

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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра автомобілів

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **“Організаційно-технологічне вдосконалення системи міських автобусних маршрутів (комплексна тема)”**

Виконав: студент **6** курсу, групи **МНм-61**

спеціальності **275 Транспортні технології**

(на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

Баран В.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рудий С.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Цьонь О.П.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Плекан У.М.

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

(підпис)

Цьонь О.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Сташків М.Я.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«14» листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)
(шифр і назва спеціальності)

студенту Барану Віталію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Організаційно-технологічне вдосконалення системи міських автобусних маршрутів (комплексна тема)

Керівник роботи Цьонь О.П., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: схема міської пасажирської транспортної мережі

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

1. Сталий розвиток міських транспортних систем. 2. Огляд досліджень у сфері маршрутизації міського автобусного транспорту. 3. Методологічні основи моделювання транспортних процесів. 4. Методи обстежень та прогнозування інтенсивності руху на вулицях міста. 5. Транспортна модель. 6. Показники функціонування та якості обслуговування у міській маршрутній ПТС. 7. Показники роботи міської пасажирської транспортної системи у взаємодії з транспортно-пересадковими вузлами. 8. Система організації охорони праці на підприємствах автомобільного транспорту. 9. Заходи з пожежної безпеки

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

1. Титульний лист. 2. Реферат. 3. Схема концепція «Avoid-Shift-Improve». 4. Програмні продукти для транспортного моделювання. 5. Модель координованого керування дорожнім рухом. 6. Класифікація методів обстеження пасажиропотоків. 7. Концептуальна схема системи керування міськими автобусними перевезеннями. 8. Інформаційно-логічна модель даних. 9. Добова структура відправлень з Автовокзалу. 10-15. Графічні залежності. 16-18. Мережа маршрутних зв'язків між пересадковими вузлами. 19. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 14.11.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Сучасні підходи до організації та управління міськими автобусними перевезеннями	28.11.2025 р.	
2	Розділ 2. Моделювання та організація міських транспортних процесів	05.12.2025 р.	
3	Розділ 3. Аналіз і оптимізація технологічних параметрів транспортно-пересадкових вузлів	12.12.2025 р.	
4	Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	15.12.2025 р.	
5	Загальні висновки	17.12.2025 р.	
6	Перелік посилань	18.12.2025 р.	

Студент

(підпис)

Баран В.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цьонь О.П.
(прізвище та ініціали)

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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«14» листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)
(шифр і назва спеціальності)

студенту Рудому Сергію Богдановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Організаційно-технологічне вдосконалення системи міських автобусних маршрутів (комплексна тема)

Керівник роботи Цьонь О.П., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: схема міської пасажирської транспортної мережі

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

1. Планувальні схеми та їхня роль у розвитку міських транспортних систем/

2. Застосування методів імітаційного моделювання. 3. Етапи розв'язання

задач маршрутизації транспорту. 4. Концептуальна модель і структурна організація

системи керування міськими автобусними перевезеннями. 5. Структура та функції

транспортно-пересадкових вузлів у міських мережах. 6. Організаційно-технологічні

рішення для ефективної взаємодії МПТС у ТПВ. 7. Безпека праці при керуванні

автобусом при перевезенні пасажирів. Підвищення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі.

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

1. Титульний лист. 2. Реферат. 3. Схема концепція «Avoid-Shift-Improve. 4. Програмні

продукти для транспортного моделювання. 5. Модель координованого керування дорожнім рухом. 6. Класифікація методів обстеження пасажиропотоків. 7. Концептуальна схема системи керування міськими автобусними перевезеннями. 8. Інформаційно-логічна модель даних.

9. Добова структура відправлень з Автовокзалу. 10-15. Графічні залежності.

16-18. Мережа маршрутних зв'язків між пересадковими вузлами. 19. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 14.11.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Сучасні підходи до організації та управління міськими автобусними перевезеннями	28.11.2025 р.	
2	Розділ 2. Моделювання та організація міських транспортних процесів	05.12.2025 р.	
3	Розділ 3. Аналіз і оптимізація технологічних параметрів транспортно-пересадкових вузлів	12.12.2025 р.	
4	Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	15.12.2025 р.	
5	Загальні висновки	17.12.2025 р.	
6	Перелік посилань	18.12.2025 р.	

Студент

(підпис)

Рудий С.Б.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цьонь О.П.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	8
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ АВТОБУСНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ	
1.1 Сталий розвиток міських транспортних систем	12
1.2 Планувальні схеми та їхня роль у розвитку міських транспортних систем	18
1.3 Огляд досліджень у сфері маршрутизації міського автобусного транспорту	20
1.4 Застосування методів імітаційного моделювання	27
1.5 Аналіз методів підвищення ефективності використання автобусів	30
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ	
2.1. Методологічні основи моделювання транспортних процесів	42
2.2 Етапи розв’язання задач маршрутизації транспорту	45
2.3 Методи обстежень та прогнозування інтенсивності руху на вулицях міста	53
2.4 Концептуальна модель і структурна організація системи керування міськими автобусними перевезеннями	57
2.5 Транспортна модель	68
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДКОВИХ ВУЗЛІВ	
3.1. Показники функціонування та якості обслуговування у міській маршрутній ПТС	72
3.2 Структура та функції транспортно-пересадкових вузлів у міських мережах	75
3.3. Показники роботи міської пасажирської транспортної системи у взаємодії з транспортно-пересадковими вузлами	82

3.4 Організаційно-технологічні рішення для ефективної взаємодії МПТС у ТПВ	91
--	----

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Система організації охорони праці на підприємствах автомобільного транспорту	105
4.2. Безпека праці при керуванні автобусом при перевезенні пасажирів	108
4.3. Заходи з пожежної безпеки	112
4.4. Підвищення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі	115
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	122
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	124

РЕФЕРАТ

Мета даної роботи — розробити та обґрунтувати комплекс рішень щодо удосконалення організації міських пасажирських перевезень на базі аналізу мережі, моделювання транспортних процесів і модернізації ТПВ, спрямований на скорочення часу поїздки, підвищення регулярності руху, зростання провізної спроможності та поліпшення безпеки дорожнього руху. Досягнення мети забезпечується через вирішення таких завдань: проаналізувати сучасні наукові й нормативні підходи до планування і керування міськими перевезеннями з позицій рамки ASI та «безпечної системи»; сформувати перелік ключових показників ефективності сервісу (KPI) із фокусом на door-to-door час, регулярність (OTP/EWT), середню швидкість, заповнюваність, рівень безпеки (KSI); виконати інвентаризацію маршрутної мережі та критичних ТПВ, виявивши вузькі місця; побудувати методику моделювання сценаріїв «до/після» для локальних інтервенцій (експресні траси, пріоритет на перехрестях, зміни геометрії зупинок); оцінити вплив запропонованих рішень на час, регулярність і безпеку; розробити рекомендації з експлуатації, охорони праці та пожежної безпеки для оператора перевезень; підготувати дорожню карту впровадження з черговістю заходів і орієнтовними витратами.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування міської пасажирської транспортної системи, її мережа та транспортно-пересадкові вузли.

Предмет дослідження — організаційно-технологічні рішення з удосконалення маршрутної структури, зупинкової інфраструктури, пріоритету громадського транспорту і безпеки руху, що впливають на якість сервісу та стійкість роботи.

Методологічну основу становлять системний аналіз, методи просторово-мережевого моделювання та імітаційного моделювання транспортних процесів, теорія масового обслуговування для оцінювання затримок у вузлах та на підходах,

Структурно робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. У першому розділі подано аналітичний огляд підходів до організації міських пасажирських перевезень, рамок ASI та «безпечної системи», системи показників якості та безпеки. У другому — викладено методологію моделювання та джерела даних, описано процедури калібрування й валідації. Третій розділ присвячено діагностиці мережі, інвентаризації ТПВ та розробленню пакета інтервенцій (експресні зв'язки, пріоритет на перехрестях, реконфігурація зупинок) з оцінюванням «до/після». Четвертий розділ охоплює організацію охорони праці на підприємстві автомобільного транспорту, безпеку праці водія, пожежну безпеку та заходи підвищення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі. У висновках наведено узагальнення отриманих результатів, їх практичну цінність та рекомендації для впровадження.

Таким чином, робота спрямована на розв'язання прикладної задачі підвищення ефективності й безпеки міських пасажирських перевезень шляхом комбінування мережевих, організаційних і технологічних рішень, обґрунтованих даними та верифікованих моделюванням. Очікується, що запропонований підхід забезпечить відчутне скорочення часу поїздки та зростання регулярності без значних капітальних витрат, а також зниження рівня аварійності в ключових вузлах мережі завдяки адресним маловитратним інтервенціям і посиленню виробничої безпеки в оператора перевезень.

ВСТУП

Міські пасажирські перевезення посідають ключове місце у соціально-економічному розвитку територій, визначаючи доступність робочих місць, освітніх і медичних послуг, формуючи конкурентоспроможність міського середовища та його екологічну сталість. За умов інтенсивної урбанізації та зростання мотопарку традиційні підходи до планування маршрутної мережі і графіків руху вичерпують свій потенціал: збільшуються затори і втрати часу, знижується надійність сервісу, зростають експлуатаційні витрати операторів, зберігаються ризики для безпеки дорожнього руху. Тому актуальним стає перехід від «пропозиційно орієнтованої» моделі до керованої даними системи організації перевезень, у якій рішення ухвалюються на основі вимірюваних показників якості, сценарного моделювання та пріоритезації інтервенцій за їхнім впливом на безпеку, час у дорозі та витрати.

У сучасній практиці все більшого поширення набуває концепція «безпечної системи» і рамка Avoid–Shift–Improve (ASI), які дозволяють одночасно скорочувати непотрібні поїздки, перерозподіляти попит на більш сталі види транспорту і підвищувати ефективність самого громадського транспорту. В українських містах додаткової уваги потребують транспортно-пересадкові вузли (ТПВ) як «точки зшивання» маршрутної мережі та місця найвищої концентрації пасажиропотоків і конфліктів між режимами руху. Саме якість організації ТПВ, пріоритет громадського транспорту на перехрестях, а також оптимізація зупинкових пунктів часто визначають реальний door-to-door час поїздки більше, ніж паспортна швидкість руху. Окремим напрямом є впровадження експресного сполучення між пасажироутворювальними вузлами (вокзалами, великими діловими центрами, лікарнями, університетами): скорочення кількості проміжних зупинок та раціональна геометрія заїздів на платформи дозволяють підвищити середню

експлуатаційну швидкість, регулярність і провізну спроможність без значних капітальних вкладень.

Проблематика безпеки дорожнього руху інтегрована у завдання підвищення якості перевезень. Переобтяжені перехрестя, нечитабельна організація руху, недостатня видимість пішохідних переходів, конфлікти на зупинках і відсутність фізичного поділу потоків призводять до ДТП із тяжкими наслідками, підриваючи довіру до громадського транспорту. У відповідь застосовуються підходи, що поєднують інженерні рішення (LPI, підняті переходи, острівці безпеки, виділені смуги), інтелектуальні транспортні системи (адаптивні світлофори, прицільний автоматичний контроль швидкості та проїзду на заборонний сигнал), а також регламенти експлуатації і навчання персоналу, включно з охороною праці на автотранспортних підприємствах та пожежною безпекою інфраструктури. Комплексність — ключ до сталого ефекту: тільки поєднання планувальних, організаційних, технічних і поведінкових інструментів забезпечує прогнозований сервіс та зниження травматизму.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ АВТОБУСНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ

1.1. Сталий розвиток міських транспортних систем

Процеси урбанізації залишаються визначальним чинником просторової та соціально-економічної трансформації: сьогодні понад половину населення світу проживає в містах, а до 2050 року частка міських жителів наблизиться до ~70%. Така динаміка підсилює попит на мобільність і створює додаткові виклики для транспортної інфраструктури, як-от зростання заторів, емісій забруднювачів і енергоспоживання, а також підвищення ризиків для безпеки дорожнього руху. Формування стійких міських транспортних систем (МТС) потребує комплексних політик, що поєднують просторове планування, регулювання попиту на поїздки та технологічні інновації. Основні орієнтири закріплені в цілях сталого розвитку ООН (зокрема, SDG 11), які підкреслюють необхідність доступного, безпечного та екологічного міського транспорту.

