комфорту, безпеки та передбачуваності поїздки [25].

У статті [24] досліджується вплив інформації про наповненість автобусів на поведінку пасажирів під час вибору маршруту та конкретного рейсу. Автори виходять з того, що сучасні системи громадського транспорту повинні орієнтуватися не лише на технічні параметри перевезень, а й на індивідуальні потреби користувачів, зокрема потребу в актуальній інформації щодо часу прибуття транспорту та рівня його заповнення. Надання такої інформації розглядається як важливий інструмент підвищення якості обслуговування та стимулювання переходу населення від приватного транспорту до громадського.

Методологічною основою дослідження стало моделювання вибору пасажирів між першим автобусом, що прибуває, та наступним рейсом. Для цього використано бінарну логіт-модель, побудовану на основі опитування користувачів у місті Сеул. У модель включено такі змінні, як час очікування, тривалість поїздки, рівень заповнення салону та мету поїздки. Заповнення автобуса описувалася трьома станами: наявність вільних місць для сидіння, нормальна заповненість (пасажирів стоять, але мають достатньо простору) та переповнений салон. Такий підхід дозволив кількісно оцінити вплив комфорту перевезення на вибір користувачів. Результати дослідження показали, що інформація про наповненість транспорту істотно впливає на рішення пасажирів. Наявність вільних місць значно підвищує ймовірність вибору автобуса, тоді як переповнений салон суттєво знижує його привабливість. Для поїздок на роботу та навчання важливими також є скорочення часу поїздки та мінімізація затримок. Для неслужбових поїздок спостерігається більша чутливість до умов комфорту, а значущість часових параметрів зменшується. Встановлено також відмінності між соціальними групами населення: люди похилого віку та домогосподарки найбільше

орієнтуються на можливість отримати сидяче місце, тоді як студенти більш негативно реагують на переповненість транспорту [24].

Практичне значення дослідження полягає в тому, що інформаційне забезпечення розглядається як окремий параметр транспортного обслуговування, здатний впливати на попит без зміни кількості автобусів чи параметрів маршрутної мережі. Це означає, що частину проблем надмірного заповнення можна вирішувати не лише через збільшення кількості ресурсів, а й через більш ефективний розподіл пасажиропотоків шляхом інформування користувачів у режимі реального часу. Наприклад, повідомлення про переповнений автобус може стимулювати частину пасажирів обрати наступний рейс або альтернативний маршрут, що сприяє вирівнюванню навантаження на систему [24].

Таким чином, рівень заповнення маршрутних транспортних засобів є важливим показником, який одночасно визначає економічну ефективність перевезень та рівень задоволеності пасажирів. Надмірне або недостатнє завантаження транспортних засобів негативно впливає на функціонування транспортної системи, тому одним із головних завдань організації міських пасажирських перевезень є забезпечення оптимального співвідношення між провізною спроможністю маршруту та фактичним попитом на перевезення.

1.6 Висновки по розділу

1. Громадський транспорт є важливою складовою сталого розвитку міст, оскільки забезпечує екологічну, соціальну та економічну ефективність міської мобільності. Його розвиток сприяє зменшенню негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, підвищенню доступності міського простору та формуванню комфортного міського середовища. У сучасних умовах саме пріоритетний розвиток громадського транспорту розглядається як один із головних напрямів трансформації транспортних систем міст відповідно до принципів сталого розвитку.

2. Ключовими чинниками покращення послуг маршрутного пасажирського транспорту є забезпечення надійності та регулярності перевезень, оптимізація маршрутної мережі, підвищення рівня комфорту та безпеки, удосконалення інформаційного забезпечення, а також врахування поведінкових особливостей пасажирів.

3. Сучасні підходи до оцінювання параметрів транспортного обслуговування дедалі більше орієнтуються на комплексне використання суб'єктивних та об'єктивних показників. Суб'єктивний підхід дозволяє враховувати потреби, очікування та поведінкові особливості пасажирів, тоді як об'єктивний забезпечує кількісне оцінювання експлуатаційної ефективності транспортної системи. Їх поєднання створює передумови для більш повного та достовірного аналізу якості транспортного обслуговування пасажирів і формування ефективної транспортної політики.

4. Оптимізація міських пасажирських перевезень є багатокомпонентним процесом, що охоплює технічні, економічні, організаційні, соціальні та екологічні аспекти функціонування транспортної системи. Ефективне застосування сучасних методів і підходів до оптимізації дозволяє забезпечити підвищення якості транспортного обслуговування населення, раціональне використання ресурсів та формування сталої міської транспортної системи.

5. Рівень заповнення маршрутних транспортних засобів є важливим показником, який одночасно визначає економічну ефективність перевезень та рівень задоволеності пасажирів. Надмірне або недостатнє заповнення транспортних засобів негативно впливає на функціонування транспортної системи, тому одним із головних завдань організації міських пасажирських перевезень є забезпечення оптимального співвідношення між провізною спроможністю маршруту та фактичним попитом на перевезення.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ

2.1 Вибір методів дослідження

Суб'єктивна оцінка окремих складових часу пересування пасажирів не є рівнозначною. Урахування таких оцінок під час моделювання та оптимізації рівня транспортного обслуговування проводиться за рахунок визначення вагових коефіцієнтів оцінки окремих складників часу пересування. Для визначення цих коефіцієнтів можуть бути застосовані різні методи, які можуть бути умовно поділені на такі групи:

1. Соціологічні та експертні методи.
2. Економіко-математичні методи.
3. Методи багатокритеріального аналізу.

До першої групи можуть бути віднесено методи анкетування та експертних оцінок.

Анкетування є найбільш поширеним методом. При його застосування пасажирів оцінюють важливість різних складників пересування або параметрів транспортного обслуговування. Може бути застосовано пряме оцінювання чи опосередковане (вибір між альтернативами). Під час оцінювання можуть бути застосовані шкали Лайкерта, проводиться ранжування чинників, виконуватись парні порівняння чи пряме висловлювання ваг. Методи цієї групи дають змогу визначати суб'єктивну значущість виділених параметрів.

Метод експертних оцінок для висловлення суб'єктивних суджень передбачає залучення фахівців транспорту, перевізників, науковців.

Різновидом методу експертних оцінок є метод Делфі, метод парних порівнянь, колективна експертна оцінка.

До другої групи можуть бути віднесені економіко-математичні методи, що базуються на кількісному аналізі поведінки пасажирів, статистичних залежностях та закономірностях функціонування транспортної системи. На відміну від соціологічних та експертних методів, у даному випадку вагові коефіцієнти визначаються не шляхом безпосереднього опитування, а на основі фактичних даних про вибір маршруту, параметри поїздки, рівень задоволеності пасажирів та інші спостережувані характеристики.

Одним із найбільш поширених методів цієї групи є регресійний аналіз, за допомогою якого встановлюється ступінь впливу окремих складників часу пересування на інтегральні показники, зокрема загальну задоволеність поїздкою, вибір виду транспорту чи оцінку якості обслуговування. У цьому випадку коефіцієнти регресійної моделі можуть розглядатися як кількісна оцінка вагомості відповідних факторів. Перевагою такого підходу є можливість використання значних масивів емпіричних даних та перевірка статистичної значущості отриманих результатів.

Широкого застосування у транспортних дослідженнях набули моделі дискретного вибору, зокрема логіт-моделі, пробіт-моделі, вкладені та змішані логіт-моделі. Їх використання ґрунтується на припущенні, що пасажир обирає той варіант пересування, який забезпечує максимальну корисність. До функції корисності включаються окремі часові складники поїздки: час підходу до зупинки, очікування, пересадки, поїздки в салоні, затримки тощо. Оцінені параметри моделі відображають чутливість пасажирів до зміни кожного з цих чинників та можуть бути використані як вагові коефіцієнти приведення часу.

До економіко-математичних методів також належать моделі структурних рівнянь, факторний аналіз, кластерний аналіз та моделі латентних змінних. Вони дають змогу враховувати приховані характеристики, такі як комфортність, надійність, безпечність чи

психологічне сприйняття поїздки, що безпосередньо не вимірюються, але впливають на поведінку пасажирів.

Перевагою економіко-математичних методів є об'єктивність отриманих результатів, можливість врахування значної кількості чинників, статистична перевірка гіпотез та використання реальних даних функціонування транспортної системи. Недоліками є потреба у значному обсязі якісної інформації, складність математичного апарату та необхідність спеціалізованого програмного забезпечення.

До третьої групи можуть бути віднесені методи багатокритеріального аналізу, які застосовуються у випадках, коли оцінювання якості транспортного обслуговування або вибір оптимальних параметрів функціонування системи здійснюється за сукупністю різнорідних критеріїв. На відміну від економіко-математичних методів, що здебільшого орієнтовані на статистичне встановлення залежностей, методи багатокритеріального аналізу дозволяють поєднувати кількісні та якісні показники, а також враховувати різні, часто суперечливі цілі учасників транспортного процесу.

Одним із найбільш поширених методів цієї групи є метод аналізу ієрархій, який передбачає структуризацію задачі у вигляді ієрархії критеріїв та виконання парних порівнянь між ними. За результатами порівнянь визначаються вагові коефіцієнти окремих критеріїв, що відображають їх відносну важливість. Перевагою методу є простота практичного застосування, можливість використання експертних оцінок, а також перевірка узгодженості суджень респондентів.

Для більш складних задач можуть застосовуватися методи сутності яких полягає у порівнянні альтернатив за багатьма критеріями та визначенні рішення, яке є найближчим до умовно ідеального варіанта або має найкращий компроміс між критеріями.

Окрему підгрупу становлять нечіткі методи багатокритеріального аналізу. Їх застосування доцільне у випадках, коли оцінки критеріїв мають невизначений або лінгвістичний характер, наприклад: «високий рівень

комфорту», «значне очікування», «помірне перевантаження». Такі підходи дозволяють формалізувати суб'єктивні судження пасажирів та експертів за умов неповної визначеності.

Перевагами методів багатокритеріального аналізу є можливість одночасного врахування великої кількості показників різної природи, поєднання кількісних і якісних критеріїв, відносна простота інтерпретації результатів та придатність для стратегічного планування. Недоліками є залежність результатів від правильності вибору критеріїв, способу нормування показників та суб'єктивності встановлення вагових коефіцієнтів.

Для задачі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах методи багатокритеріального аналізу є особливо корисними, оскільки дозволяють знаходити компроміс між інтересами пасажирів, перевізників та органів місцевого управління. Їх використання забезпечує формування збалансованих рішень, спрямованих не лише на скорочення часу пересування, а й на підвищення доступності, комфортності та економічної ефективності функціонування транспортної системи.

В подальших дослідженнях для встановлення суб'єктивної оцінки окремих складових часу пересування будемо застосовувати метод аналізу ієрархій (*Analytic hierarchy process*), розроблений Т. Сааті. Його застосування дає змогу проводити визначення ваг критеріїв через попарне порівняння важливості окремих чинників.

2.2 Підготовка та проведення опитування

Згідно до обраного методу аналізу ієрархій на першому етапі мають бути сформульовані критерії оцінювання. В межах завдання, що розглядається до критеріїв було віднесено:

1. Час очікування на зупинці.

2. Час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи (щільність заповнення 0 пас./м²).

3. Час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м²).

4. Час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м²).

5. Час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м²).

6. Час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м²).

Зазначеним критеріям було присвоєно відповідний код як це наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Кодування критеріїв

Код критерію	Критерій
K1	Час очікування на зупинці
K2	Час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи (щільність заповнення 0 пас./м ²)
K3	Час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м ²)
K4	Час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м ²)
K5	Час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м ²)
K6	Час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м ²)

З урахуванням зазначеного кодування було сформовано блок парних порівнянь (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Блок парних порівнянь

Номер	Лівий критерій	Правий критерій
1	K1	K2
2	K1	K3
3	K1	K4
4	K1	K5
5	K1	K6
6	K2	K3
7	K2	K4
8	K2	K5
9	K2	K6
10	K3	K4
11	K3	K5
12	K3	K6
13	K4	K5
14	K4	K6
15	K5	K6

Опитування проводилось у форматі інтерв'ю. Під час опитування респондентам пропонувалось порівняти два критерії з позиції більшої обтяжливості витрат часу, наприклад, K1 - час очікування на зупинці (лівий критерій) та K2 - час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи (правий критерій). При цьому ставилась умова, що тривалість цих складників пересування є однаковою. Після того як, респондент обирав більш обтяжливий критерій визнався його ступень згідно до шкали, що представлена у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Шкала оцінювання

Оцінка	Пояснення
1	однаково неприємні
1,25	трохи більш обтяжливий
1,70	помірно більш обтяжливий
2,3	суттєво більш обтяжливий
3	максимально більш обтяжливий

Наприклад, якщо респондент зазначив більш обтяжливим критерій K1 та надав оцінку 1,25, то до анкети заносився запис – «K1-1,25».

Анкета застосована під час проведення опитувань представлена у додатку А. Загалом в опитуванні взяло участь 27 респондентів.

2.3 Обробка результатів анкетного дослідження

Наведемо приклад оброблення першої анкети (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Анкета № 1

№	Лівий критерій	Правий критерій	Оцінка
1	K1	K2	K1-2,3
2	K1	K3	K1-1,7
3	K1	K4	K4-1,25
4	K1	K5	K5-1
5	K1	K6	K6-1,25
6	K2	K3	K3-1,25
7	K2	K4	K4-1,25
8	K2	K5	K5-1,7
9	K2	K6	K6-2,3
10	K3	K4	K4-1,25
11	K3	K5	K5-1,7
12	K3	K6	K6-2,3
13	K4	K5	K5-1,25
14	K4	K6	K6-1,7
15	K5	K6	K6-1,7

На першому етапі проводиться пере форматування відповідей респондентів. Якщо респондент вважав більш обтяжливим лівий критерій, то в подальшому присвоювались прямі оцінки: 1, 1,25, 1,70, 2,30 тощо; у випадку більшої обтяжливості правого критерію задавались зворотні оцінки, наприклад, 1/1,25, 1/1,70, 1/1,23 тощо (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Скорегована оцінка парних порівнянь

№	Лівий критерій	Правий критерій	Оцінка	Скорегована оцінка
1	K1	K2	K1-2,3	2,300
2	K1	K3	K1-1,7	1,700
3	K1	K4	K4-1,25	0,800
4	K1	K5	K5-1	1,000
5	K1	K6	K6-1,25	0,800
6	K2	K3	K3-1,25	0,800
7	K2	K4	K4-1,25	0,800
8	K2	K5	K5-1,7	0,588
9	K2	K6	K6-2,3	0,435
10	K3	K4	K4-1,25	0,800
11	K3	K5	K5-1,7	0,588
12	K3	K6	K6-2,3	0,435
13	K4	K5	K5-1,25	0,800
14	K4	K6	K6-1,7	0,588
15	K5	K6	K6-1,7	0,588

На підставі скорегованих оцінок будується матриця парних порівнянь (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Матриця парних порівнянь

Критерії	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1,000	2,300	1,700	0,800	1,000	0,800
K2	0,435	1,000	0,800	0,800	0,588	0,435
K3	0,588	1,250	1,000	0,800	0,588	0,435
K4	1,250	1,250	1,250	1,000	0,800	0,588
K5	1,000	1,700	1,700	1,250	1,000	0,588
K6	1,250	2,300	2,300	1,700	1,700	1,000

Далі виконується нормалізація матриці парних порівнянь. Елементи нормалізованої матриці визначаються за формулою:

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_j a_{ij}}, \quad (2.1)$$

де a_{ij} - елементи матриці парних порівнянь;

i, j - відповідно строки та стовпці матриці.

Нормалізовану матрицю наведено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Нормалізована матриця парних порівнянь

Критерії	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	0,181	0,235	0,194	0,126	0,176	0,208
K2	0,079	0,102	0,091	0,126	0,104	0,113
K3	0,107	0,128	0,114	0,126	0,104	0,113
K4	0,226	0,128	0,143	0,157	0,141	0,153
K5	0,181	0,173	0,194	0,197	0,176	0,153
K6	0,226	0,235	0,263	0,268	0,299	0,260

На підставі нормалізованої матриці парних порівнянь проводиться обчислення вагових коефіцієнтів:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij}^*, \quad (2.2)$$

де n - кількість критеріїв.

Після цього визначаються нормовані вагові коефіцієнти:

$$k_i = \frac{\omega_i}{\omega_2} \quad (2.3)$$

Результати проведених розрахунків наведені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Вагові коефіцієнти

Критерій	Ваговий коефіцієнт	Нормований ваговий коефіцієнт
K1	0,187	1,82
K2	0,102	1,00
K3	0,115	1,12
K4	0,158	1,54
K5	0,179	1,75
K6	0,259	2,52

Далі проводиться розрахунок коефіцієнта погодженості.

Для цього обчислюється добуток матриці парних порівнянь та вектору ваг $(A \cdot \omega)$, та визначається вектор відношень:

$$r_i = \frac{(A \cdot \omega)_i}{\omega_i} \quad (2.4)$$

Результати розрахунків наведені у табл. 2.9.

На підставі отриманих результатів визначається найбільше власне число матриці:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(A \cdot \omega)_i}{\omega_i} \quad (2.5)$$

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку вектору відношень

Критерії	$A \cdot \omega_i$	Ваговий коефіцієнт	Відношення
K1	1,131	0,187	6,055
K2	0,620	0,102	6,050
K3	0,697	0,115	6,054
K4	0,959	0,158	6,068
K5	1,085	0,179	6,059
K6	1,566	0,259	6,056

Враховуючи найбільше власне число матриці обчислюється індекс погодженості:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (2.6)$$

та розраховується коефіцієнт погодженості:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (2.7)$$

де RI - випадковий індекс узгодженості (при $n = 6$, $RI = 1,24$).

Результати проведених розрахунків зведені до табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Результати розрахунку коефіцієнту погодженості

Показник	Значення
Найбільше власне число матриці	6,057
Індекс погодженості	0,01143
Коефіцієнт погодженості	0,00922

Оцінювання погодженості проводиться згідно з даними табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Інтерпретація коефіцієнту погодженості

Значення коефіцієнту погодженості	Висновок
$CR < 0,1$	Дуже добра узгодженість
$0,1 \leq CR < 0,2$	Допустима узгодженість
$CR \geq 0,2$	Слабка узгодженість

Виходячи з проведених розрахунків можна зробити висновок, що для першої анкети спостерігається високий рівень узгодженості.

Аналогічним чином було оброблено інші анкети. В результаті було виявлено, що з 27 заповнених анкет, у чотирьох спостерігалась слабка узгодженість. Ці анкети були виключені з подальшого розгляду.

Наступним етапом, на підставі відібраних 23 анкет формувалась групова матриця парних порівнянь. Елементи цієї матриці визначались в результаті розрахунку середнього геометричного значення оцінок за всіма анкетами:

$$a_{ij} = \sqrt[m]{a_{ij}^{(1)} \cdot a_{ij}^{(2)} \cdot a_{ij}^{(3)} \cdot \dots \cdot a_{ij}^{(m)}}, \quad (2.8)$$

де m - кількість відібраних анкет.

Обробка групової матриці парних порівнянь дала змогу визначити значення вагових коефіцієнтів, що наведені у табл. 2.12.

Коефіцієнт узгодженості групової матриці дорівнює 0,0673, що відповідає допустимим межах.

Таблиця 2.12 – Групові вагові коефіцієнти

Критерій	Ваговий коефіцієнт	Нормований ваговий коефіцієнт
K1	0,209	2,07
K2	0,101	1,00
K3	0,120	1,18
K4	0,147	1,45
K5	0,175	1,73
K6	0,248	2,45

Критерії K2 – K6 характеризують відносну вагомість витрат часу пасажирів на здійснення поїздки за різного рівня заповнення. Для формалізації зміни вагового коефіцієнту зі зростанням рівня заповнення будемо застосовувати метод регресійного аналізу.

В результаті обробки даних було встановлено, що зміна вагового коефіцієнту часу здійснення поїздки з достатньою точністю (коефіцієнт детермінації (R^2) – 0,989; середня помилка апроксимації – 0,62%) описується регресійним рівнянням наступного вигляду:

$$\omega_{\text{поїзд}}(\alpha) = 1 + 0,11 \cdot \alpha^{1,232}, \quad (2.9)$$

де α – щільність заповнення салону транспортного засобу, пас./м².

Графік цієї функції наведено на рис. 2.1.

З урахуванням рівняння (2.9) узагальнена функція витрат часу пасажирів може бути записана так:

$$T_{\text{прив}} = 2,07 \cdot t_{\text{оч}} + t_{\text{поїзд}} \cdot (1 + 0,11 \cdot \alpha^{1,232}), \quad (2.10)$$

де $t_{\text{оч}}$ – час очікування пасажирів;

$t_{\text{поїзд}}$ – час здійснення поїздки.

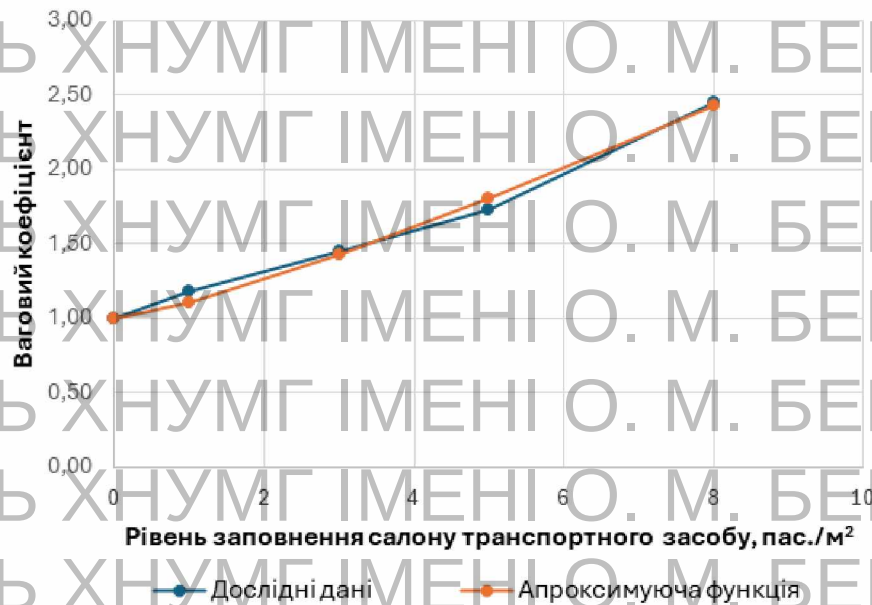


Рисунок 2.1 – Графік зміни вагового коефіцієнту часу здійснення поїздки зі зростанням рівня заповнення салону транспортного засобу

Наступним етапом переходимо до формування цільової функції оптимізації.

2.4 Формування цільової функції оптимізації

Найбільш використовуваним критерієм удосконалення параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах є сукупні витрати перевізника та пасажирів.

Під час здійснення перевезень перевізник несе витрати на паливо, технічне обслуговування, ремонт транспортних засобів, оплату праці працівників, амортизаційні відрахування тощо. Обсяг експлуатаційних витрат визначається кількістю автобусів на маршруті та їхньою пасажиромісткістю, інтервалами руху, швидкісними характеристиками, тривалістю роботи маршруту. Нераціональна організація перевезень призводить до зростання величини експлуатаційних витрат, а отже, зниження результативності роботи перевізника.

Зі свого боку, пасажирів також зазнають певних витрат, пов'язаних з витратами часу та умовами здійснення пересувань (очікування транспорту, поїздка у транспорті, пересадки, погіршенням умов поїздки в разі переповнення салону або порушення регулярності руху). Такі витрати впливають на ступінь задоволеності пасажирів транспортними послугами та загальний рівень життя.

Якщо оптимізацію здійснювати лише з урахуванням інтересів перевізника, це може погіршити умови перевезень для пасажирів. Водночас орієнтація виключно на потреби пасажирів часто спричиняє зростання експлуатаційних витрат. Тому застосування сукупних витрат обох сторін як критерію дає можливість забезпечити баланс між економічною доцільністю та якістю обслуговування.