Окремим пріоритетом є безпека дорожнього руху. У 2020 році Генеральна Асамблея ООН проголосила Десятиліття дій з безпеки дорожнього руху на 2021–2030 рр. із ціллю скоротити смертність і травматизм щонайменше на 50% до 2030 року. За даними Глобальної доповіді ВООЗ про стан безпеки дорожнього руху (2023), щороку у світі гине близько 1,19 млн осіб; попри певний прогрес, темпи зниження далекі від необхідних, тому міські політики мають інтегрувати безпеку як базовий критерій у плануванні МТС і проєктуванні вуличного простору.

Сучасна методологічна рамка для формування сталих транспортних рішень - концепція «Avoid–Shift–Improve (ASI)» («уникай - переміщуй -

удосконалюй»), пропонує ієрархію втручань: у першу чергу зменшення потреби у поїздках і довжині маршрутів (Avoid), далі - перехід на більш сталий модальний розподіл (Shift), і, нарешті, підвищення ефективності та безпечності технологій (Improve) (рис. 1.1). Практика останніх років підтверджує, що саме поєднання політик «попиту» та «пропозиції» забезпечує найбільший сукупний ефект щодо енергоефективності, викидів, шуму й аварійності.



Рисунок 1.1 – Схема концепція «Avoid–Shift–Improve»

У межах підходу ASI доцільно виділити такі напрями муніципальної транспортної політики:

(А) Avoid - «Уникай» (скорочення непотрібних поїздок і дистанцій).

1. Компактне та змішане землекористування, TOD-моделі (Transit-Oriented Development), баланс робочих місць та житла у транспортних районах для зменшення маятникової міграції.

2. Керування попитом на поїздки (TDM): гнучкі графіки роботи, цифровізація сервісів, ціноутворення на використання вуличного простору й паркування, пріоритезація «коротких поїздок» у межах мікромобільності.

3. Інтегроване планування вуличної мережі з усуненням «вузьких місць» та переналаштуванням схем руху для зниження пікових навантажень.

(S) Shift - «Переміщуй» (перехід на сталі види транспорту).

1. Збільшення привабливості громадського транспорту: виділені смуги/коридори для автобусів (BRT), пріоритет на перехрестях, регулярність і надійність розкладів, єдина тарифна система.

2. Розвиток активної мобільності (пішки/велосипед): безпечні й безперервні мережі, захищені велосмуги, спокійний рух (traffic calming), вуличний дизайн «з периметральним уповільненням».

3. Інтермодальні вузли (хаби) із зручними пересадками «автобус–велосипед–пішохід–мікромобільність», стандартизовані wayfinding-рішення, доступність для маломобільних груп. Світова та європейська практика показує, що модальний зсув до громадського й немоторизованого транспорту одночасно покращує здоров'я населення та зменшує екологічні зовнішні ефекти.

(I) Improve - «Удосконалюй» (підвищення ефективності та безпеки технологій).

1. Оновлення рухомого складу міських автобусів: електрифікація парків, застосування низько- й нульововуглецевих технологій, систем рекуперації, екостандартів і телематики.

2. Інтелектуальні транспортні системи (ITS): пріоритет громадського транспорту на світлофорах (TP), адаптивне керування циклами, диспетчеризація в реальному часі, передбачуваність сервісу для пасажирів через GTFS-дані.

3. Регуляторні та економічні інструменти: стандарти безпеки, контроль технічного стану, навчання персоналу, контракти на обслуговування із KPI щодо надійності, швидкості комунікацій і безпеки.

4. Політика паливної ефективності на рівні автопарків: імплементація міжнародних ініціатив із підвищення паливної економічності («50by50/GFEI»), що у світових оцінках асоціюється з істотним скороченням викидів CO₂ до середини століття.

З позицій управління міськими автобусними перевезеннями стратегічна мета полягає у зменшенні залежності домогосподарств від приватного автомобіля та підвищенні ролі громадського транспорту й активної мобільності у щоденних поїздках. Це узгоджується зі світовими орієнтирами: до 2030 року - суттєве підвищення безпеки дорожнього руху та доступності транспорту, до 2050 року - стабілізація й подальше скорочення викидів за рахунок інновацій у рухомому складі та енергоефективності. Для міст це означає системне впровадження ієрархії ASI, прив'язаної до локального контексту попиту, просторової структури та фінансових можливостей, із постійним моніторингом KPI (швидкість комунікацій, регулярність, заповнюваність, час поїздки «door-to-door», травматизм, викиди на пас.-км, доступність для МГН).

Ефективність рішень у сфері міської мобільності істотно варіює між країнами та містами через відмінності у природно-кліматичних умовах, рівні економічного розвитку, щільності та типології забудови, а також у підходах до містобудівного планування. Відтак одним із ключових напрямів сучасних транспортних стратегій є підвищення результативності та привабливості громадського пасажирського транспорту (ГПТ) як інструменту зменшення використання приватних авто.

Загалом частку поїздок приватними автомобілями можливо скоротити, якщо одночасно виконуються такі умови:

- Повнота мережевого покриття: між усіма функціональними районами міста забезпечено сполучення ГПТ із раціональною щільністю зупинок, інтегрованими пересадковими вузлами та єдиною тарифною політикою.

- Доступність ключових «точок тяжіння»: великі центри зайнятості, навчання, охорони здоров'я, торгівлі та дозвілля мають високий рівень транспортної доступності не лише громадським транспортом, а й інфраструктурою активної мобільності (пішохідні маршрути, веломережа, мікромобільність).

- Економічні стимули та регулювання попиту на авто: справедливе ціноутворення на паркування, обмеження довготривалого вуличного паркування в центральних зонах, податки/збори, таргетовані субсидії на проїзні та пересадки, пріоритет виділених смуг для ГПТ.

Система міського пасажирського транспорту має одночасно:

1. забезпечувати комфортне, передбачуване й безпечне перевезення з мінімальними часовими та грошовими витратами для пасажирів;
2. відповідати пропускній спроможності вулично-дорожньої мережі (УДС) та зменшувати екологічне навантаження;
3. гарантувати високі стандарти безпеки дорожнього руху.

Для цього необхідне вдосконалення чинних та впровадження нових методів управління МТС, які підсилюють конкурентність ГПТ щодо приватного авто.

Ключові фактори вибору способу пересування:

1. Доступність і прямолінійність маршрутів. Можливість дістатися в будь-яку частину міста з мінімальною кількістю пересадок і в передбачувані часові інтервали є базовим критерієм. Оскільки міста динамічно змінюються й виникають нові «точки тяжіння», маршрутна мережа ГПТ повинна регулярно коригуватися відповідно до актуальної структури попиту та спостережуваних пасажиропотоків (у т.ч. за даними валідаторів/смарт-карт і мобільності).

2. Вартість поїздки та цінова справедливість. Для власника авто вирішальним аргументом на користь ГПТ є нижча повна вартість щоденних поїздок. Неприпустима ситуація, коли сукупні витрати користувача на приватне авто (паливо, паркування, амортизація) стають нижчими за витрати на регулярні поїздки ГПТ. До політики входять єдині абонементи,

безкоштовні/знижені пересадки, пільгові тарифи для соціально вразливих груп, та динамічні ціни на паркування в перенасичених зонах.

3. Комфорт і якість рухомого складу. На сприйняття сервісу впливають: віковий склад автопарку, відповідність місткості реальному попиту (у т.ч. піковому), низькопідлоговість, мікроклімат, рівень шуму/вібрацій, доступність для МГН. Передчасний знос через обслуговування «за потреби» та відсутність ремонтно-обслуговчої бази у дрібних перевізників негативно позначаються на комфорті й надійності. Перехід до планово-попереджувальних ТО і контрактів із KPI підвищує стабільність сервісу.

4. Швидкість і надійність поїздки. Попит на малі автобуси виникав, зокрема, через очікування вищої маршрутної швидкості. Однак надмірна фрагментація перевезень і переуцільнення маршрутами призводять до накопичення ТЗ на зупинках, конфліктів у русі, перевантаження УДС і, зрештою, зростання загального часу в дорозі для пасажирів. Ефективнішою є раціоналізація мережі, виділені смуги, пріоритет на перехрестях і оптимізація інтервалів.

5. Інтервал та регулярність (очікування на зупинці). Дотримання розкладу - ключовий показник ефективності ГПТ: короткий і стабільний інтервал прямо впливає на сприйманий час подорожі та загальну привабливість сервісу. Тут критичні диспетчеризація в реальному часі, адаптивні світлофори з пріоритетом ГПТ і моніторинг виконання рейсів.

6. Поінформованість пасажирів у реальному часі. Важлива не стільки наявність «статичних» табло, скільки динамічні оголошення прибуття/затримок за даними GPS/GNSS та AVL-систем із урахуванням фактичної дорожньої ситуації. Інформація має дублюватися в мобільних застосунках і на веб-картах (GTFS-realtime), а також бути доступною на зупинках для всіх категорій користувачів.

7. Безпека та культура перевезень. Дефіцит місць у пікові години, експлуатація транспортних засобів, не призначених для стоячих пасажирів, або конкуренція між перевізниками «за пасажира тут і зараз» погіршують

безпеку сервісу й руху в цілому. Контракти з операторами мають містити вимоги до безпеки, контроль ЛТІ/інцидентів, навчання водіїв і відповідальність за порушення.

8. Екологічність і зовнішні ефекти. Хоч екологічний фактор не завжди є первинним у суб'єктивній оцінці пасажиром, його значення стратегічне: перехід на низько- та нульововуглецеві технології, сучасні стандарти викидів і енергоефективні автопарки прямо пов'язані зі зниженням передчасної смертності та поліпшенням якості життя в містах.

Підвищення привабливості ГПТ - це комплексне завдання, що потребує узгоджених заходів: адаптивного планування мережі, тарифної політики, пріоритету ГПТ в УДС, оновлення рухомого складу, цифрової диспетчеризації й прозорих договорів із перевізниками. Такий підхід дозволяє зменшити залежність від приватного авто, підвищити стійкість міської мобільності та досягти цільових показників безпеки, екологічності та якості сервісу.