Таким чином, використання загальних витрат перевізника і пасажирів як критерію оптимізації є доцільним, оскільки дозволяє всебічно оцінити функціонування маршруту, ефективно використовувати ресурси та підвищувати якість транспортних послуг.

Під час формування цільової функції за основу була взята оптимізаційна модель наведена у праці [31], що передбачає мінімізацію загальних витрат перевізника та пасажирів:

$$B_{\text{заг}} = B_{\text{пер}} + B_{\text{пас}} \rightarrow \min, \quad (2.11)$$

де $B_{\text{пер}}$, $B_{\text{пас}}$ - відповідно витрати перевізника та пасажирів, грн.

Витрати перевізника визначаються за формулою:

$$B_{\text{пер}} = \left[B_{\text{зм}}(q_n) + \frac{B_{\text{пост}}(q_n)}{V_e} \right] \cdot \tau \cdot A \cdot V_e, \quad (2.12)$$

де q_n - пасажиромісткість транспортного засобу, пас.;

$B_{зм}(q_n)$ - змінні витрати, грн./км;

$B_{пост}(q_n)$ - постійні витрати, грн./год;

V_e - експлуатаційна швидкість, км/год;

τ - розрахунковий період, год;

A - кількість транспортних засобів, од.

Витрати пасажирів розраховуються за наступною формулою:

$$B_{пас} = Q_{заг} \cdot C_{год} \cdot \omega_{оч} \cdot t_{оч} + Q_{прям} \cdot C_{год} \cdot t_{поїзд}^{прям} \cdot (1 + c \cdot \alpha_{прям}^d) + \\ + Q_{звор} \cdot t_{поїзд}^{звор} \cdot C_{год} \cdot (1 + c \cdot \alpha_{звор}^d), \quad (2.13)$$

де $C_{год}$ - вартість вільного часу пасажирів, грн./год;

$t_{оч}$ - середній час очікування, год;

$Q_{заг}$ - загальний обсяг перевезень за період τ , пас.;

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

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

$\alpha_{прям}$, $\alpha_{звор}$ - відповідно рівень заповнення салону транспортного засобу у прямому та зворотному напрямках маршруту, пас./м²;

$\omega_{оч}$, c , d - коефіцієнти.

У розгорнутому вигляді залежність (2.13) має наступний вигляд:

$$B_{\text{пас}} = \frac{F_{\text{max}} \cdot C_{\text{зод}} \cdot \eta_{\text{зм}}^{\text{прям}}}{K_{\text{довжж}}} \cdot \left(1 + \frac{k_{l_{\text{ер}}}}{K_{\text{напр}}}\right) \cdot \frac{\omega_{\text{оч}} \cdot l_{\text{м}} \cdot (1 + a^2)}{V_e \cdot A} +$$

$$+ \frac{F_{\text{max}} \cdot l_{\text{м}} \cdot C_{\text{зод}}}{K_{\text{довжж}} \cdot V_c} \cdot \left[1 + \left(\frac{c \cdot \alpha_n}{1 - \mu(\alpha_n)} \left(\frac{2 \cdot l_{\text{м}} \cdot F_{\text{max}}}{K_{\text{довжж}} \cdot q_n \cdot A \cdot V_e \cdot \tau} - \mu(\alpha_n)\right)^d\right)\right] + (2.14)$$

$$+ \frac{1}{K_{\text{напр}}} \cdot \left[1 + \left(\frac{c \cdot \alpha_n}{1 - \mu(\alpha_n)} \left(\frac{2 \cdot l_{\text{м}} \cdot F_{\text{max}}}{K_{\text{напр}} \cdot K_{\text{довжж}} \cdot q_n \cdot A \cdot V_e \cdot \tau} - \mu(\alpha_n)\right)^d\right)\right],$$

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

$\eta_{\text{зм}}^{\text{прям}}$ - коефіцієнт змінюваності у прямому (більш пасажиронапруженому) напрямку руху на маршруті;

$K_{\text{довжж}}$, $K_{\text{напр}}$ - відповідно коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку за довжиною та напрямками руху на маршруті;

$l_{\text{м}}$ - довжина маршруту, км;

$k_{l_{\text{ер}}}$ - коефіцієнт, що характеризує співвідношення середньої довжини поїздки пасажирів у прямому та зворотному напрямках руху на маршруті;

V_c - швидкість сполучення, км/год;

α_n - максимальний експлуатаційний рівень заповнення салону транспортного засобу ($\alpha_n = 8$ пас./м²), пас./м²;

$\mu(\alpha_n)$ - питома вага кількості місць для проїзду пасажирів сидячі у загальній пасажиромісткості транспортного засобу.

З урахуванням формул (2.12) та (2.14) цільова функція у розгорнутому виді може бути представлена наступним чином:

$$\begin{aligned}
B_{3AG} = & \tau \cdot A \cdot V_e \left[B_{3M}(q_n) + \frac{B_{пост}(q_n)}{V_e} \right] + \\
& + \frac{F_{\max} \cdot C_{зод} \cdot \eta_{3M}^{прям}}{K_{довж}} \cdot \left(1 + \frac{k_{lcp}}{K_{напр}} \right) \cdot \frac{\omega_{оч} \cdot l_M \cdot (1 + a^2)}{V_e \cdot A} + \\
& + \frac{F_{\max} \cdot l_M \cdot C_{зод}}{K_{довж} \cdot V_c} \cdot \left[\left(1 + \left(\frac{c \cdot \alpha_n}{1 - \mu(\alpha_n)} \left(\frac{2 \cdot l_M \cdot F_{\max}}{K_{довж} \cdot q_n \cdot A \cdot V_e \cdot \tau} - \mu(\alpha_n) \right)^d \right) \right) \right] + \\
& + \frac{1}{K_{напр}} \cdot \left[\left(1 + \left(\frac{c \cdot \alpha_n}{1 - \mu(\alpha_n)} \left(\frac{2 \cdot l_M \cdot F_{\max}}{K_{напр} \cdot K_{довж} \cdot q_n \cdot A \cdot V_e \cdot \tau} - \mu(\alpha_n) \right)^d \right) \right) \right] \rightarrow \min.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Обмеження на параметри цільової функції:

$$A_{\min} = \left\lceil \frac{t_{об}}{I_{\max}} \right\rceil, \tag{2.16}$$

$$A_{\max} = \left\lfloor \frac{t_{об}}{I_{\min}} \right\rfloor, \tag{2.17}$$

де $I_{\max}$, $I_{\min}$ - відповідно мінімальний та максимальний маршрутні інтервали, хв.;

$t_{об}$ - час оберту, хв.

2.5 Висновки по розділу

1. Проведено аналіз можливих методів визначення вагових коефіцієнтів оцінки складників часу пересування. Встановлено, що для розв'язання поставленого завдання доцільним є використання методу аналізу ієрархій Т.

Сааті, який дозволяє враховувати суб'єктивні оцінки пасажирів шляхом попарного порівняння критеріїв. Основними перевагами даного методу є

можливість формалізації експертних суджень, оцінювання узгодженості відповідей респондентів та отримання кількісних вагових коефіцієнтів.

2. Сформовано систему критеріїв, що характеризують різні складові часу пересування пасажирів, зокрема час очікування та час поїздки за різного рівня заповнення салону транспортного засобу. На основі сформованого блоку парних порівнянь проведено анкетне опитування пасажирів у форматі інтерв'ю. У дослідженні взяли участь 27 респондентів.

3. В результаті обробки анкетних даних побудовано матриці парних порівнянь, виконано їх нормалізацію та визначено вагові коефіцієнти окремих критеріїв. Перевірка коефіцієнтів погодженості показала, що чотири анкети характеризувалися недостатнім рівнем узгодженості та були виключені з подальшого аналізу. На підставі 23 узгоджених анкет сформовано групову матрицю парних порівнянь і визначено групові вагові коефіцієнти. Отримані результати підтвердили, що найбільш обтяжливими для пасажирів є поїздка у переповненому транспорті та витрати часу на очікування.

4. Проведений регресійний аналіз дозволив встановити аналітичну залежність між рівнем заповнення салону транспортного засобу та ваговим коефіцієнтом часу поїздки. Отримана модель характеризується високою точністю апроксимації та може бути використана для формалізації впливу умов поїздки на сприйняття витрат часу пасажирями.

5. Сформовано цільову функції оптимізації параметрів транспортного обслуговування. В якості критерію оптимізації прийнято сукупні витрати перевізника та пасажирів, що дозволяє забезпечити баланс між економічною ефективністю роботи маршруту та якістю транспортного обслуговування населення. Сформована математична модель враховує експлуатаційні витрати перевізника, часові витрати пасажирів, рівень заповнення транспортних засобів та основні параметри функціонування маршруту. Отримана модель створює основу для подальшого визначення раціональних параметрів роботи міських автобусних маршрутів та оцінювання ефективності транспортного обслуговування.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТАХ

3.1 Методика оптимізації параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах

Оптимізація параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах виконується згідно до алгоритму представленому на рис. 3.1. Запропонована схема відображає послідовність проведення оптимізації та етапи прийняття рішень щодо вибору раціональних параметрів функціонування маршруту.

На початковому етапі проводиться оцінювання фактичних умов функціонування автобусного маршруту. У межах цього етапу виконуються такі дії:

- встановлюються основні характеристики маршруту, зокрема його протяжність, кількості зупиночних пунктів та схема траси маршруту;
- визначається розподіл пасажиропотоків на маршруті в періоди найбільшого навантаження;
- визначаються наявні параметри організації перевезень, включаючи інтервали руху та кількість транспортних засобів, задіяних на маршруті;
- встановлюються характеристики автобусів, що використовуються для перевезень;
- проводиться аналіз технічних та експлуатаційних показників роботи рухомого складу на маршруті.

Другий етап передбачає формування вихідних даних для проведення модельного розрахунку. На цьому етапі систематизуються результати обстежень пасажиропотоків, техніко-експлуатаційні показники роботи маршруту, характеристики рухомого складу тощо.



Рисунок 3.1 – Етапи оптимізації параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах

На третьому етапі здійснюється модельний розрахунок щодо коригування необхідної кількості транспортних засобів наявної пасажиромісткості. Метою даного етапу є визначення раціональної кількості автобусів для забезпечення нормативного рівня транспортного обслуговування та допустимого рівня заповнення салону.

Четвертий етап полягає у формуванні переліку альтернативних марок автобусів для можливого застосування на маршруті. При цьому враховуються показники пасажиромісткості, технічні характеристики, економічність експлуатації та відповідність умовам функціонування маршруту.

На п'ятому етапі проводиться модельний розрахунок параметрів транспортного обслуговування у разі застосування автобусів альтернативних марок. Для кожного варіанта визначаються експлуатаційні показники, витрати перевізника, витрати часу пасажирів та інтегральні показники ефективності.

Завершальним етапом є проведення порівняльного аналізу отриманих варіантів удосконалення параметрів транспортного обслуговування та вибір найбільш ефективного рішення. Вибір оптимального варіанта здійснюється з урахуванням економічної ефективності перевезень та належного рівня транспортного обслуговування пасажирів.

3.2 Характеристика автобусного маршруту

Для проведення практичної апробації моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування було обрано автобусний маршрут № 37 міста Львів. Схему маршруту наведено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Схема автобусного маршруту № 37 міста Львів

Автобусний маршрут №37 у місті Львів забезпечує транспортне сполучення між мікрорайоном Під Голоском та вулицею Гната Хоткевича, з'єднуючи Шевченківський і Сихівський райони міста. Маршрут обслуговується ЛК АТП №1 та належить до важливих міських автобусних маршрутів, які забезпечують перевезення пасажирів між житловими районами, центральною частиною міста та великими транспортно-пересадковими вузлами.

Загальна довжина маршруту становить 15,55 км. Рух автобусів здійснюється щоденно у проміжку з 07:00 до 21:15. Середній інтервал руху у будні дні становить 12–15 хвилин.

Маршрут проходить через значну кількість важливих міських об'єктів та транспортних вузлів, зокрема проспект В'ячеслава Чорновола, вулицю Підвальну, вулицю Шота Руставелі, район Сихова, ТРЦ «Шувар», Автостанцію №5 та Парк 700-річчя Львова. Це забезпечує високий рівень

транспортної доступності для мешканців різних районів міста та створює умови для зручних пересадок на інші види громадського транспорту.