1.2 Планувальні схеми та їхня роль у розвитку міських транспортних систем

Планувальна структура міста безпосередньо визначає можливості й обмеження для організації перевезень, адже саме вона задає траєкторії основних пасажиропотоків і формує рамкові рішення для мережі громадського транспорту. У практиці міського розвитку найчастіше трапляються радіальні, радіально-кільцеві, прямокутні (гратчасті) та прямокутно-діагональні схеми, однак у процесі урбаністичної еволюції майже кожна з них набуває змішаної форми: до базової конфігурації додаються елементи інших, виникають поліцентричні вузли, периферійні хаби та нові магістральні коридори. Радіальні структури концентрують попит на центральній зоні й водночас схильні до формування «вузьких місць» на підходах до ядра, тоді як радіально-

кільцеві дозволяють перерозподіляти потоки між радіусами та знижувати навантаження на центр за рахунок кільцевих зв'язків, але вимагають ретельної синхронізації пересадок. Прямокутна сітка забезпечує рівномірний розподіл навантаження і гнучке трасування маршрутів, хоча страждає від дублювання ланок та нестачі найкоротших діагональних зв'язків; доповнення її діагональними або експресними лініями зменшує непрямолінійність і скорочує час поїздки «door-to-door». Лінійно-агломераційні міста, розвинені вздовж узбережжя чи річкових долин, природно формують магістральні коридори для інтенсивного ГПТ, але залишаються вразливими до інцидентів на одиничних магістралях; поліцентричні структури розвантажують центральне ядро завдяки кільком діловим і освітнім центрам, однак підвищують вимоги до тарифації та організації пересадок між вузлами.

З огляду на це стратегія розвитку транспортної системи має виходити з конкретної типології міського планування, рівня автомобілізації та динаміки попиту, щільності та функціонального зонування, кліматичних і економічних обмежень. Вона передбачає формування ієрархії маршрутів «магістраль–фідер» із гарантованою частотою руху та пріоритетом у вулично-дорожній мережі, розміщення багатомодальних хабів із зручними і безпечними підходами для пішоходів і велосипедистів, мінімізацію часу пересадки, впровадження виділених смуг, адаптивного керування світлофорними циклами й сигнального пріоритету для ГПТ. Універсальних рецептів не існує: успішні рішення з інших міст доцільно застосовувати лише після перевірки їхньої сумісності з місцевими умовами та прогнозом наслідків для мережі.

Щоб уникати непродуманих кроків і завчасно керувати наслідками транспортної політики, необхідно впровадити інтегровану систему управління міськими автобусними перевезеннями на основі даних. Її інформаційний контур має включати автоматизований облік пасажиропотоків, GNSS/AVL-моніторинг і відкриті формати GTFS/GTFS-RT для побудови дашбордів ключових показників: регулярність і стабільність інтервалів, маршрутна швидкість, заповнюваність, час подорожі «від дверей до дверей»,

інцидентність і викиди на пасажиро-кілометр. Моделювальний контур забезпечує сценарний аналіз змін у мережі, ефектів пріоритету і тарифних реформ, оцінку вигод і витрат та чутливісний аналіз до ключових параметрів попиту. Операційний контур передбачає проектування графіків із урахуванням коротких пересадок, динамічне керування інтервалами й випусками та швидке реагування на збої, тоді як інфраструктурний контур визначає місця для виділених смуг, оптимізацію зупинок і стандарти навігації, зокрема доступність для маломобільних груп. Фінансово-договірний контур має базуватися на прозорому контрахуванні операторів із KPI та SLA, збалансованій тарифній політиці, таргетованих субсидіях і справедливому ціноутворенні на паркування.

Нарешті, комунікаційний контур включає відкриті дані, регулярні опитування, пілотні проекти та просвітницькі кампанії, що підвищують прийнятність змін. Сукупність цих елементів, прив'язана до містобудівної типології конкретного міста, дозволяє мінімізувати мережеві, операційні, інфраструктурні, економічні та соціально-екологічні ризики, підвищити швидкість і надійність перевезень та зменшити залежність міської мобільності від приватного автомобіля.

1.3 Огляд досліджень у сфері маршрутизації міського автобусного транспорту

Оскільки базова функція громадського транспорту полягає у забезпеченні мобільності населення, конфігурація маршрутної мережі має відображати реальні та прогнозні потреби пасажирів. Постановка задачі планування маршрутів для автобусних систем природно формулюється як класична задача транспортної маршрутизації з численними практичними обмеженнями (місткість рухомого складу, часові вікна, інтервали, пріоритети

в мережі тощо). Чисто аналітичні, точні методи для великих міських мереж швидко стають обчислювально недосяжними; тому евристики та метаевристики широко застосовують як інструменти пошуку високоякісних (хоч і не гарантовано оптимальних) рішень у прийнятні терміни.

Для міських автобусних систем показовою є стохастична VRP із варіативним попитом (*Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand, VRPSD*), де рівень завантаження змінюється залежно від часу доби, дня тижня, сезонних коливань та подій. У цьому контексті доцільним є застосування робастної оптимізації, яка мінімізує ризики погіршення показників за небажаних сценаріїв. Так, Liang Sun запропонував модель умовного математичного сподівання комбінаційного напіввідхилення (*Conditional Expectation–Combinatorial Semi-Deviation Robust Model, CE-CSDRM*). Мета - мінімізувати умовне математичне сподівання сукупних транспортних витрат за обмежень максимальної провізної спроможності наявного парку. Порівняно з альтернативною постановкою на основі математичного сподівання напіввідхилення (*Expectation–Value Semi-Deviation Robust Model, E-SDRM*), підхід CE-CSDRM демонструє меншу похибку за критерієм середньоквадратичного відхилення, що вказує на кращу стабільність рішень у змінних умовах попиту.

Інша лінія робіт - поєднання геоінформаційних систем (ГІС) та генетичних алгоритмів для синтезу маршрутної мережі. У дослідженні Huang Z.D., Liu X.J., Huang C.C. та Shen J.W. сформовано процедурний конвеєр: евристичний генератор кандидатних маршрутів + генетичний алгоритм для пошуку субоптимального набору ліній із відповідними частотами руху. Важливим елементом тут є інтеграція екологічно чистого рухомого складу («зеленого» транспорту) в існуючий парк, що ускладнює оптимізацію через різні експлуатаційні характеристики та обмеження (запас ходу, час заряджання/заправляння, вимоги до депо).

Ефективність генетичних алгоритмів підтверджено й на прикладах мереж із різнотипними маршрутами - магістральними, експресними та укороченими.

У роботі вітчизняних науковців поставлено задачу мінімізації зведеної вартості «середнього маршруту» з урахуванням широкого спектра обмежень: характеристик наявного рухомого складу (місткість, доступність, екологічний стандарт), поточної та прогнозованої потреби в перевезеннях, інтервалів руху та вимог до регулярності. Результати демонструють, що одночасна оптимізація складу маршрутів і частот здатна знизити витрати при збереженні або підвищенні рівня обслуговування.

Доречним є також застосування ентропійних методів та графових моделей для побудови та відбору альтернатив мережі.

У роботі Dang H.L. за допомогою ентропійної формалізації оцінюють упорядкованість/невизначеність мережевої структури, а графові алгоритми дозволяють синтезувати варіанти, що задовольняють ключові обмеження (максимальна довжина шляху, покриття транспортних зон, зв'язність). Оптимальний варіант автобусної мережі обирають за критеріями мінімізації часу поїздки та скорочення кількості пересадок, що на пряму корелює з підвищенням привабливості послуги для пасажирів.

Щодо багатовимірної маршрутизації, де одночасно враховуються кілька критеріїв (час, вартість, надійність, регулярність, комфорт), Cho Myo Han запропонував модифікацію алгоритму Дейкстри (рис. 1.2) з попереднім ранжуванням альтернативних маршрутів. Ідея полягає в тому, щоб ще до основного пошуку задати пріоритетну чергу вибору шляхів відповідно до вагомості критеріїв та обмежень експлуатації, завдяки чому прискорюється процес планування і підвищується якість рішень у складних мережах.

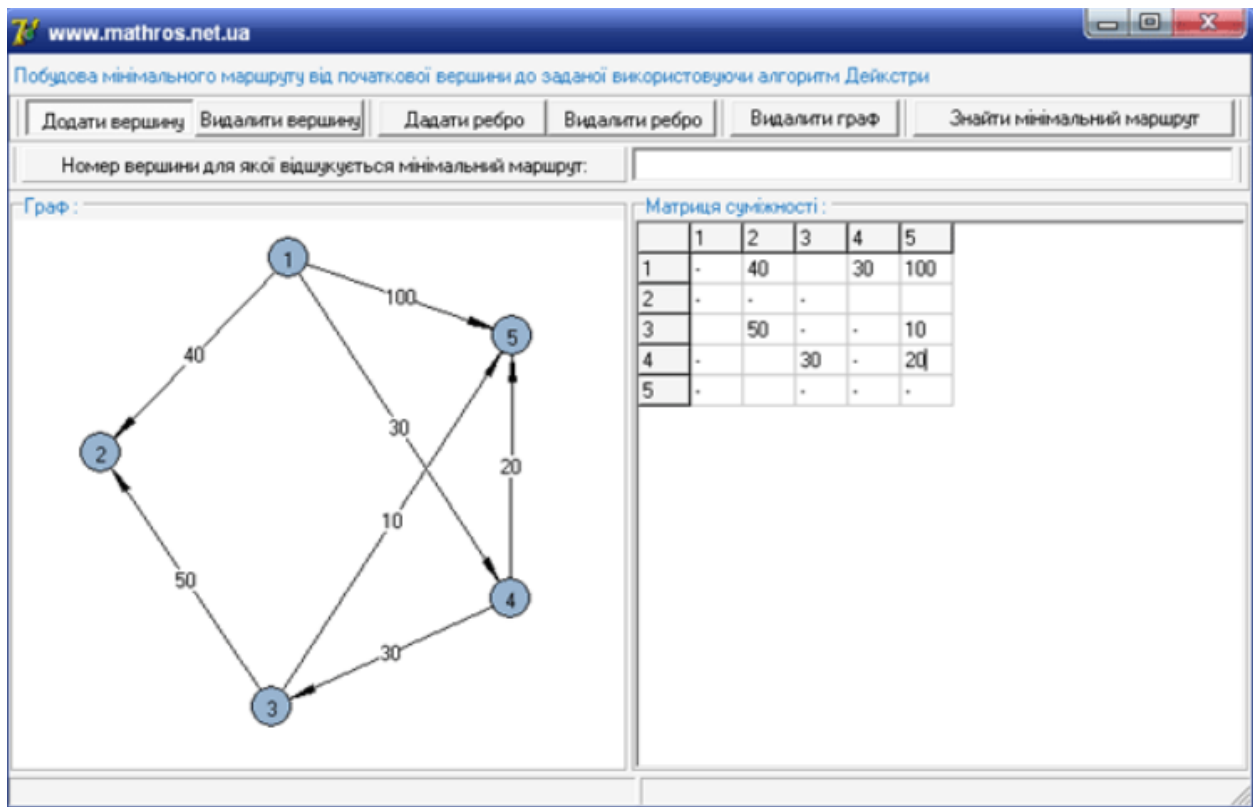


Рисунок 1.2 – Модель алгоритму Дейкстри

Узагальнюючи, сучасні підходи до маршрутизації міського автобусного транспорту рухаються у напрямі гібридних методів: поєднання робастних математичних моделей, що гарантують стійкість до невизначеності попиту, з гнучкими метаевристиками (зокрема, генетичними алгоритмами), які ефективно досліджують велику пошукову область. Додаткову цінність створює інтеграція ГІС-аналітики та реальних операційних даних (GNSS/AVL, валідатори, GTFS-RT), що дозволяє: (i) генерувати реалістичні маршрутні кандидати, (ii) калібрувати моделі попиту, (iii) оцінювати компроміси між витратами, часом «door-to-door», регулярністю та комфортом. Такі інструменти забезпечують керованість складністю міських мереж і дають змогу формувати рішення, які є не лише економічно виправданими, а й сумісними з цілями безпеки, доступності та екологічної сталості.

Під час розроблення та коригування маршрутної схеми міста необхідно враховувати широкий спектр параметрів, що впливають на функціонування транспортної системи, а також завчасно оцінювати позитивні та негативні

наслідки запропонованих рішень. Оскільки безпосередні натурні експерименти є трудомісткими й дорогими, науково обґрунтовані управлінські дії традиційно спираються на математичне моделювання процесів попиту, пропозиції та взаємодії «ГПТ ↔ вулично-дорожня мережа (ВДМ)». У сучасній умовах у ролі цільових функцій оптимізації маршрутних схем найчастіше використовують один або комбінацію таких показників: мінімізація сумарного часу доставки пасажирів, скорочення часу очікування на зупинках, зменшення питомих експлуатаційних витрат на маршрут, максимізація доходу/соціального ефекту оператора, мінімізація кількості транспортних засобів на лінії за збереження необхідної пропускної здатності та рівня обслуговування.

Разом із оптимізаційними постановками критично важливим є адекватний опис параметрів дорожнього руху - пропускної здатності ділянок ВДМ, інтенсивності, щільності та швидкісних режимів. У класичній макроскопічній парадигмі фундаментальні залежності між швидкістю (v), щільністю (k) та інтенсивністю (q) задають основу для моделювання потоків і визначення режимів, що призводять до виникнення заторів. На них спираються безперервні моделі типу LWR (Lighthill–Whitham–Richards) і дискретні схемотехнічні аналоги на кшталт Cell Transmission Model (CTM), які дозволяють у часово-просторових координатах оцінювати завантаженість мережі, фронти хвиль уповільнення та «пляшкові горлечка». Для міських автобусних мереж це забезпечує можливість обґрунтовано задавати пріоритет ГПТ (виділені смуги, сигнальний пріоритет), локалізувати вузли перевантаження та прогнозувати ефект змін у розкладах.

Окремий напрям - стохастичні та робастні моделі, що відображають невизначеність попиту і коливання параметрів руху. У дослідженнях використовують постановки, де критерієм є мінімізація очікуваних сумарних витрат або часу за обмежень на місткість і регулярність, а робастні модифікації страхують рішення від деградації в пікові періоди та за форс-мажорів. Для міських автобусів природною є VRP/VRPSD-постановка (маршрутизація за

стохастичного попиту), яка доповнюється динамічним призначенням потоків (Dynamic Traffic Assignment, DTA) та транзитним призначенням (Transit Assignment) з урахуванням поведінки пасажирів: вибір маршруту, чутливість до інтервалу, «penalty» за пересадку, ефект переповненості салону.

Широко застосовують і мезо-/мікроскопічне імітаційне моделювання, що у 2025 році - де-факто стандарт для оцінювання сценаріїв у складних міських мережах. Мезомоделі агрегують потоки в однорідні «пакети», забезпечуючи високу масштабованість при помірних витратах часу обчислень, тоді як мікромоделі (agent-based) відтворюють поведінку окремих транспортних засобів і пасажирів, дозволяючи врахувати зупинні процеси, час посадки/висадки, взаємодію в потоці, конфлікти на перехрестях, накопичення черг на зупинках. Такі моделі дають можливість оцінити KPI, які принципово важко отримати аналітично: регулярність інтервалів, надійність (Percent On-Time Performance), середню маршрутну швидкість, рівень заповнюваності, час «door-to-door», відмови в посадці через переповнення, а також викиди на пас.-км та показники безпеки (частота конфліктів за методиками surrogate safety).

У деяких дослідженнях відбувається комбінування аналітичних та імітаційних підходів: аналітика задає рамки та звужує простір пошуку (наприклад, «коридори кандидатів», оцінка меж пропускну здатності, груба оптимізація частот), після чого імітація уточнює операційні параметри (розклад, диспетчеризація, пріоритет на перехрестях). Така гібридизація дозволяє швидко відкидати неконкурентні альтернативи й фокусуватись на сценаріях, здатних забезпечити Pareto-компроміс між часом пасажирів, витратами оператора, екологічними та безпековими ефектами.

З позицій багатокритеріальної оптимізації нині поширені моделі, де зважаються одразу кілька метрик:

- користувацькі витрати (час у дорозі, очікування, пересадки, комфорт/переповненість);
- операційні витрати (паливо/енергія, амортизація, екіпажі, резерви);

- екологічні зовнішні ефекти (викиди, шум);
- безпека (частота конфліктів, ризик інцидентів на ділянках і зупинках).

Оптимізаційні техніки включають цілочислове лінійне програмування, конічні та квадратичні постановки, евристичні/метаевристичні пошуки для великомасштабних мереж та робастні і стохастичні варіанти, коли параметри попиту/пропозиції описано розподілами або невизначеними множинами. Важливо, що вибір моделі та рівня деталізації диктується не лише доступністю даних, а й цілями прийняття рішень: стратегічні (перебудова мережі), тактичні (частоти, розклад), операційні (диспетчеризація в реальному часі).

Для міських автобусних перевезень особливу увагу приділяють зв'язку між пропускною здатністю ВДМ і надійністю ГПТ. Макро-/мезомоделі дають змогу оцінювати формування/розсіювання заторів на підходах до зупинок та перехресть, а також ефект виділених смуг і сигнального пріоритету щодо зменшення дисперсії ходу (*headway variability*). Розглядаються моделі щільності транспортного потоку як функції простору та часу, багатофакторні залежності коефіцієнта аварійності від характеристик маршрутів (протяжність, середня експлуатаційна швидкість, щільність зупинок, насиченість світлофорами тощо), а також підходи до оцінювання викидів як складової узагальненої цільової функції. Водночас спрощення моделей (наприклад, ігнорування відмов у посадці через переповненість) може призводити до заниження реальних втрат часу пасажирів, тому сучасні постановки рекомендують явно моделювати *crowding* і *capacity constraints*.

Підсумовуючи, імітаційне моделювання (мезо/мікро), доповнене аналітичними оцінками і робастною багатокритеріальною оптимізацією, у 2025 році є базовим інструментом для визначення оптимальних або Pareto-ефективних конфігурацій маршрутних мереж, частот руху та заходів пріоритету. Такий підхід дає можливість не лише обрати схему з найкращими інтегральними показниками, а й оцінити ризики та чутливість до ключових параметрів (коливання попиту, зміни у ВДМ, технічні обмеження парку),

забезпечуючи прийняття рішень, узгоджених із цілями безпеки, доступності, кліматичної сталості та фінансової життєздатності системи.

1.4 Застосування методів імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання посідає центральне місце в сучасних дослідженнях міських транспортних процесів, адже дає змогу безпечним і відтворюваним способом перевіряти альтернативи розвитку мережі, графіків та пріоритетів руху до їхнього впровадження в реальному місті. Імітаційні підходи дозволяють одночасно врахувати багатофакторність попиту, обмеження вулично-дорожньої мережі (ВДМ), поведінку водіїв і пасажирів, а також стохастичні збурення, які важко описати суто аналітичними моделями.

Важливою тенденцією є агентне моделювання, у якому ключові учасники (пасажирів, автобуси, диспетчери, світлофори) подаються як автономні агенти з власними правилами поведінки. Така парадигма дає змогу описувати індивідуальний вибір маршруту, чутливість до очікування, «штраф» за пересадку, явища переповненості салону та конкуренцію за посадку. Дослідження на агентних платформах показують, що отримані закономірності використання мережі можуть слугувати основою для оптимізації сигналізації (координації фаз/циклів), а також для адаптивного керування частотами та випусками в реальному часі.

Паралельно активно розвиваються мезо- та мікроскопічні симулятори. Мезомоделі агрегують потоки у «пакети», завдяки чому добре масштабується аналіз великих фрагментів міста з прийнятними витратами часу; мікромоделі відтворюють рух окремих ТЗ і пасажирів, дозволяючи детально оцінити процеси на зупинках, формування черг, взаємодію з перехрестями та ефект пріоритету громадського транспорту на світлофорах.

У практиці моделювання міських автобусних систем широко застосовують PTV VISUM/VISSIM (для макро- і мікрорівня відповідно) (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 - Програмні продукти для транспортного моделювання від компанії PTV Group

Наукові роботи ілюструють типові кейси: оцінювання впливу введення нових магістральних ліній (зокрема підземних/рейкових) на перерозподіл автобусних пасажиропотоків; аналіз структурних змін у мережі маршрутів; моделювання часу простою автобусів на зупинках залежно від одночасних підходів ТЗ та наповнюваності; тестування альтернативних розкладів і частот у зв'язці з пріоритетом на перехрестях. Відзначено, що цільові функції в таких дослідженнях можуть бути різними: мінімізація сумарного часу «, мінімізація очікування на зупинках, мінімізація питомих витрат, максимізація доходу оператора чи скорочення кількості одиниць рухомого складу за збереження рівня обслуговування.

Окрему категорію становлять моделі координованого керування дорожнім рухом у регулярних (ґратчастих) планувальних структурах, де симулятори використовують для підбору параметрів «зеленої хвилі» та конвертації інтенсивності потоків у очікувані транспортні затримки в «вузьких місцях» (рис. 1.4). Такі розрахунки лягають в основу динамічних схем координації сигналів і доводять ефективність спільної оптимізації параметрів ВДМ і ГПТ.