Для обслуговування маршруту використовуються автобуси великої пасажиромісткості, низькопідлогового типу, що дозволяє підвищити комфорт перевезень та забезпечити доступність транспорту для маломобільних груп населення. Маршрут характеризується значним пасажиропотоком у години пік, особливо на ділянках, що проходять через центральну частину міста та Сихівський житловий масив. Вартість проїзду дорівнює 30 грн.

Особливістю маршруту №37 є поєднання житлових районів із центральною частиною міста без необхідності пересадок, що зумовлює його високу соціальну значущість. Водночас значна протяжність маршруту та складні умови руху у центральній частині Львова можуть призводити до нерівномірності інтервалів руху та переповнення транспортних засобів у години максимального навантаження.

Параметри перевізного процесу на маршруті у ранкову годину пік (з 8:00 по 9:00) наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри перевізного процесу на маршруті

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	Значення
1	2	3	4
1	Кінцеві зупинки	-	вул. Під Голоском - вул. Гнага Хоткевича
2	Довжина маршруту	км	15,55
3	Кількість зупинок	од.	31
4	Середня довжина перегону	км	0,52
5	Марка застосовуваних автобусів	-	Electron A185; MA3 203; ЛАЗ A183
6	Кількість автобусів, що працюють на маршруті	од.	16

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
7	Пасажироміст- кість автобусів	пас.	100
8	Кількість місць для сидіння	пас.	30
9	Експлуатаційна швидкість	км/год	19,8
10	Час оборту	хв.	94
11	Швидкість сполучення	км/год	22,4
12	Максимальний пасажиропотік на маршруті	пас./год	987
13	Обсяг перевезених пасажирів	пас.	3124
14	Коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку за довжиною маршруту	-	1,38
15	Коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку за напрямками руху на маршруті	-	1,41
16	Середня відстань поїздки пасажирів у прямому напрямку	км	6,23
17	Середня відстань поїздки пасажирів у зворотному напрямку	км	5,89
18	Коефіцієнт змінюваності (прямий напрямок)	-	2,49

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
19	Коефіцієнт змінюваності (зворотний напрям)	-	2,64

Вартість транспортного часу пасажирів визначаємо за формулою [32]:

$$C_{год} = \frac{3П_{ср}}{\Phi_{км} - (\Phi_{рм} + \Phi_{ом})}, \quad (3.1)$$

де $3П_{ср}$ – середня заробітна плата, грн./місяць;

$\Phi_{км}$, $\Phi_{рм}$, $\Phi_{ом}$ – відповідно кількість годин у місяці, кількість годин роботи на місяць, кількість годин вільного часу на місяць.

$$C_{год} = \frac{26243}{720 - (174,6 + 300)} = 106,94 \text{ грн./год.}$$

Характеристику альтернативних марок автобусів наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Альтернативні марки автобусів

Автобус	Пасажиро-місткість, пас.	Кількість місць для сидіння	Змінні витрати, грн./км	Постійні витрати, грн./год
Еталон BAZ-A079	40	19	21,73	258,41
Богдан А221	61	23	30,11	292,44
MAZ-206.076	75	28	38,63	347,59
Існуючий варіант	100	30	46,82	397,54
MAN Lion's City 19	158	53	55,63	498,95

На підставі зазначених вихідних даних наступним етапом переходимо до проведення модельних розрахунків.

3.3 Проведення модельних розрахунків

Виконаємо модельний розрахунок для наявних параметрів процесу перевезень, у межах якого використовуються автобуси марок Електрон А185, МАЗ 203, ЛАЗ А183 у кількості 16 одиниць. Отримані результати моделювання подано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри транспортного обслуговування за умов існуючого варіанту організації перевезень

Кількість автобусів, од.	Маршрутний руху, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
14,0	6,7	5,7	9,2	18544,1	67229,1	85773,1
15,0	6,3	5,1	8,4	19868,6	65494,4	85363,0
16,0	5,9	4,6	7,6	21193,2	63976,6	85169,8
17,0	5,5	4,1	7,0	22517,8	62637,3	85155,1
18,0	5,2	3,7	6,4	23842,4	61446,9	85289,3
19,0	5,0	3,3	5,9	25166,9	60381,7	85548,7
20,0	4,7	3,0	5,4	26491,5	59423,1	85914,6
21,0	4,5	2,7	5,0	27816,1	58555,8	86371,9
22,0	4,3	2,4	4,6	29140,7	57767,3	86908,0
23,0	4,1	2,2	4,3	30465,2	57047,4	87512,7
24,0	3,9	1,9	4,0	31789,8	56387,5	88177,3
25,0	3,8	1,7	3,7	33114,4	55780,4	88894,8

На основі результатів модельного розрахунку побудовано графік зміни витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.3), а також графік загальних витрат (рис. 3.4).

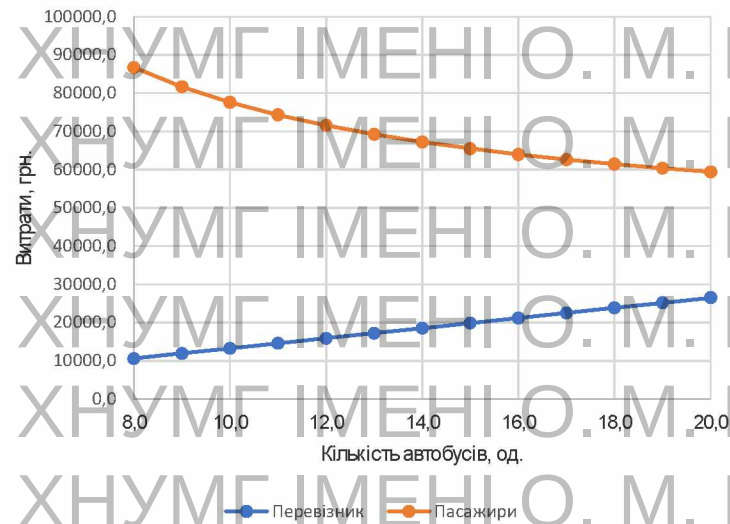


Рисунок 3.3 – Зміна витрат перевізника та пасажирів за умов існуючого варіанту організації перевезень

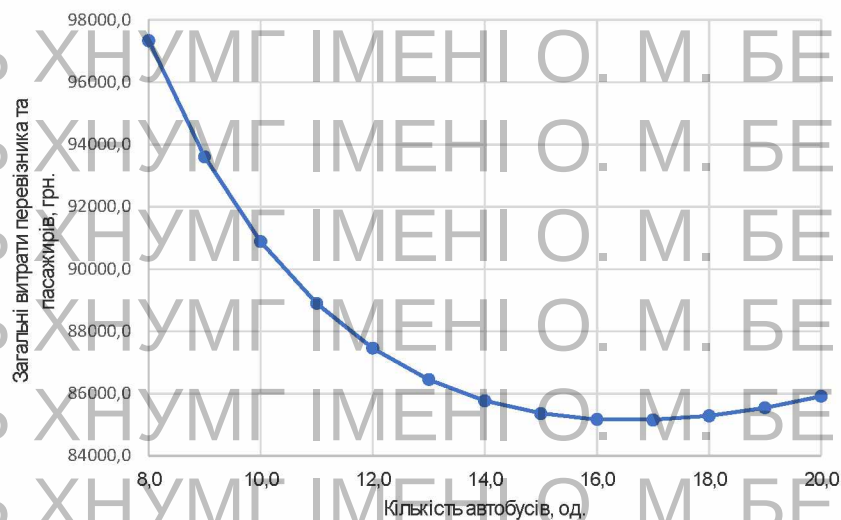


Рисунок 3.4 – Зміна загальних витрат за умов існуючого варіанту організації перевезень

За результатами проведеного модельного розрахунку встановлено, що оптимальна кількість автобусів застосованих марок автобусів становить 17 одиниць за наявної кількості 16 одиниць. При збільшенні кількості автобусів на одну одиницю максимальна щільність заповнення транспортних засобів на найбільш завантаженому перегоні зменшиться з 7,64 пас./м² для існуючого варіанта до 6,99 пас./м² після коригування кількості автобусів.

Виконаємо модельний розрахунок за умов застосування автобусів марки Еталон BAZ-A079. Отримані результати моделювання подано в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри транспортного обслуговування за умов застосування автобусів марки Еталон BAZ-A079

Кількість автобусів, од.	Маршрутний руху, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
37	2,5	4,33	8,72	25480,6	59172,9	84653,4
38	2,5	4,02	8,30	26169,2	58454,3	84623,5
39	2,4	3,74	7,91	26857,9	57772,5	84630,4
40	2,4	3,46	7,53	27546,6	57124,9	84671,4
41	2,3	3,20	7,17	28235,2	56508,8	84744,0
42	2,2	2,95	6,82	28923,9	55933,7	84857,6
43	2,2	2,71	6,50	29612,6	55545,3	85157,9
44	2,1	2,49	6,18	30301,2	55174,6	85475,8

На основі результатів модельного розрахунку побудовано графік зміни витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.5), а також графік загальних витрат (рис. 3.6).

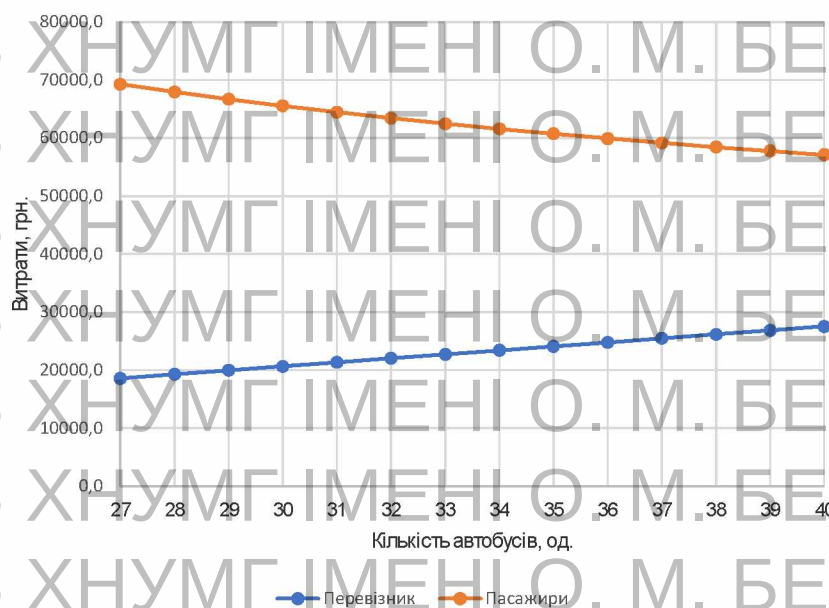


Рисунок 3.5 – Зміна витрат перевізника та пасажирів за умов використання автобусів марки Еталон BAZ-A079

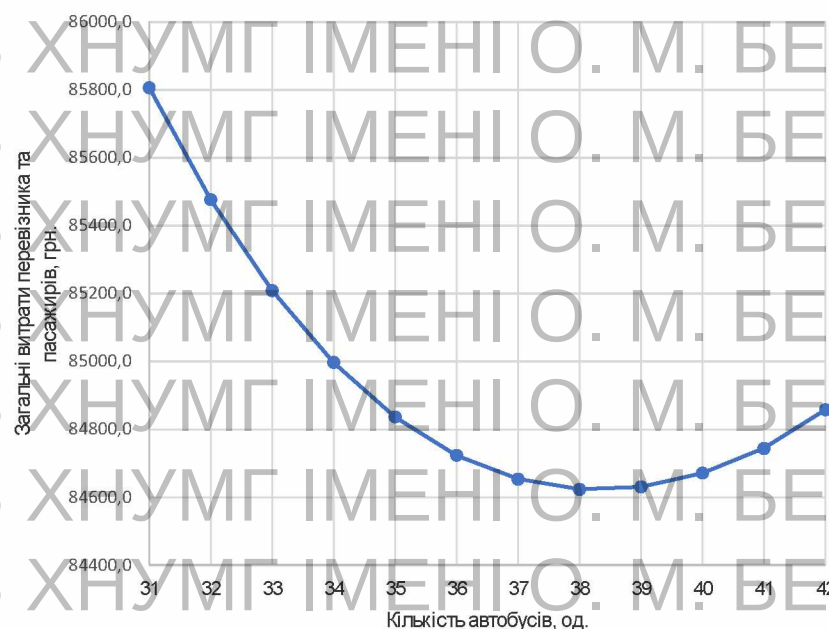


Рисунок 3.6 – Зміна загальних витрат за умов використання автобусів марки Еталон BAZ-A079

За результатами проведеного розрахунку встановлено, що при використанні автобусів марки Еталон BAZ-A079 необхідна кількість транспортних засобів становитиме 39 одиниць. За таких умов буде забезпечено інтервал руху на рівні 2,4 хв. Щільність заповнення автобусів на найбільш завантаженому перегоні становитиме 7,91 пас./м², тоді як середнє значення щільності пасажирів складатиме 3,74 пас./м².