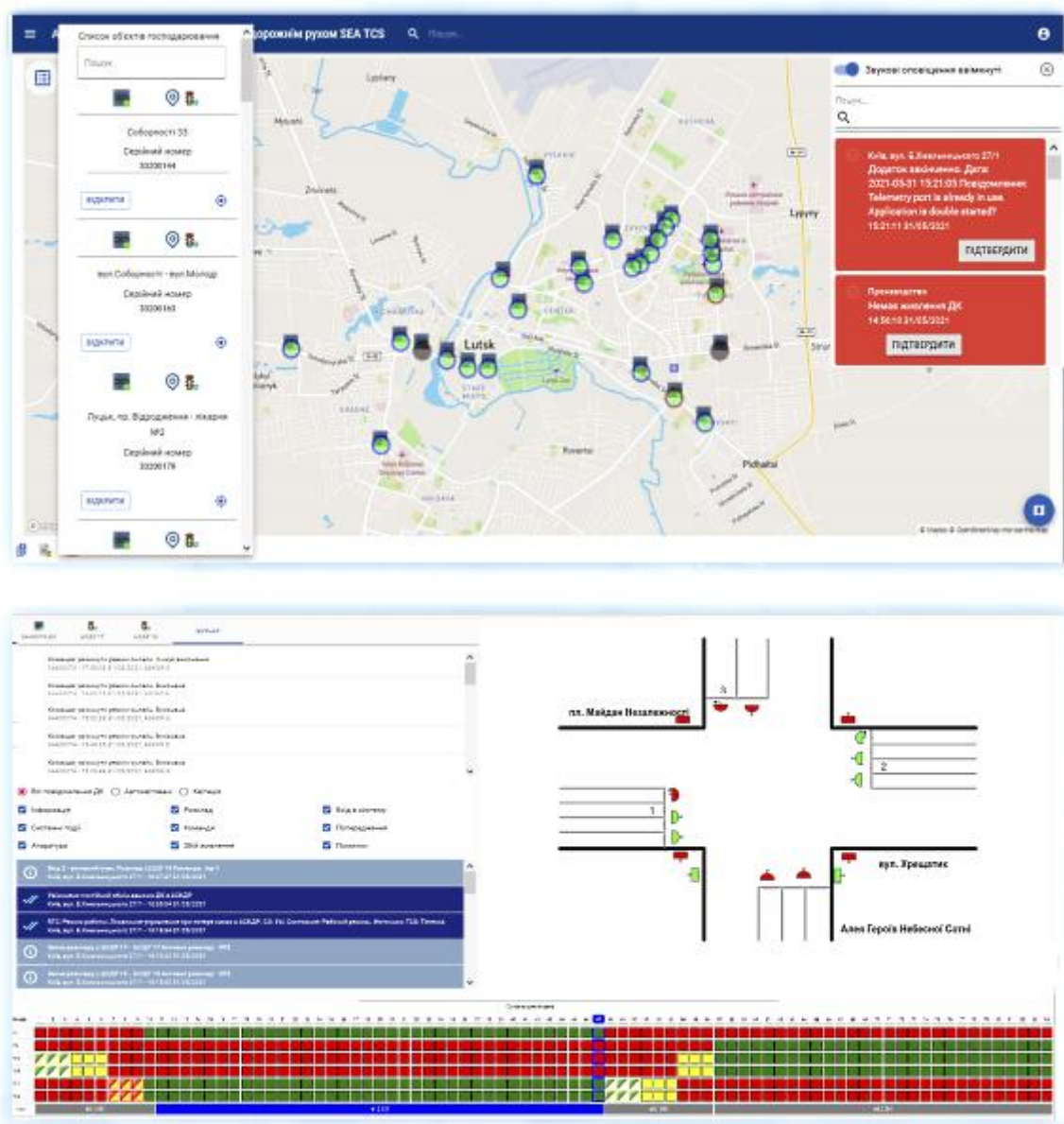


Рисунок 1.4 - Модель координованого керування дорожнім рухом

Важливим методичним зауваженням, яке регулярно підкреслюється у наукових дослідженнях є те, що моделі громадського транспорту мають явно враховувати завантаженість ВДМ. Ігнорування цього чинника призводить до систематичного заниження реального часу очікування та переоцінки регулярності. Тому сучасні постановки зв'язують транзитну симуляцію з призначенням дорожніх потоків і використовують дані GNSS/AVL, валідаторів та GTFS-Realtime для калібрування інтервалів, варіабельності ходу (headway variability), відмов у посадці через переповненість та фактичних швидкостей на ділянках із пріоритетом.

Підсумовуючи, імітаційне моделювання у 2025 році є базовим інструментом тактичного й операційного планування міських автобусних перевезень. Агентні, мезо- та мікроскопічні моделі, доповнені реальними даними та гібридними підходами (поєднання з аналітикою та робастною оптимізацією), забезпечують: достовірну оцінку ефектів змін маршрутної мережі та розкладів; проектування та валідацію заходів пріоритету ГПТ; урахування стохастики попиту та ВДМ; аналіз компромісів між часом пасажирів, витратами оператора, екологічними показниками та безпекою. Саме така інтегрована практика мінімізує ризики хибних управлінських рішень і підвищує ймовірність досягнення цільових KPI сервісу.

1.5 Аналіз методів підвищення ефективності використання автобусів

Базова мета організації руху міського пасажирського транспорту полягає у забезпеченні високої якості транспортного обслуговування населення за мінімально можливою собівартості перевезень. Якість у

прикладних дослідженнях та практиці експлуатації зазвичай характеризують системою показників, серед яких: регулярність руху, маршрутний інтервал (та його варіативність), ступінь заповнення рухомого складу (коефіцієнт наповнення/завантаження), витрати часу пасажирів на поїздки (очікування, пересадка, у русі), експлуатаційна/комерційна швидкість сполучення, а також комфорт і безпека обслуговування.

Між підвищенням якості та мінімізацією собівартості існує об'єктивний конфлікт цілей: покращення регулярності, скорочення інтервалів, зменшення часу очікування та підвищення комфорту здебільшого потребують додаткових ресурсів (більший випуск рухомого складу, резервні автобуси та бригади, пріоритет у вулично-дорожній мережі, інформаційна інфраструктура тощо), що підвищує витрати на одиницю перевезення. Тому задача планування руху має багатокритеріальний характер і розв'язується з урахуванням компромісу між цільовими показниками сервісу та витратами (мінімізація собівартості при дотриманні нормативів якості або максимізація корисності для пасажирів за ресурсних обмежень).

Складність побудови оптимального плану руху зумовлена стохастичністю попиту та умов руху: часово-просторовими флуктуаціями пасажиропотоків у транспортній мережі, нерівномірністю прибуття пасажирів на зупинки, затримками на перехрестях та у загальному транспортному потоці, випадковими збоями в роботі рухомого складу тощо. Відтак план має поєднувати:

- максимізацію корисного використання робочого часу автобусних бригад і рухомого складу (раціональні графіки, мінімальні порожні пробіги, узгодження розкладів на стикових вузлах);
- реалізацію цільових швидкісних режимів (експлуатаційна швидкість, зменшення простоїв, впровадження пріоритету на перехрестях, виділені смуги для ГПТ);
- вбудовані резерви надійності (резервні одиниці на випуск, технологічні «вікна» та буфери в ділянках графіка, алгоритми регулювання

інтервалів і черговості відправлень), які дають змогу компенсувати випадкові збурення без краху регулярності.

З практичного погляду ефективний план руху поєднує дві групи рішень:

1. Стратегічно-тактичні (структура маршрутної мережі, типи та місткість рухомого складу, розподіл випуску за годинами доби, цільові рівні сервісу);

2. Операційні (голдінг на вузлових зупинках, headway-based control замість жорсткого розкладу на коридорах з нерівномірним попитом, динамічне вирівнювання інтервалів, swar-алгоритми заміни бригад і ТЗ, диспетчерські стратегії реагування на збурення в реальному часі).

Вихідною базою для удосконалення використання автобусів є інтегральна інформація про мобільність населення (загальна та транспортна), а також розміри та напрямки пасажиропотоків із урахуванням часової та просторової варіативності. У практиці підприємств і органів управління традиційно застосовують натурні обстеження, які за організацією поділяють на безперервні та вибіркові; за методикою фіксації - на табличні, силуетні/схемні, анкетні тощо. Такі методи забезпечують високу точність (типова похибка близько 5 %), проте мають істотні обмеження:

- значні витрати трудових і фінансових ресурсів;
- затримку в отриманні результатів через обсяг обробки;
- репрезентативність лише для поточної конфігурації мережі (обстеження «бачить» сьогоднішні маршрути і не дає прямих відповідей для альтернативних сценаріїв).

З огляду на ці обмеження, у сучасній практиці натурні обстеження системно доповнюють цифровими джерелами даних: AFC (електронний квиток), AVL/GPS (бортові трекери), APC (автоматичний підрахунок пасажирів), GTFS/GTFS-RT (розклади та дані реального часу), дані мобільних мереж, Wi-Fi/Bluetooth-сенсинг у транспортних вузлах, комп'ютерний зір для потоків на платформах. Інтеграція цих джерел дає змогу отримати квазі-безперервну картину попиту та пропозиції, підвищити якість калібрування

моделей і скоротити часовий лаг між вимірюванням і управлінським рішенням.

Для побудови сценаріїв і оцінки наслідків рішень застосовують моделі просторового розподілу та вибору. Класичним є ентропійний підхід (максимізація ентропії транспортних потоків), який уперше було системно застосовано Вілсоном (1967) і надалі широко використовувано для моделювання вибору місця призначення, виду транспорту та маршруту. Поряд із цим використовують гравітаційні моделі, дискретні вибори (logit-моделі з латентними змінними), агент-орієнтовані моделі міської мобільності та методи машинного навчання для коротко- та середньострокового прогнозування.

Окрема важлива група - екстраполяційні та трендові методи прогнозування пасажиропотоків, на яких акцентує, зокрема, Заболоцький Г. А. Вони доцільні за стабільних структурних умов і на короткому горизонті, а їх точність значно зростає при комбінуванні з екзогенними предикторами (сезонність, події, погодні умови, зміни тарифів/частоти руху) та з цифровими телеметричними даними.

У сучасних міських коридорах поряд із традиційними метриками усе частіше застосовують:

- Excess Wait Time (EWT) та коефіцієнт варіації інтервалів як індикатори регулярності для headway-based експлуатації;
- On-Time Performance (OTP) для розкладної експлуатації;
- Passenger Load Factor (цільові діапазони наповнення залежно від класу маршруту і часу доби);
- Commercial Speed як інтегральний результат пріоритету, планування зупинок і керування посадкою;
- Customer Journey Time (час «двері-в-двері») як метрику, що відбиває реальну корисність сервісу.

Поєднання цих KPI з ресурсними індикаторами (витрати пально-енергетичних ресурсів, фонд часу бригад, пробіги з пасажирями/порожні)

дозволяє сформувати багатокритеріальну функцію мети й налаштувати оптимізацію під конкретні обмеження оператора та міста.

Зі спостережень Аррака А. О. випливає, що у сфері міських пасажирських перевезень існує проблема узгодження економічних і соціальних критеріїв оцінювання, оскільки чинники економічної та соціальної ефективності змінюються з різною швидкістю й нерідко у протилежних напрямках. Інакше кажучи, рішення, які оптимізують витрати перевізника, можуть погіршувати соціальні результати - підвищувати транспортну втомлюваність і знижувати якість обслуговування.

Економічний аспект ефективності пасажирських перевезень трактується як задоволення попиту на мобільність за мінімально можливих витрат і відображається в таких показниках:

- раціональність використання ресурсів (трудо-, фондо- та матеріаломісткість);
- результативність матеріального виробництва та ефективність роботи у невиробничій сфері.

Автор пропонує поділ основних виробничих фондів на дві групи:

- такі, що безпосередньо не формують якість перевезень (ремонтні потужності, загальні споруди);
- такі, що прямо впливають на якість (рухомий склад, станційно-зупинкова інфраструктура тощо).

Розглядаючи економічну ефективність міського пасажирського транспорту, Аррак А. О. пропонує як критерії оцінювання використовувати продуктивність транспортних засобів, витрати, показники якості транспортного обслуговування населення, енерго- та матеріаломісткість, рівень безпеки руху й вплив на довкілля. Водночас наголошується на суперечності, що виникає при виборі одиниць виміру обсягів виконаної роботи (у «пасажирах» чи «пасажиро-кілометрах»). За умови перевезення найкоротшим маршрутом величина транспортної роботи в пасажиро-кілометрах мінімізується, що є позитивним із позиції пасажирів, але може бути

менш привабливим для перевізника. Натомість облік лише кількості перевезених пасажирів здатен маскувати зниження якості через зростання коефіцієнта пересадочності.

Підвищення економічної ефективності, на думку автора, досягається шляхом покращення регулярності та культури обслуговування, встановлення оптимального режиму змінності, системного вивчення пасажиропотоків і збільшення прямолінійності маршрутів. У працях, присвячених розвитку та ефективності пасажирських перевезень, Аррак формулює головну мету перевізного процесу як мінімізацію сукупних витрат часу пасажирів. Оскільки точне визначення індивідуальних витрат часу в кожному випадку практично неможливе, застосовують середні показники, отримані з обстежень, що є трудомісткими й затратними. Тому автор пропонує оцінювати складові витрат часу на відтворення поїздки, спираючись на параметри транспортної мережі та експлуатаційні показники.

Якість пасажирських перевезень запропоновано вимірювати через співвідношення накладних витрат часу (сума часу підходу до зупинки, очікування посадки та пересування від зупинки до кінцевої точки) до часу поїздки, а також через відношення суми часу очікування і часу поїздки до часу поїздки. Сума часу підходу та очікування дає уявлення про раціональність і точність роботи транспорту. Для поліпшення якості виділено два ключові напрями: (1) скорочення часу підходу через розвиток мережі; (2) зниження часу очікування завдяки зростанню інтенсивності руху.

Система управління підприємствами міського пасажирського автотранспорту забезпечує як підготовку обґрунтованих планів перевезень, так і їх якісну реалізацію, тобто працює у двох взаємопов'язаних напрямках. Перший напрям стосується розроблення, обґрунтування та затвердження раціонального плану організації руху автобусів і включає такі завдання: визначення обсягів перевезень; встановлення середньої дальності поїздок; розрахунок основних техніко-експлуатаційних показників; розподіл пасажиропотоків між маршрутами; проєктування та оптимізацію маршрутної

мережі; розподіл рухомого складу між маршрутами та АТП; нормування швидкостей; вибір ефективної системи організації праці водіїв; розроблення розкладів руху; вибір схем розміщення зупинок і стоянок та їх оснащення; складання графіків випуску рухомого складу на лінію.

Показники, що характеризують ефективність експлуатації автобусів, включають енергоємність перевезень, матеріалоємність, трудомісткість використання рухомого складу, продуктивність, собівартість перевезень, приведені витрати та загальний обсяг перевезених пасажирів.

Енергоємність перевезень (E) визначається як кількість енергії, витраченої конкретним транспортним засобом на виконання перевезень, виражена у кілокалоріях на 100 пасажиро-кілометрів. Інакше кажучи, цей показник відображає, скільки енергоресурсів необхідно для забезпечення перевезення певного обсягу пасажирів при заданих експлуатаційних умовах.

$$E = \frac{100 \cdot Q_n \cdot \delta \cdot \lambda}{W}, \quad (1.1)$$

де Q_n – кількість автомобільного палива, витраченого на виконання перевезень, л;

δ – густина палива, кг/л;

λ – нижча теплота згоряння палива (теплотворна здатність), ккал/кг;

W – обсяг транспортної роботи (продуктивність), пасажиро-кілометри.

Матеріалоємність перевезень (M) – це показник, який характеризує витрати матеріальних ресурсів, необхідних для виконання певного обсягу транспортної роботи. Він визначає кількість матеріалів, спожитих під час експлуатації транспортного засобу (запасних частин, мастильних матеріалів, шин тощо), у перерахунку на одиницю корисної транспортної роботи.

$$M = \frac{1000 \cdot (G_k + G_e)}{W \cdot T_a \cdot \eta_e}, \quad (1.2)$$

де G_k – маса матеріалу, використаного у конструкції транспортного засобу, кг;

G_e – маса матеріалу, що витрачається під час експлуатації протягом амортизаційного терміну служби, кг;

T_a – амортизаційний строк служби автомобіля, років;

η_e – коефіцієнт використання матеріалу у виробництві, який відображає частку матеріалу, що фактично переходить у готову продукцію.

Продуктивність автомобіля (W) може визначатися двома способами:

за кількістю перевезених пасажирів - W_q ;

за кількістю виконаної пасажирської роботи (у пасажиро-кілометрах) за одиницю часу - W_p .

Тоді продуктивність визначається за формулами:

$$W_q = \frac{q_n \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_z}{t_p}, \quad (1.3)$$

$$W_p = \frac{q_n \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_z \cdot L_{cp}}{t_p}, \quad (1.4)$$

де q_n – номінальна місткість автобуса, пас.;

k_c, k_d – статичний і динамічний коефіцієнти використання місткості відповідно;

k_z – коефіцієнт змінності пасажирів (характеризує кількість оборотів пасажирів за один рейс);

L_{cp} – середня відстань перевезення одного пасажирів, км;

t_p – час виконання рейсу, год.

Таким чином, показник W_q відображає пасажиромісткість рухомого складу за одиницю часу, а W_p – реальний обсяг виконаної транспортної роботи, який враховує як заповнення автобуса, так і середню дальність поїздки. Ці

показники дозволяють оцінити ефективність використання автобусів у процесі пасажирських перевезень.

Собівартість перевезень (S) характеризує рівень експлуатаційних витрат, необхідних для виконання одиниці транспортної роботи, і визначається як відношення загальної суми витрат за певний період до обсягу виконаних перевезень у тому ж часовому інтервалі. Показник виражається у гривнях на пасажиро-кілометр (грн/пас·км) і розраховується за формулою:

$$S = \frac{C_{зм} \cdot V_e + C_{п}}{V_e}, \quad (1.5)$$

Де $C_{зм}$ – змінні витрати на 1 км пробігу, грн/км;

V_e – експлуатаційна швидкість руху автобуса, км/год;

$C_{п}$ – постійні витрати, віднесені на 1 годину роботи рухомого складу, грн/год.

Таким чином, собівартість відображає сукупний рівень витрат, пов'язаний із виконанням перевезень, і дозволяє оцінити економічну ефективність використання автобусів у реальних умовах експлуатації.

Наведені витрати (Z) представляють собою суму експлуатаційної собівартості та річного ефекту від використання капітальних вкладень, віднесених до одиниці транспортної роботи (грн/100 пас·км). Показник розраховується за формулою:

$$Z = S + E_n \cdot (K - K_{л}), \quad (1.6)$$

Де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (для автотранспортних підприємств, як правило, приймається у межах 0,1–0,15);

K – загальний обсяг капітальних вкладень, грн;

$K_{л}$ – ліквідаційна вартість транспортних засобів після закінчення строку експлуатації, грн.

Наведені витрати використовують для порівняльної оцінки різних варіантів перевезень, вибору економічно доцільного типу рухомого складу, визначення оптимальної структури маршрутної мережі та оцінки окупності інвестицій у транспортну інфраструктуру.

Обсяг перевезення пасажирів (Q) відображає фактичну кількість пасажирів, перевезених автобусом (або автопарком) за певний період часу. Цей показник характеризує результативність експлуатації рухомого складу й визначається за формулою:

$$Q = t_n \cdot V_e \cdot k_{\text{пр}} \cdot q \cdot k_m \cdot D_a \cdot L_{\text{ср}}, \quad (1.7)$$

Де t_n — середня тривалість перебування автомобіля у наряді, год;

V_e — експлуатаційна швидкість руху, км/год;

$k_{\text{пр}}$ — коефіцієнт використання пробігу (відношення корисного пробігу до загального);

q — пасажиромісткість автобуса, пас.;

k_m — коефіцієнт використання місткості (показує рівень фактичного заповнення салону);

D_a — кількість автомобіле-днів роботи за аналізований період;

$L_{\text{ср}}$ — середня довжина поїздки одного пасажирів, км.

Таким чином, показник Q характеризує загальний результат роботи рухомого складу у натуральних вимірниках - кількість перевезених пасажирів за певний період (зміну, добу, місяць або рік). Його величина залежить як від організації руху (швидкість, коефіцієнт пробігу, тривалість наряду), так і від технічних параметрів автобусів та рівня заповнення салону.

Цей показник є одним із ключових для оцінювання експлуатаційної ефективності транспортного підприємства, оскільки прямо впливає на собівартість перевезень, продуктивність рухомого складу та рівень задоволення попиту на транспортні послуги.

Реалізація функцій управління перевезеннями у другому напрямі діяльності системи (операційно-диспетчерському) забезпечує контроль, регулювання та координацію роботи рухомого складу під час виконання планів перевезень в умовах дії численних зовнішніх і внутрішніх чинників нестабільності транспортного процесу.

До зовнішніх факторів нестійкості належать:

- нерівномірність інтенсивності транспортних потоків у часі та просторі;
- неузгодженість роботи технічних засобів регулювання дорожнього руху;
- зміна дорожньо-кліматичних умов і погодних факторів.

Серед внутрішніх чинників нестійкості головним є технічний стан рухомого складу, який безпосередньо впливає на надійність виконання рейсів, частоту відмов агрегатів і втрати робочого часу.

Поєднана дія зовнішніх та внутрішніх факторів, а також неможливість повністю передбачити всі причини відхилень у роботі пасажирського транспорту, дають підстави розглядати транспортне підприємство як складну відкриту господарську систему. Це зумовлює необхідність використання ймовірнісних методів аналізу, а також людино-машинних процедур підтримки управлінських рішень при плануванні та регулюванні перевізного процесу.

Виробничі об'єднання пасажирського автомобільного транспорту потребують об'єктивної оцінки поточного стану системи управління та результативності виробничої діяльності. Однак така оцінка ускладнюється низкою проблем, серед яких:

- відсутність чітко обґрунтованого критерію оптимальності, що забезпечує адекватне оцінювання стану транспортної системи й ефективності її управління;
- відсутність завершеної методики прогнозування обсягів перевезень, яка б дозволяла формувати прогнози як у масштабі регіону, так і для окремих адміністративних районів і населених пунктів;

- складність урахування циклічних компонентів попиту на перевезення під час побудови прогнозних моделей;
- нестача науково обґрунтованих методів формування збалансованих техніко-економічних планів і алгоритмів управління, які забезпечували б високу ефективність та оперативність виконання планових завдань.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1. Методологічні основи моделювання транспортних процесів

Під час розроблення ефективних стратегій управління транспортними системами слід враховувати широкий спектр чинників - як внутрішніх, так і зовнішніх, особливості взаємодії підсистем, а також прогнозувати можливі ризики й наслідки ухвалюваних рішень. Удосконалення керування у великих організаційно-технічних системах, зокрема в міських транспортних системах, у процесі їх розвитку (зміна конфігурації УДС і маршрутної мережі ГПТ, оптимізація організації дорожнього руху: встановлення чи демонтаж знаків, коригування схем світлофорного регулювання тощо) зазвичай потребує проведення натурних експериментів. Це створює труднощі, оскільки вимагає значних фінансових, часових і людських ресурсів та пов'язане з високим рівнем ризику.

Тому в наукових дослідженнях експерименти виконують на модельних системах. Відповідно, для прогнозування наслідків управлінських дій і аналізу проектних альтернатив застосовують методи моделювання транспортних процесів, що спираються на математичну теорію транспортних потоків.

Чимало дослідників стикаються з вибором типу моделі для розв'язання актуальних задач: математичні чи імітаційні. Використання математичних моделей для дослідження й керування багатопараметричними системами, до яких належать і міські транспортні системи, може потребувати значних ресурсів. Тому для вдосконалення функціонування міської транспортної системи доцільно застосовувати імітаційні моделі, які дозволяють багаторазово проводити експерименти та визначати оптимальний стан досліджуваної системи за різних значень параметрів.

Залежно від способу подання транспортного потоку моделі поділяють на:

- мікроскопічні, у яких відтворюється рух кожного окремого автомобіля;
- макроскопічні, де потік розглядають як суцільне середовище;
- мезоскопічні, що описують окремі ТЗ детально (як у мікромоделях), але їхню взаємодію та колективну поведінку - узагальнено (як у макромоделях).

Мікроскопічні моделі придатні для оптимізації параметрів руху на конкретній ділянці мережі, перехресті чи групі перехресть. Для цього створюють імітаційні схеми, що враховують геометрію відрізка, щільність потоку, режими роботи світлофорів на суміжних підходах та кількість фаз регулювання. Якщо метою є аналіз і раціоналізація роботи всієї транспортної системи, застосовують макроскопічні підходи.