Виконаємо модельний розрахунок за умов застосування автобусів марки Богдан А221. Отримані результати моделювання подано в табл. 3.5.

На основі результатів модельного розрахунку побудовано графік зміни витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.7), а також графік загальних витрат (рис. 3.8).

Таблиця 3.5 – Параметри транспортного обслуговування за умов застосування автобусів марки Богдан А221

Кількість автобусів, од.	Маршрутний рух, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
24	3,93	5,01	8,76	21326,8	62636,0	83962,9
25	3,77	4,62	8,21	22215,5	61640,3	83855,7
26	3,62	4,25	7,71	23104,1	60721,1	83825,2
27	3,49	3,92	7,25	23992,7	59870,1	83862,8
28	3,37	3,60	6,81	24881,3	59079,8	83961,1
29	3,25	3,31	6,41	25769,9	58344,0	84114,0
30	3,14	3,04	6,04	26658,5	57657,3	84315,9
31	3,04	2,79	5,69	27547,2	57014,9	84562,1
32	2,95	2,55	5,36	28435,8	56412,7	84848,4
33	2,86	2,32	5,05	29324,4	55846,9	85171,3
34	2,77	2,11	4,76	30213,0	55314,4	85527,4

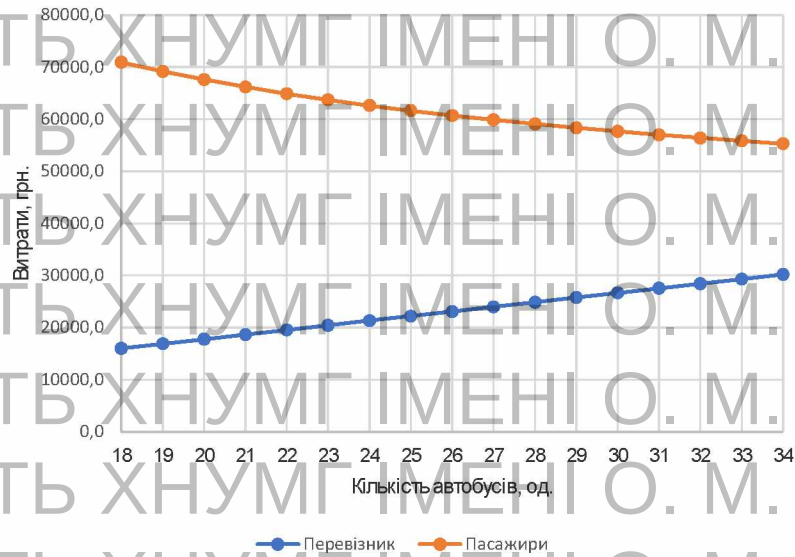


Рисунок 3.7 – Зміна витрат перевізника та пасажирів за умов використання автобусів марки Богдан А221

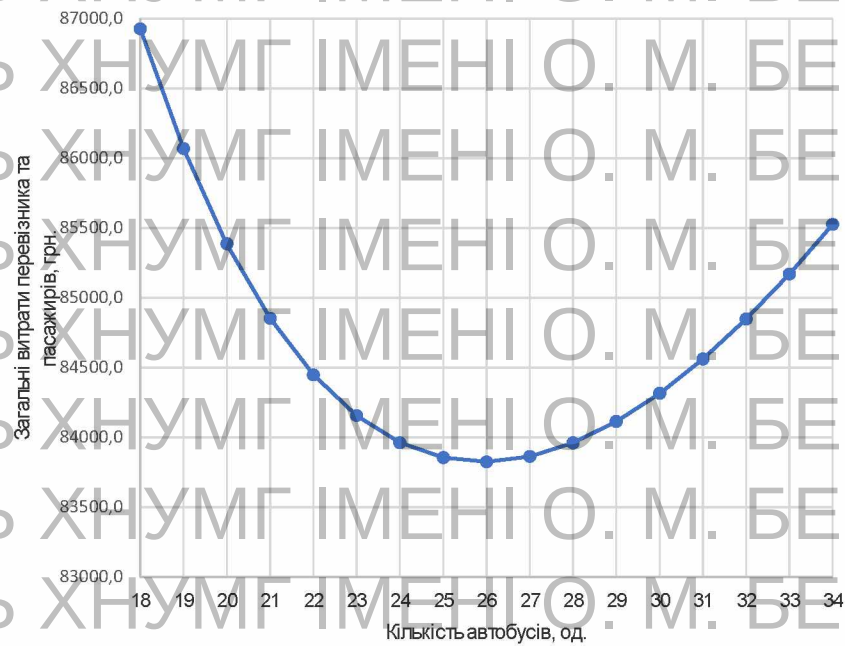


Рисунок 3.8 – Зміна загальних витрат за умов використання автобусів марки Богдан А221

За результатами проведеного розрахунку встановлено, що при використанні автобусів марки Богдан А221 необхідна кількість транспортних засобів становитиме 26 одиниць. За таких умов буде забезпечено інтервал руху на рівні 3,62 хв. Щільність заповнення автобусів на найбільш завантаженому перегоні становитиме 7,71 пас./м², тоді як середнє значення щільності пасажирів складатиме 3,62 пас./м².

Виконаємо модельний розрахунок за умов застосування автобусів марки MAZ-206.076. Отримані результати моделювання подано в табл. 3.6.

На основі результатів модельного розрахунку побудовано графік зміни витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.9), а також графік загальних витрат (рис. 3.10).

Таблиця 3.6 – Параметри транспортного обслуговування за умов застосування автобусів марки MAZ-206.076

Кількість автобусів, од.	Маршрутний рух, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
20	4,71	4,79	8,43	22249,3	62917,99	85167,27
21	4,49	4,34	7,80	23361,7	61728,06	85089,80
22	4,28	3,93	7,23	24474,2	60646,30	85120,50
23	4,10	3,55	6,71	25586,7	59658,60	85245,27
24	3,93	3,20	6,23	26699,1	58753,21	85452,35
25	3,77	2,88	5,79	27811,6	57920,26	85731,86
26	3,62	2,59	5,38	28924,1	57151,37	86075,44
27	3,49	2,32	5,01	30036,5	56439,45	86475,97
28	3,37	2,06	4,66	31149,0	55778,37	86927,36
29	3,25	1,83	4,33	32261,5	55254,06	87515,52
30	3,14	1,61	4,03	33373,9	54838,24	88212,16
31	3,04	1,40	3,75	34486,38	54449,24	88935,63
32	2,95	1,21	3,48	35598,85	54084,56	89683,41

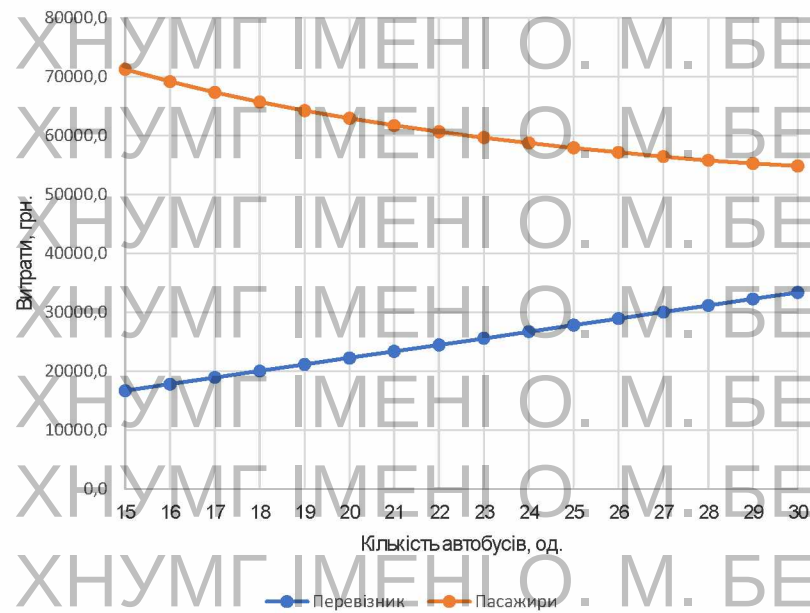


Рисунок 3.9 – Зміна витрат перевізника та пасажирів за умов використання автобусів марки MAZ-206.076

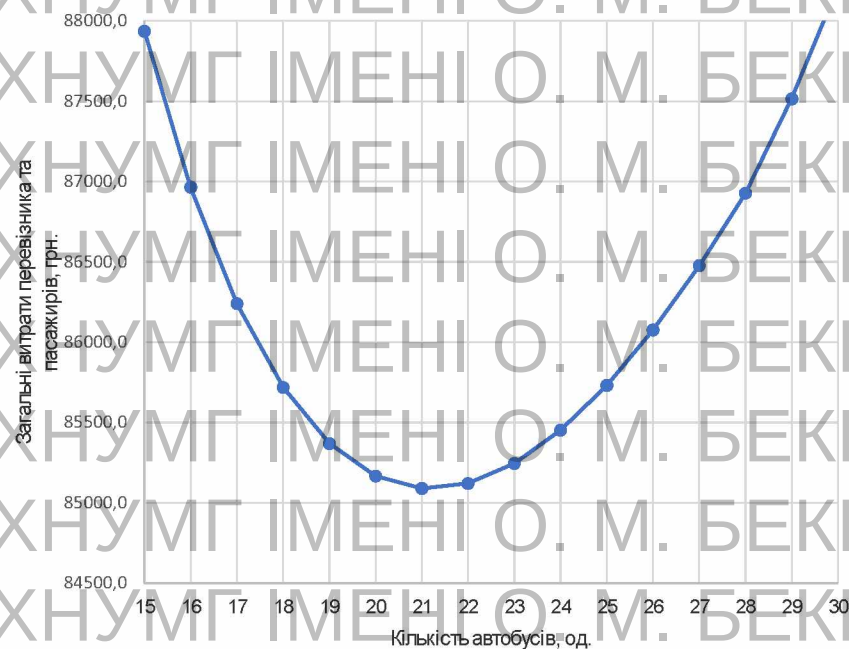


Рисунок 3.10 – Зміна загальних витрат за умов використання автобусів марки MAZ-206.076

За результатами проведеного розрахунку встановлено, що при використанні автобусів марки MAZ-206.076 необхідна кількість

транспортних засобів становитиме 21 одиницю. За таких умов буде забезпечено інтервал руху на рівні 4,49 хв. Щільність заповнення автобусів на найбільш завантаженому перегоні становитиме 7,80 пас./м², тоді як середнє значення щільності пасажирів складатиме 4,34 пас./м².

Виконаємо модельний розрахунок за умов застосування автобусів марки MAN Lion's City 19. Отримані результати моделювання подано в табл.

3.7.

На основі результатів модельного розрахунку побудовано графік зміни витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.11), а також графік загальних витрат (рис. 3.12).