За функціональним призначенням виокремлюють імітаційні, оптимізаційні та прогнозні моделі. Імітаційні відтворюють поточний стан системи й дають змогу оцінювати швидкість та інтенсивність руху, рівень навантаження мережі, довжину й динаміку заторів та інші показники. Оптимізаційні послідовно моделюють реальний процес і, перебираючи можливі варіанти, визначають найкращі значення керованих факторів і параметрів системи. Прогнозні дають змогу оцінити ймовірний стан об'єкта у разі запровадження певних управлінських рішень або змін у структурі транспортних і пасажирських потоків.

В імітаційному моделюванні зазвичай застосовують три базові підходи: агентно-орієнтоване моделювання, моделювання дискретних подій і системну динаміку. В агентно-орієнтованих моделях система подається як множина автономних об'єктів, що взаємодіють між собою та із зовнішнім середовищем; кожен має власні характеристики та правила поведінки. Для дослідження еволюції процесів у складних системах використовують метод системної динаміки, що спирається на графічне відображення причинно-наслідкових

зв'язків і численних зворотних впливів. Такі моделі зазвичай формалізують у вигляді схем «запаси–потоки».

Оскільки в окремих випадках аналіз безперервних процесів (наприклад, руху плоскої поверхні трансформатора) є ефективнішим, коли розглядати не весь перебіг, а лише дискретні «події» у житті модельованої системи, доцільно застосовувати дискретно-подієве моделювання. Такий підхід описує роботу системи як послідовність операцій над заявками. У транспортних постановках ролі заявок найчастіше відіграють транспортні засоби, пасажери або пішоходи. Активні об'єкти дискретно-подієвих моделей опрацьовують ці заявки згідно з заданими параметрами (тип рухомого складу, технічні характеристики тощо) і у визначеній черговості дій.

Спеціалізованих програмних продуктів для моделювання міських транспортних систем на масштабах великого міста та вище не надто багато. До них належать розробки VISSIM і VISUM (створені близько трьох десятиліть тому в Німеччині), середовище AnyLogic, що використовується для побудови моделей у різних галузях, а також GPSS World, MATLAB і Simulink та інші платформи, які різняться предметною орієнтацією та функціональними можливостями.

Останніми роками дослідники дедалі частіше обирають для побудови імітаційних моделей дорожньої мережі середовище AnyLogic, оскільки воно містить вбудований оптимізатор для проведення оптимізаційних експериментів, розвинуті засоби візуалізації, можливість формувати бібліотеки об'єктів і, що принципово важливо, дозволяє в межах однієї моделі поєднувати три підходи - дискретно-подієвий, агентний і системну динаміку.

Основним обмеженням середовища імітаційного моделювання AnyLogic для транспортних задач є його краща придатність до мікро- та мезорівневих постановок (зокрема, моделювання окремих фрагментів мережі). Натомість побудова макромоделей із врахуванням взаємодії всіх підсистем складної транспортної мережі потребує значних часових і обчислювальних ресурсів.

У Німеччині статистичні моделі наявної дорожньої мережі застосовують для довгострокового планування та обґрунтування будівництва нових ділянок, де враховується взаємодія індивідуального та громадського транспорту. Такі моделі створюють із використанням спеціалізованих інструментів, зокрема сімейства PTV Vision. Ключові компоненти цієї системи - VISUM і VISSIM. Продукт VISUM реалізує макромодельовання поточних і прогнозних транспортних потоків з оцінюванням інтенсивностей, часових витрат у дорозі, витрат та опрацюванням сценаріїв «що, якщо...», а також дозволяє виявляти «вузькі місця» мережі. Для переходу на мікрорівень і наочної демонстрації змін будують і застосовують модель у VISSIM. Оскільки обидва пакети мають спільного розробника, між ними забезпечена пряма інтеграція.

Вибір PTV Vision як базового середовища зумовлений тим, що його розвиток спирається на фундаментальні дослідження у сфері транспортного модельовання (центри розроблення розташовані у США, Німеччині та Японії), що дає змогу системно підвищувати якість алгоритмів і функціональні можливості продукту.

2.2 Етапи розв'язання задач маршрутизації транспорту

Під час проектування (удосконалення) мережі автобусних маршрутів необхідно враховувати, що вона має :

- відповідати просторово-часовій структурі пасажиропотоків;
- максимально поєднувати центри формування попиту з пунктами тяжіння найкоротнішими напрямками;

- забезпечувати мінімальну кількість пересадок: ключові пункти тяжіння повинні мати пряме сполучення з центром міста, елементами зовнішнього транспортного вузла та, за можливості, між собою;

- розміщувати кінцеві зупинки у районах, де наявні умови для розвороту та відстою рухомого складу.

У межах теорії пасажирських перевезень дотримання наведених вимог реалізують шляхом поетапного виконання таких дій:

1. Поділ міста на проєктні та транспортні райони з визначенням «центра ваги» пасажиропотоків. Розміри зон мають бути такими, щоб внутрішні переміщення здійснювалися пішки, а відстань пішохідного підходу від найдальшої точки до лінії транспорту в межах району не перевищувала 500–700 м.

2. Встановлення чисельності населення в кожному розрахунковому транспортному районі.

3. Групування населення та розподіл переміщень за категоріями з подальшим визначенням загальної кількості поїздок між районами.

4. Побудова картограми пасажиропотоків.

5. Пошук маршрутів за критерієм мінімальних часових витрат.

Завдання визначення оптимального маршруту належить до класу комбінаторних задач, тож для формування мережі автобусних ліній потрібно порівняти множину можливих альтернатив. Оскільки повний перебір нереалістичний, застосовують евристичні та метаевристичні підходи. Паралельно існують точні методи, придатні для задач малого розміру в прийнятні терміни.

До точних методів розв'язання задач маршрутизації зазвичай відносять:

- динамічне програмування;
- стохастичне програмування;
- метод розгалужень і меж;
- метод відгалужень і зрізів.

До метаевристик зараховують такі алгоритми:

- пошук з винятками;
- імітацію відпалу;
- детермінований відпал;
- генетичний алгоритм;
- алгоритм мурашиної колонії тощо.

У спеціалізованому пакеті PTV VISUM задача маршрутизації може вирішуватися методом Branch & Bound) або шляхом зведення до задачі пошуку найкоротших шляхів.

За використання відповідного методу в транспортній моделі PTV VISUM для кожної ділянки пасажиропотоку формується дерево пошуку часткових маршрутів, у якому зберігаються всі варіанти, що відповідають критеріям «достатньої якості». Отже, результатом є не один-єдиний оптимальний шлях, а множина прийнятних альтернатив, що забезпечує диференційований розподіл попиту між маршрутами. Для оцінювання якості кандидатних рішень PTV VISUM застосовує показник «опір пошуку», який є сумою функцій вартості, зокрема часу поїздки та кількості пересадок. Специфіка адаптації методу розгалужень і меж у PTV VISUM полягає в тому, що жодна маршрутна альтернатива, яка виявилася оптимальною на певному етапі розгляду, принципово не відкидається.

Оптимальний маршрут можна також визначати через розв'язання задачі найкоротшого шляху. У такому підході дорожня мережа подається у вигляді графа: транспортні розв'язки - це вершини, дороги - ребра між ними; вулиці з одностороннім рухом моделюють орієнтованими ребрами. Метод дозволяє задавати характеристики ребер для позначення пріоритетних напрямів руху. Ваги ребер можуть визначатися за довжиною відрізка вулично-дорожньої мережі або за часовими й грошовими витратами на його подолання.

Існує низка алгоритмів знаходження найкоротших шляхів залежно від постановки. Найуживаніші:

- алгоритм Дейкстри - обчислює найкоротші шляхи від заданої вершини до всіх інших у графі без ребер із від'ємною вагою (рис. 2.1);

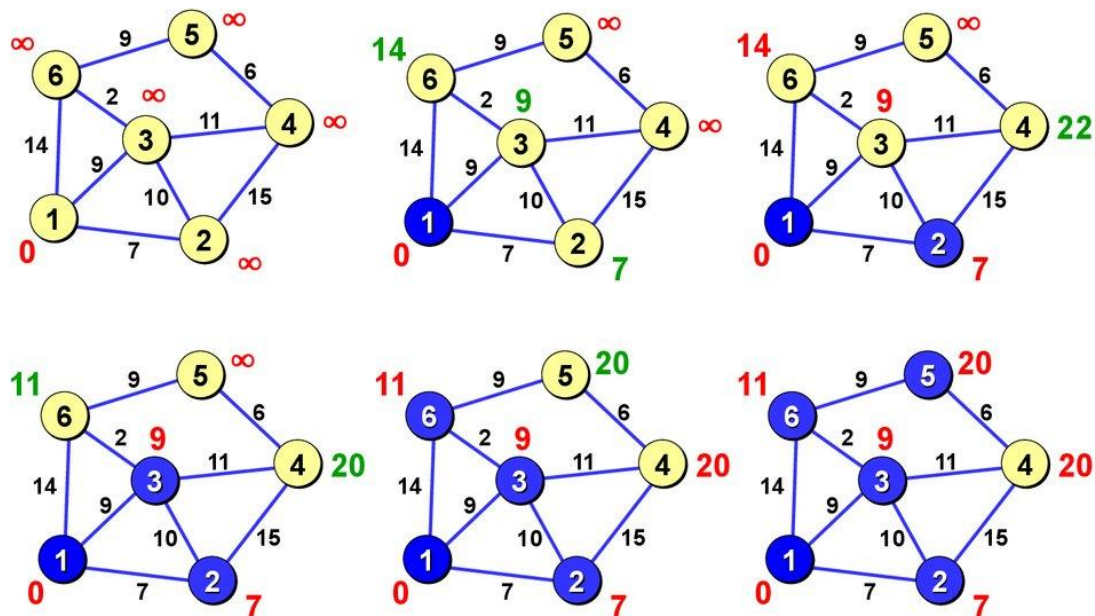


Рисунок 2.1 – Приклад алгоритму Дейкстри

- алгоритм Беллмана-Форда - знаходить найкоротші шляхи від однієї вершини до всіх інших у зваженому графі, допускаючи від'ємні ваги ребер (рис. 2.2).

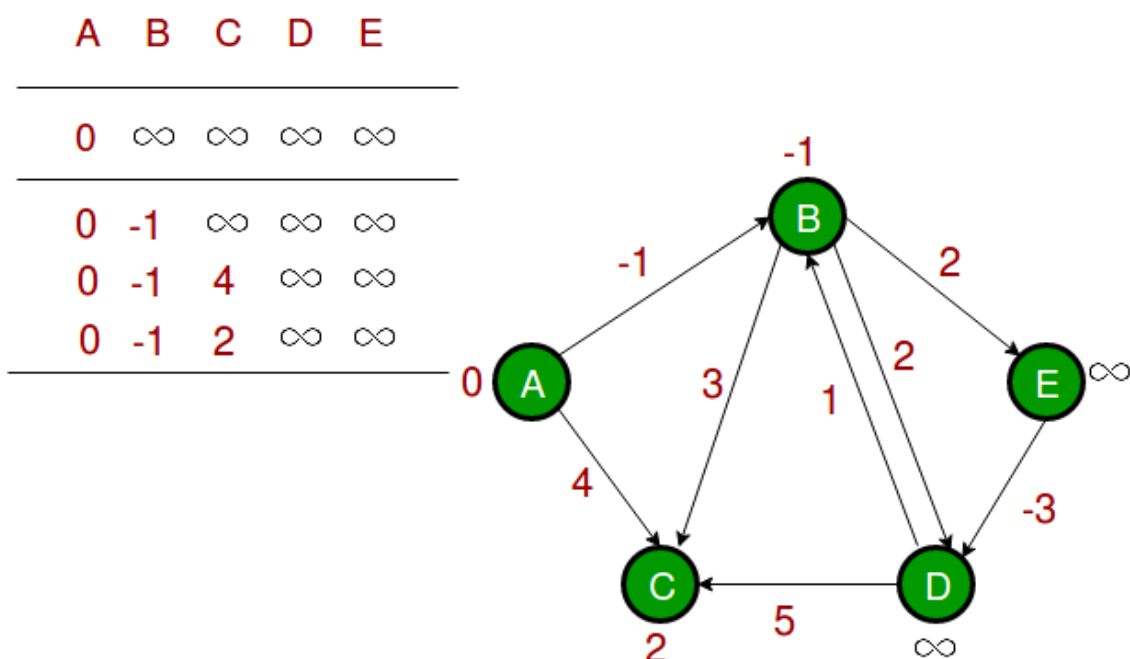


Рисунок 2.2 - Приклад алгоритму Беллмана-Форда

У PTV VISUM, коли застосовується пошук найкоротшого шляху за одним критерієм, визначається оптимальний варіант між двома

транспортними районами. Процедура мінімізує «опір пошуку», тобто найкращим вважається маршрут із мінімальною лінійною комбінацією часу поїздки та частоти пересадок.