Таблиця 3.7 – Параметри транспортного обслуговування за умов застосування автобусів марки MAN Lion's City 19

Кількість автобусів, од.	Маршрутний руху, хв.	Середній рівень заповнення, пас./м ²	Рівень заповнення на найбільш завантаженому перегоні маршруту, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
10	9,4	4,52	7,77	16004,24	66912,55	82916,79
11	8,6	3,74	6,70	17604,66	64439,99	82044,66
12	7,9	3,09	5,81	19205,09	62379,53	81584,62
13	7,2	2,55	5,05	20805,51	60636,06	81441,57
14	6,7	2,08	4,40	22405,94	59141,66	81547,59
15	6,3	1,67	3,84	24006,36	57846,51	81852,87
16	5,9	1,31	3,34	25606,78	56961,68	82568,46
17	5,5	1,00	2,91	27207,21	56188,86	83396,07
18	5,2	0,72	2,52	28807,63	55501,91	84309,54
19	5,0	0,47	2,18	30408,06	54887,27	85295,33
20	4,7	0,24	1,87	32008,48	54334,10	86342,58
21	4,5	0,04	1,59	33608,90	53833,61	87442,51
22	4,3	0,00	1,33	35209,33	53590,33	88799,65
23	4,1	0,00	1,10	36809,75	53417,62	90227,37

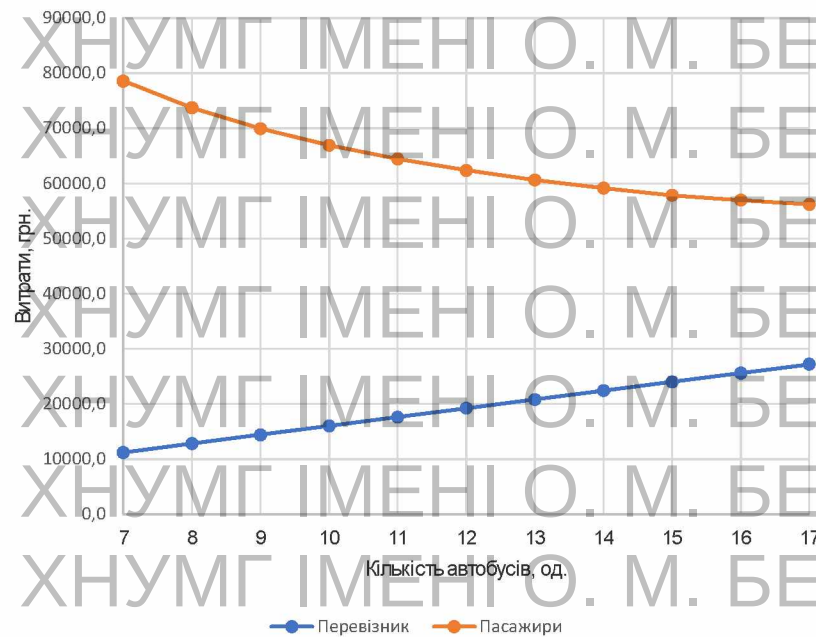


Рисунок 3.11 – Зміна витрат перевізника та пасажирів за умов використання автобусів марки MAN Lion's City 19

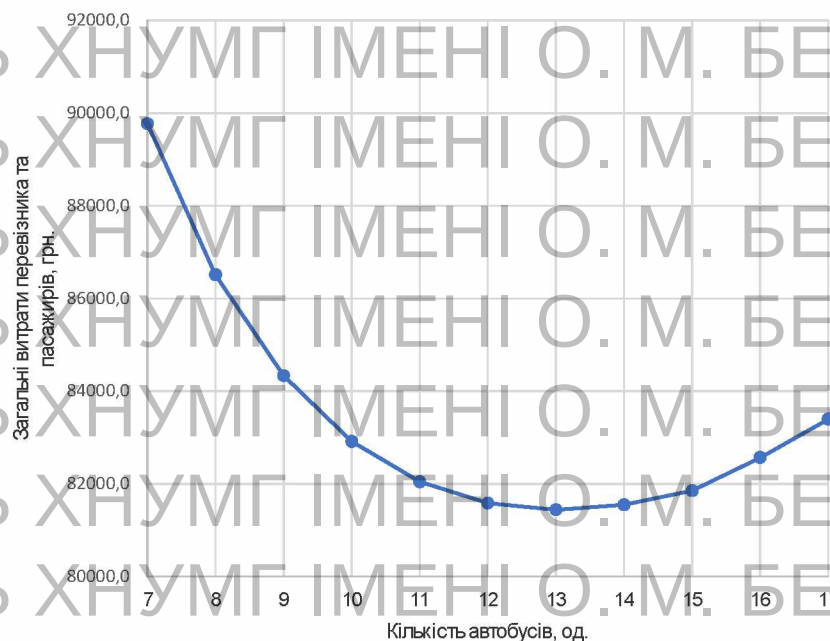


Рисунок 3.12 – Зміна загальних витрат за умов використання автобусів марки MAN Lion's City 19

За результатами проведеного розрахунку встановлено, що при використанні автобусів марки MAN Lion's City 19 необхідна кількість

транспортних засобів становитиме 13 одиниць. За таких умов буде забезпечено інтервал руху на рівні 7,2 хв. Щільність заповнення автобусів на найбільш завантаженому перегоні становитиме 5,05 пас./м², тоді як середнє значення щільності пасажирів складатиме 2,55 пас./м².

Далі переходимо до вибору оптимального варіанту транспортного обслуговування пасажирів на маршруті.

3.4 Вибір оптимального варіанту транспортного обслуговування пасажирів

На підставі проведених розрахунків визначаємо узагальнені параметри альтернативних варіантів транспортного обслуговування (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Параметри альтернативних варіантів транспортного обслуговування

Марка автобусу	Пасажиромісткість, пас.	Маршрутний інтервал, хв.	Кількість автобусів, од.	Щільність заповнення на найбільш завантаженому перегоні, пас./м ²	Витрати перевізника, грн.	Витрати пасажирів, грн.	Загальні витрати, грн.
Еталон BAZ-A079	40	2,4	39	7,91	26857,9	57772,5	84630,4
Богдан A221	61	3,6	26	7,71	23104,1	60721,1	83825,2
MAZ-206.076	75	4,5	21	7,80	23361,7	61728,1	85089,8
Існуючий варіант	100	5,9	16	7,64	21193,2	63976,6	85169,8
Коригування існуючого варіанту	100	5,5	17	6,99	22517,8	62637,3	85155,1
MAN Lion's City 19	158	7,2	13	5,05	20805,5	60636,1	81441,6

Виходячи з даних табл. 3.8 будемо діаграми зміни параметрів перевезеного процесу на маршруті за альтернативних варіантів транспортного обслуговування (рис. 3.13 - 3.18).



Рисунок 3.13 – Діаграма зміни потрібної кількості автобусів

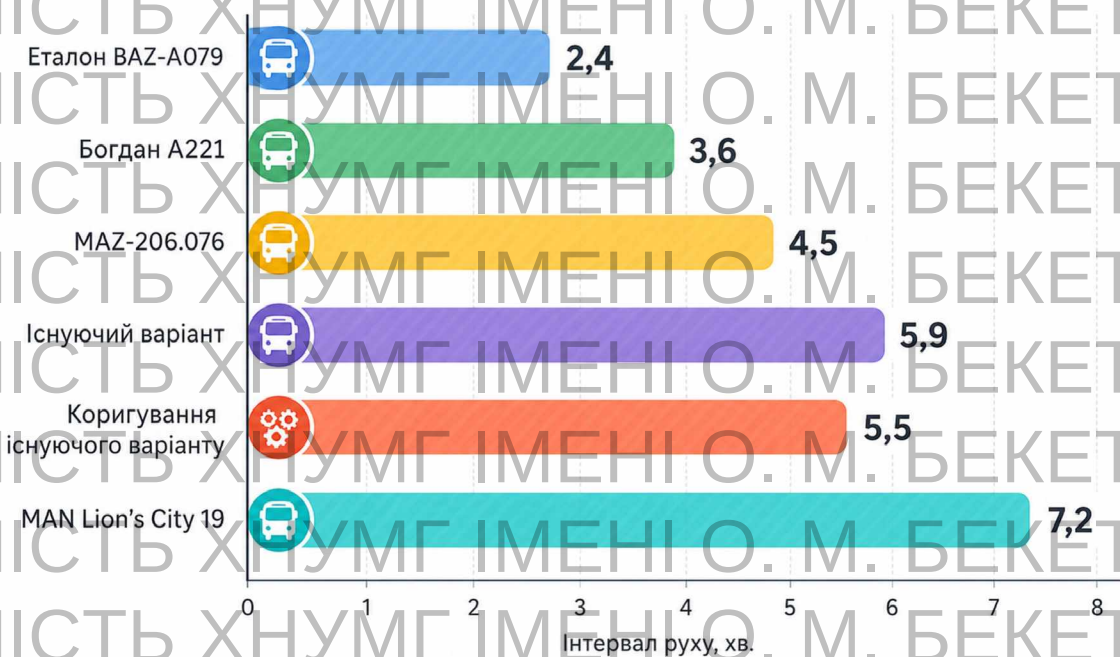


Рисунок 3.14 – Діаграма зміни маршрутного інтервалу

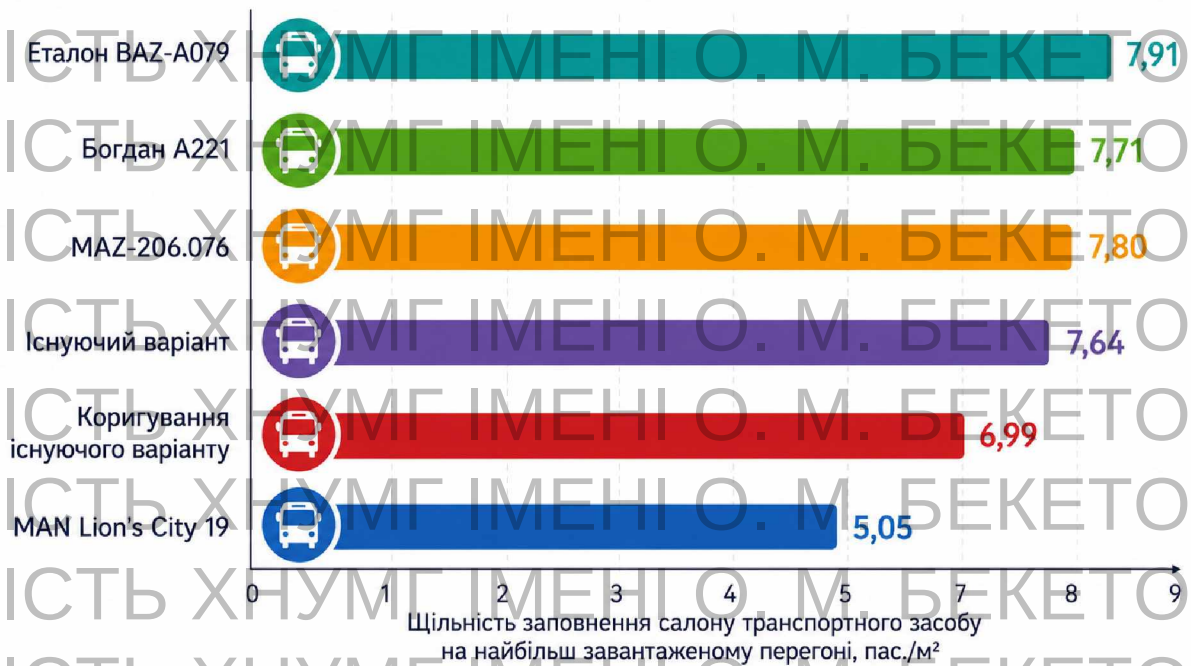


Рисунок 3.15 – Діаграма зміни рівня заповнення автобусів на найбільш завантаженому перегоні маршруту

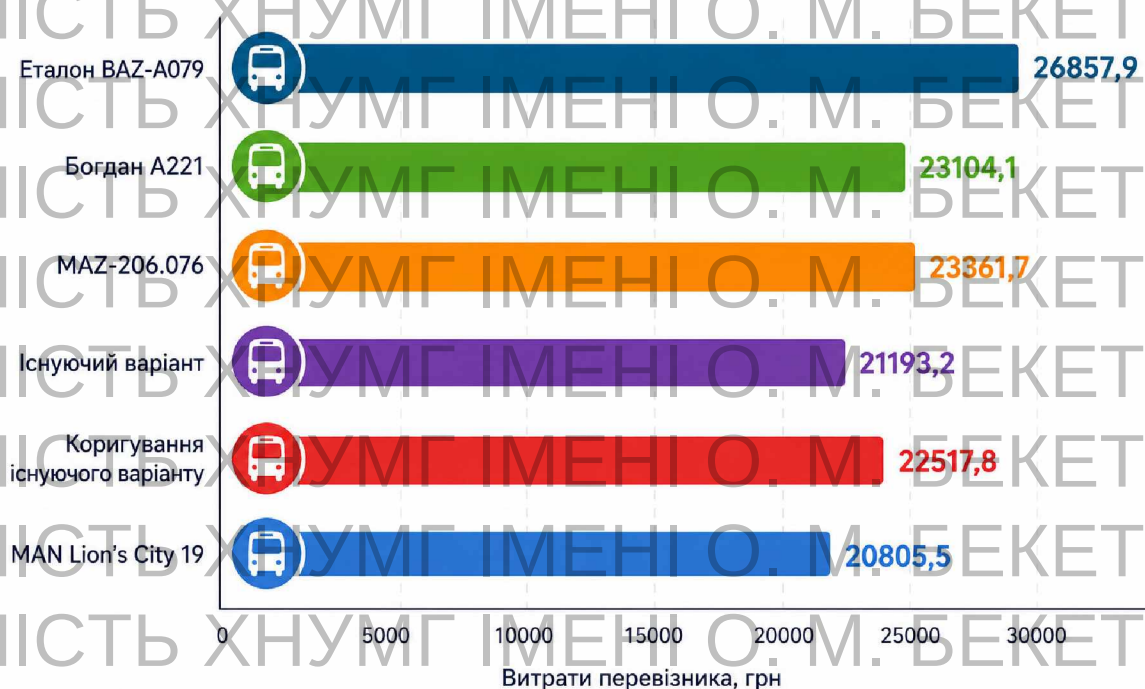


Рисунок 3.16 – Діаграма зміни витрат перевізника

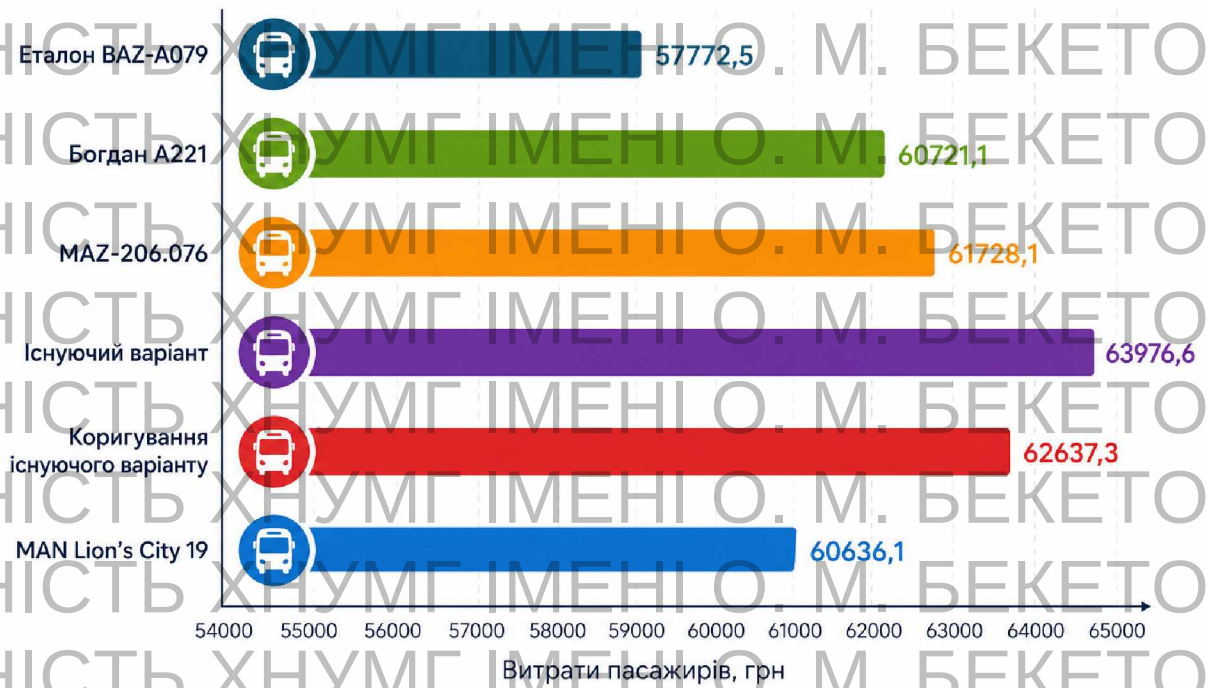


Рисунок 3.17 – Діаграма зміни витрат пасажирів

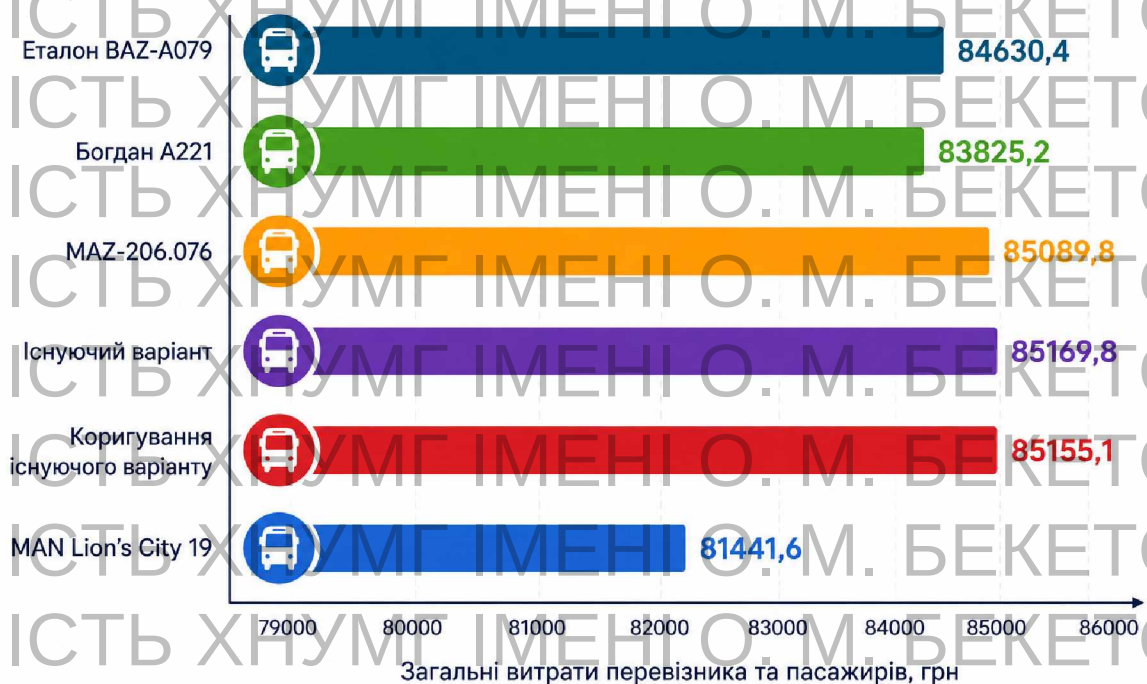


Рисунок 3.18 – Діаграма зміни загальних витрат

Аналіз зміни потрібної кількості автобусів залежно від обраного варіанта транспортного обслуговування (рис. 3.13) показує, що найбільша кількість транспортних засобів необхідна у разі використання автобусів Еталон BAZ-A079 (39 од.), що пояснюється їх меншою пасажиромісткістю. Найменша потреба у транспортних засобах спостерігається при використанні автобусів великої та особливо великої місткості, зокрема MAN Lion's City 19 (13 од.). Відповідно аналіз зміни інтервалів руху автобусів (рис. 3.14) показав зворотню залежність. Зі збільшенням пасажиромісткості транспортних засобів спостерігається зростання інтервалу руху, оскільки наявний пасажиропотік засвоюється меншою кількістю автобусів. Найменший інтервал руху характерний для автобусів малої місткості (2,4 хв.), тоді як найбільший спостерігається у разі використання зчленованих автобусів марки MAN Lion's City 19 (7,2 хв.).

Аналіз рівня заповнення салону транспортного засобу на найбільш завантаженому перегоні маршруту (рис. 3.15) показав, що найвищий рівень заповнення спостерігається у разі використання автобусів Еталон BAZ-A079 ($7,91 \text{ пас./м}^2$), що негативно впливає на комфортність перевезень. Найкращі умови перевезення пасажирів забезпечуються при використанні автобусів MAN Lion's City 19, для яких характерна найменша щільність заповнення салону ($5,05 \text{ пас./м}^2$).

Аналіз зміни витрат перевізника за різних варіантів транспортного обслуговування (рис. 3.16) дав змогу встановити, що максимальні витрати перевізника характерні для використання автобусів малої місткості, що пов'язано з необхідністю збільшення кількості транспортних засобів на маршруті. Найменші витрати забезпечуються при застосуванні автобусів великої та особливо великої місткості або коригуванні існуючого варіанта організації перевізного процесу. У той же час найменші витрати пасажирів спостерігаються у разі використання автобусів малої та середньої місткості. Така залежність пояснюється меншими інтервалами руху та відповідно меншим часом очікування.

На підставі аналізу зміни загальних витрат перевізника та пасажирів (рис. 3.18) можна дійти висновку, що мінімальні загальні витрати досягаються у разі застосування автобусів MAN Lion's City 19. Використання автобусів цієї марки для роботи на маршруті забезпечить мінімізацію витрат перевізника за умов дотримання високого рівня транспортного обслуговування пасажирів.

3.5 Висновки по розділу

1. Проведено практичну апробацію розробленої моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах на прикладі автобусного маршруту №37 міста Львів. У межах дослідження сформовано методику оптимізації параметрів транспортного обслуговування, яка передбачає послідовне оцінювання існуючих умов функціонування маршруту, формування вихідних даних, проведення модельних розрахунків та вибір найбільш ефективного варіанта організації перевезень.

2. У ході дослідження встановлено, що автобусний маршрут №37 характеризується значним пасажиропотоком у години пік та високим рівнем транспортного навантаження. Аналіз параметрів перевізного процесу показав, що існуюча система організації перевезень забезпечує достатній рівень транспортного обслуговування, однак характеризується підвищеним рівнем заповнення транспортних засобів на найбільш завантажених ділянках маршруту.

3. За результатами проведених розрахунків встановлено, що мінімальні загальні витрати перевізника та пасажирів забезпечуються у разі використання автобусів MAN Lion's City 19. Застосування автобусів даної марки дозволяє забезпечити належний рівень транспортного обслуговування, знизити рівень переповнення транспортних засобів та досягти найкращих техніко-економічних показників функціонування маршруту. Отримані

результати підтверджують ефективність запропонованої моделі оптимізації параметрів транспортного обслуговування та можливість її практичного використання для вдосконалення організації міських пасажирських перевезень.

ВИСНОВКИ

1. Громадський транспорт є важливою складовою сталого розвитку міст, оскільки забезпечує екологічну, соціальну та економічну ефективність міської мобільності. Його розвиток сприяє зменшенню негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, підвищенню доступності міського простору та формуванню комфортного міського середовища. У сучасних умовах саме пріоритетний розвиток громадського транспорту розглядається як один із головних напрямів трансформації транспортних систем міст відповідно до принципів сталого розвитку.

2. Ключовими чинниками покращення послуг маршрутного пасажирського транспорту є забезпечення надійності та регулярності перевезень, оптимізація маршрутної мережі, підвищення рівня комфорту та безпеки, удосконалення інформаційного забезпечення, а також врахування поведінкових особливостей пасажирів.

3. Сучасні підходи до оцінювання параметрів транспортного обслуговування дедалі більше орієнтуються на комплексне використання суб'єктивних та об'єктивних показників. Суб'єктивний підхід дозволяє враховувати потреби, очікування та поведінкові особливості пасажирів, тоді як об'єктивний забезпечує кількісне оцінювання експлуатаційної ефективності транспортної системи. Їх поєднання створює передумови для більш повного та достовірного аналізу якості транспортного обслуговування пасажирів і формування ефективної транспортної політики.

4. Оптимізація міських пасажирських перевезень є багатокомпонентним процесом, що охоплює технічні, економічні, організаційні, соціальні та екологічні аспекти функціонування транспортної системи. Ефективне застосування сучасних методів і підходів до оптимізації дозволяє забезпечити підвищення якості транспортного обслуговування населення,

раціональне використання ресурсів та формування сталої міської транспортної системи.

5. Рівень заповнення маршрутних транспортних засобів є важливим показником, який одночасно визначає економічну ефективність перевезень та рівень задоволеності пасажирів. Надмірне або недостатнє заповнення транспортних засобів негативно впливає на функціонування транспортної системи, тому одним із головних завдань організації міських пасажирських перевезень є забезпечення оптимального співвідношення між провізною спроможністю маршруту та фактичним попитом на перевезення.

6. Проведено аналіз можливих методів визначення вагових коефіцієнтів оцінки складників часу пересування. Встановлено, що для розв'язання поставленого завдання доцільним є використання методу аналізу ієрархій Т. Сааті, який дозволяє враховувати суб'єктивні оцінки пасажирів шляхом попарного порівняння критеріїв. Основними перевагами даного методу є можливість формалізації експертних суджень, оцінювання узгодженості відповідей респондентів та отримання кількісних вагових коефіцієнтів.

7. Сформовано систему критеріїв, що характеризують різні складові часу пересування пасажирів, зокрема час очікування та час поїздки за різного рівня заповнення салону транспортного засобу. На основі сформованого блоку парних порівнянь проведено анкетне опитування пасажирів у форматі інтерв'ю. У дослідженні взяли участь 27 респондентів.

8. В результаті обробки анкетних даних побудовано матриці парних порівнянь, виконано їх нормалізацію та визначено вагові коефіцієнти окремих критеріїв. Перевірка коефіцієнтів погодженості показала, що чотири анкети характеризувалися недостатнім рівнем узгодженості та були виключені з подальшого аналізу. На підставі 23 узгоджених анкет сформовано групову матрицю парних порівнянь і визначено групові вагові коефіцієнти. Отримані результати підтвердили, що найбільш обтяжливими для пасажирів є поїздки у переповненому транспортному засобі та витрати часу на очікування транспорту.

9. Проведений регресійний аналіз дозволив встановити аналітичну залежність між рівнем заповнення салону транспортного засобу та ваговим коефіцієнтом часу поїздки. Отримана модель характеризується високою точністю апроксимації та може бути використана для формалізації впливу умов поїздки на сприйняття витрат часу пасажирями.

10. Сформовано цільову функції оптимізації параметрів транспортного обслуговування. В якості критерію оптимізації прийнято сукупні витрати перевізника та пасажирів, що дозволяє забезпечити баланс між економічною ефективністю роботи маршруту та якістю транспортного обслуговування населення. Сформована математична модель враховує експлуатаційні витрати перевізника, часові витрати пасажирів, рівень заповнення транспортних засобів та основні параметри функціонування маршруту. Отримана модель створює основу для подальшого визначення раціональних параметрів роботи міських автобусних маршрутів та оцінювання ефективності транспортного обслуговування.

11. Проведено практичну апробацію розробленої моделі визначення оптимальних параметрів транспортного обслуговування на міських автобусних маршрутах на прикладі автобусного маршруту №37 міста Львів. У межах дослідження сформовано методику оптимізації параметрів транспортного обслуговування, яка передбачає послідовне оцінювання існуючих умов функціонування маршруту, формування вихідних даних, проведення модельних розрахунків та вибір найбільш ефективного варіанта організації перевезень.

12. У ході дослідження встановлено, що автобусний маршрут №37 характеризується значним пасажиропотоком у години пік та високим рівнем транспортного навантаження. Аналіз параметрів перевізного процесу показав, що існуюча система організації перевезень забезпечує достатній рівень транспортного обслуговування, однак характеризується підвищеним рівнем заповнення транспортних засобів на найбільш завантажених ділянках маршруту.

13. За результатами проведених розрахунків встановлено, що мінімальні загальні витрати перевізника та пасажирів забезпечуються у разі використання автобусів MAN Lion's City 19. Застосування автобусів даної марки дозволяє забезпечити належний рівень транспортного обслуговування, знизити рівень переповнення транспортних засобів та досягти найкращих техніко-економічних показників функціонування маршруту. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої моделі оптимізації параметрів транспортного обслуговування та можливість її практичного використання для вдосконалення організації міських пасажирських перевезень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lättman K., Otsuka N. Sustainable development of urban mobility through active travel and public transport. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(2). P. 1-8.
2. Miller P., de Barros A. G., Kattan L., Wirasinghe S. C. Analyzing the sustainability performance of public transit. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2016. Vol. 44. P. 177–198.
3. Beaudoin J., Farzin Y. H., Lawell C. Y. C. L. Public transit investment and sustainable transportation: A review of studies of transit's impact on traffic congestion and air quality. *Research in Transportation Economics*. 2015. Vol. 52. P. 15–22.
4. Deakin E. Sustainable development and sustainable transportation: strategies for economic prosperity, environmental quality, and equity. 2001. P. 1–41.
5. Friman M., Lättman K., Olsson L. E. Public transport quality, safety, and perceived accessibility. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(9). P. 1-14.
6. Van Lierop D., Badami M. G., El-Geneidy A. M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews*. 2018. Vol. 38(1). P. 52–72.
7. Mouwen A. Drivers of customer satisfaction with public transport services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. Vol. 78. P. 1–20.
8. Redman L., Friman M., Gärling T., Hartig T. Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*. 2013. Vol. 25. P. 119–127.
9. Habib K. M. N., Kattan L., Islam M. T. Model of personal attitudes towards transit service quality. *Journal of Advanced Transportation*. 2011. Vol. 45(4). P. 271–285.

10. Eboli L., Mazzulla G. Service quality attributes affecting customer satisfaction for bus transit. *Journal of Public Transportation*. 2007. Vol. 10(3). P. 21–34.
11. Pitka P., Simeunović M., Milenković I., Simeunović M., Škiljaica I. Impact of public passenger transport organization model on system performance and service quality. *Transport*. 2023. Vol. 38(2). P. 116–126.
12. Maltinti F., Coni M., Rombi J., Barabino B., Ventura R., Rassu N. A literature review on bus comfort on-board. *International Conference on Computational Science and Its Applications*. 2024. P. 80–97.
13. Eboli L., Mazzulla G. A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. *Transport Policy*. 2011. Vol. 18(1). P. 172–181.
14. Zhang C., Juan Z., Luo Q., Xiao G. Performance evaluation of public transit systems using a combined evaluation method. *Transport Policy*. 2016. Vol. 45. P. 156–167.
15. Zhang X., Liu H., Xu M., Mao C., Shi J., Meng G., Wu J. Evaluation of passenger satisfaction of urban multi-mode public transport. *PloS One*. 2020. Vol. 15(10). P. 1–21.
16. Haslauer E., Delmelle E. C., Keul A., Blaschke T., Prinz T. Comparing subjective and objective quality of life criteria: A case study of green space and public transport in Vienna, Austria. *Social Indicators Research*. 2015. Vol. 124(3). P. 911–927.
17. de Ona J., de Ona R., Quality of Service in Public Transport Based on Customer Satisfaction Surveys: A Review and Assessment of Methodological Approaches. *Transportation Science*. 2014. Vol. 49(3). P. 605–622.
18. Cheng G., He Y. Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization. *Electronic Research Archive*. 2024. Vol. 32(1). P. 565–583.

19. Darsena D., Gelli G., Iudice I., Verde F. Sensing technologies for crowd management, adaptation, and information dissemination in public transportation systems: A review. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 23(1). P. 68–87.
20. Yap M., Cats O. Taking the path less travelled: Valuation of denied boarding in crowded public transport systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2021. Vol. 147. P. 1–13.
21. Wang B., Zacharias J. Noise, odor and passenger density in perceived crowding in public transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 135. P. 215–223.
22. Zhang J., Yu X., Tian C., Zhang F., Tu L., Xu C. Analyzing passenger density for public bus: Inference of crowdedness and evaluation of scheduling choices. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2014. P. 2015–2022.
23. Hensher D. A., Rose J. M., Collins A. T. Identifying commuter preferences for existing modes and a proposed Metro in Sydney, Australia with special reference to crowding. *Public Transport*. 2011. Vol. 3(2). P. 109–147.
24. Kim J. K., Lee B., Oh S. Passenger choice models for analysis of impacts of real-time bus information on crowdedness. *Transportation Research Record*. 2009. Vol. 2112(1). P. 119–126.
25. Yu C., Li H., Wang Z., Ma W., Goverde R. M., Cats O. Why do they travel backwards? Understanding passenger travel behaviour in congested urban public transport systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2025. Vol. 190. P. 1–19.
26. Chen W., Liu X., Chen D., Pan X. Setting headways on a bus route under uncertain conditions. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(10). P. 1–13.
27. Guihaire V., Hao J. K. Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2008. Vol. 42(10). P. 1251–1273.

28. Xu M., Liu T., Zhong S. P., Jiang Y. Urban smart public transport studies: A review and prospect. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2022. Vol. 22(2). P. 91–108.
29. Oladimeji D., Gupta K., Kose N. A., Gundogan K., Ge L., Liang F. Smart transportation: an overview of technologies and applications. *Sensors*. 2023. Vol. 23(8). P. 1–32.
30. Djurhuus S., Sten Hansen H., Aadahl M., Glümer C. Building a multimodal network and determining individual accessibility by public transportation. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2016. Vol. 43(1). P. 210–227.
31. Понкратов Д. Н., 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.
32. Доля В. К. Пасажирські перевезення: підручник. Харків: Форт, 2010. 504 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Анкета для визначення вагових коефіцієнтів складників часу пересування міським громадським транспортом

АНКЕТА № _____

Шановний респонденте! Просимо Вас взяти участь в опитуванні щодо оцінки різних умов пересування громадським транспортом. Мета дослідження - визначення відносної важливості окремих складників часу пересування.

Інформація про респондента

Вік: _____

Стать: ☐ Ч ☐ Ж

3. Частота користування транспортом:

☐ щоденно ☐ кілька разів на тиждень ☐ рідко

Основна мета пересування:

☐ робота ☐ навчання ☐ особисті справи ☐ інше

Парні порівняння

Порівняйте, будь ласка, який складник пересування для Вас є більш обтяжливим (неприємним) та наскільки. Часові проміжки є однаковими, наприклад, 10 хв.

В графу «Оцінка» заноситься код більш обтяжливого критерію та його оцінка згідно зі шкалою, що наведена нижче. Наприклад: K1-1,7.

№	Лівий критерій	Правий критерій	Оцінка
1	K1 - час очікування на зупинці	K2 - (час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи)	
2	K1 - час очікування на зупинці	K3 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м ²)	
3	K1 - час очікування на зупинці	K4 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м ²)	
4	K1 - час очікування на зупинці	K5 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м ²)	
5	K1 - час очікування на зупинці	K6 - час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м ²)	
6	K2 - час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи	K3 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м ²)	
7	K2 - час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи	K4 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м ²)	

8	K2 - час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи	K5 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м ²)	
9	K2 - час поїздки у салоні транспортного засобу сидячи	K6 - час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м ²)	
10	K3 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м ²)	K4 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м ²)	
11	K3 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м ²)	K5 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м ²)	
12	K3 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи в комфортних умовах (щільність заповнення 1 пас./м ²)	K6 - час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м ²)	
13	K4 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м ²)	K5 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м ²)	
14	K4 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за середнього рівня заповнення (щільність заповнення 3 пас./м ²)	K6 - час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м ²)	
15	K5 - час поїздки у салоні транспортного засобу стоячи за високого рівня заповнення (щільність заповнення 5 пас./м ²)	K6 - час поїздки стоячи у переповненому транспортному засобі (щільність заповнення 8 пас./м ²)	

Шкала оцінювання

Оцінка	Пояснення
1	однаково неприємні
1,25	трохи більш обтяжливий
1,70	помірно більш обтяжливий
2,3	суттєво більш обтяжливий
3	максимально більш обтяжливий