Незалежно від обраного способу розв’язання, коригування маршрутів ГПТ слід виконувати періодично з урахуванням актуальних даних про транспортні потреби населення. Оскільки час у дорозі безпосередньо зумовлюється поточною дорожньою ситуацією на конкретній ділянці вулично-дорожньої мережі, під час вибору оптимального маршруту необхідна повна й достовірна інформація про характеристики транспортного потоку.

Поява в місті нових точок формування та поглинання пасажиропотоків, що швидко виникають, зумовлює потребу у регулярних обстеженнях їх якісних і кількісних характеристик, оскільки транспортна мережа має еволюціонувати синхронно з розвитком міської інфраструктури та вулично-дорожньої мережі. Пропонується наступну класифікацію методів обстеження пасажиропотоків (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Класифікація методів обстеження пасажиропотоків

Ключова перевага натурних методів полягає у високій достовірності та точності отримуваних даних. Водночас усі чинні на сьогодні натурні методики мають два суттєві недоліки:

1. повномасштабні виїзні обстеження є вкрай трудомісткими та зазвичай потребують залучення значної кількості обліковців; опрацювання матеріалів опитувань також вимагає значних людських, часових і фінансових ресурсів;

відсутня можливість із достатньою точністю фіксувати переміщення пасажирів у приватному транспорті. Тому виникає необхідність адаптувати наявні методи повномасштабних обстежень до умов, коли на міських маршрутах домінує індивідуальний транспорт.

Особливості натурних досліджень зумовлюють звернення до аналітичних методів прогнозування матриць відповідностей, зокрема:

- визначення кореспонденцій трудових поїздок на підставі поштових індексів працівників підприємств;
- гравітаційний підхід у поєднанні з ентропійним моделюванням, що спирається на принцип максимізації ентропії;
- інтеграцію анкетних та табличних методів у вибіркових польових опитуваннях;
- використання комплексу статистичних і анкетних процедур для виявлення незадоволеного попиту населення та, відповідно, потенційних пасажиропотоків;
- обчислення матриці відповідностей за часткою кореспонденцій і кількістю проданих абонементів;
- застосування елементів теорії нечітких множин і теорії ймовірностей;
- поєднання вибіркових польових обстежень із даними від великих містоутворювальних підприємств ;
- використання методів Монте-Карло тощо.

Наразі «класична» схема розрахунку транспортного попиту включає чотири послідовні етапи:

I. Генерація поїздок. Оцінювання загальної кількості прибуттів і відправлень для кожного транспортного району (з урахуванням чисельності населення, частки осіб працездатного віку і студентів, кількості робочих місць та зайнятих у сфері обслуговування в точках тяжіння).

II. Вибір виду транспорту. Визначення режиму пересування (громадський транспорт, індивідуальний автомобіль, велосипед, пішки тощо).

III. Просторовий розподіл. Розрахунок матриць відповідностей між усіма парами міських районів.

IV. Маршрутизація/розподіл по мережі. Визначення обсягів переміщень на кожній ділянці транспортної мережі.

Оскільки ці стадії взаємозалежні, їх не можна розв'язувати ізольовано. Вибір способу та маршруту руху ґрунтується на оцінці витрат (часових, грошових тощо), необхідних для досягнення пункту призначення; водночас обчислити ці витрати можливо лише за наявності даних про завантаженість вулично-дорожньої мережі. Тому задача узгодження виконується ітераційно методом послідовних наближень.

Для оцінки загального пасажиропотоку по районах визначають розміщення місць роботи та навчання відносно місць проживання, а також добові цикли переміщень і відвідування адміністративних та культурних об'єктів міста. Такі обстеження проводять систематично методом опитування (зокрема під час переписів). За потреби отримання додаткової специфічної інформації застосовують анкетні дослідження.

Під час моделювання вибору режиму руху індекс привабливості кожного режиму (m) попередньо задають як лінійну комбінацію релевантних параметрів, що впливають на рішення користувача.

$$U_{ijm} = \sum_g \beta_g \cdot c_{ijmg} \quad (2.1)$$

де c_{ijmg} - опір (витрати типу β_g) для переміщення з району i до району j у режимі m .

Виходячи з розрахованого індексу U_{ijm} , визначають частки кожного способу пересування у загальній кількості пасажирських поїздок. Для цього застосовують різні функції розподілу. Зокрема, у PTV VISUM можуть використовуватися такі моделі:

1. Кірхгофа - базується на співвідношенні показників ефективності кожної альтернативи пересування.
2. Logit - правило розподілу спирається на різницю показників ефективності між варіантами.
3. Вох–Сох - використовує перетворення Бокса–Кокса, яке для заданого $\tau \geq 0$ задається:

$$T_{\tau}(x) = \begin{cases} \frac{x^{\tau}-1}{\tau}, & \tau \neq 0, \\ \ln x, & \tau = 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Лозе - витрати шляху зіставляються з мінімально можливими; фактично вимірюється відносне відхилення від оптимуму. У загальному вигляді імовірність вибору i -ї альтернативи може бути записана як

$$P_i = \frac{\exp(-\beta(c_i - c_{\min}))^{\tau}}{\sum_j \exp(-\beta(c_j - c_{\min}))^{\tau}}, \quad (2.3)$$

де c_i - витрати на варіант i , $c_{\min}$ - мінімальні витрати серед альтернатив, $\beta > 0$ - параметр чутливості, $\tau \geq 0$ - параметр перетворення.

Для практичних застосувань не рекомендують використовувати модель Logit, оскільки рішення пасажирів змінюються залежно від того, йдеться про короткі чи довгі маршрути.

Незалежно від обраної методики визначення пасажиропотоків і побудови матриць відповідностей, підсумком має стати надійна інформація про їхній розподіл у часі, за довжиною маршрутів і напрямками, а також

можливість виявляти закономірності формування потоків для прогнозування майбутніх змін.

2.3 Методи обстежень та прогнозування інтенсивності руху на вулицях міста

Натурні дослідження транспорту зазвичай зводяться до підрахунку одиниць транспортних засобів і фіксації їх характеристик (орієнтовної довжини та ширини кожного ТЗ). Отримані дані дозволяють робити висновки про щільність і склад потоку, а також простежувати залежність інтенсивності руху від пори року, дня тижня та часу доби. Для перехресть ці характеристики визначають окремо для кожного напрямку руху.

За підсумками обстежень формують картограми інтенсивності транспортних потоків на ділянках вулично-дорожньої мережі. У цій роботі під інтенсивністю транспортного потоку розумітимемо кількість транспортних засобів, що проходять певну ділянку дороги за годину, день або інший обраний інтервал часу.

Водночас одного показника інтенсивності недостатньо для повного опису дорожньої ситуації. Наприклад, під час затору, коли швидкість потоку прямує до нуля, кількість ТЗ, що фактично проходять ділянку, буде значно меншою, ніж за умов руху з дозволеною швидкістю. Тому під час відкриття або коригування маршрутів ГПТ доцільно враховувати три групи даних:

1. Щільність транспортного потоку:

- загальна кількість ТЗ на ділянці;
- розподіл ТЗ за смугами;
- загальна кількість ТЗ кожного типу;
- кількість ТЗ різних типів по кожній смузі руху.

2. Дорожньо-транспортні пригоди із зазначенням можливих причин:- -

- надмірна швидкість, висока щільність або зайнятість смуг;
- наявність заторів чи випадків руху по зустрічній смузі;
- ТЗ, що зупинилися або рухаються з малою швидкістю;
- наявність сторонніх/небезпечних предметів на проїзній частині.

3. Наявність/відсутність автомобілів на ділянці:

- наявність ТЗ, що наближаються до контрольної ділянки;
- наявність ТЗ, що зупинилися на перехресті;
- вимірювання довжини черги.

Нині для оперативного збору та обробки даних про параметри транспортного потоку і стан вулично-дорожньої мережі широко застосовують відеокамери та автоматичні відеодетектори руху.

Сучасні автоматизовані системи керування транспортом здебільшого спираються на дані, отримані з відеокамер і оброблені програмами оптичного розпізнавання образів. Використання таких засобів передбачає облаштування спеціальних, відносно дорогих стаціонарних постів. До переваг належать простота застосування, висока швидкість і точність вимірювань, а також можливість фіксації зображення спірного чи невпізнаного транспортного засобу для подальшої ручної ідентифікації. Системи комп'ютерного зору дають змогу класифікувати транспортні засоби не лише за довжиною, а й за шириною та висотою - що недоступно для більшості сенсорів. Серед недоліків відеосистем - складність розпізнавання в темний час доби або за негоди, утім ці проблеми піддаються технічному вирішенню.

Засоби відеореєстрації та вимірювання параметрів транспортного потоку доцільно встановлювати на таких ділянках:

- на в'їзних перехрестях автомобільних доріг;

- на перехрестях на відстані не більш як 800 м одне від одного;
- на перехрестях зі значною добовою варіацією інтенсивності, коли на одну смугу припадає понад 300 ТЗ;
- на перехрестях, де інтенсивність на ділянці становить понад 1500 ТЗ/год, а перехрещувана магістраль має менше ніж 120 ТЗ/год на смугу.

Уздовж маршруту руху можуть розміщувати дві чи більше камер. Вони фіксують реєстраційні номери ТЗ на кожній ділянці вулично-дорожньої мережі за допомогою автоматичного розпізнавання номерних знаків (ANPR). Знаючи відстань між ділянками та час проходження, обчислюють середню швидкість руху.

Нині одним із найактуальніших підходів до вимірювання параметрів транспортного потоку є застосування інтелектуальних технологій моніторингу й збору даних, що поєднують відео- та фотоспостереження з системами GPS.

Через високу ресурсомісткість повних натурних обстежень зазвичай застосовують вибірковий підхід, що ґрунтується на законах теорії ймовірностей і методах математичної статистики. Його сутність полягає у визначенні такого обсягу вибірки n , щоб отримані характеристики можна було коректно екстраполювати на генеральну сукупність. З практичної точки зору погодинну інтенсивність руху автомобілів і пішоходів допустимо оцінювати за підсумками 3–5- та 10-хвилинних інтервальних спостережень.

Розмір вибірки обчислюють за формулою:

$$n = \frac{N t^2 p q}{\Delta^2 (N - 1) + t^2 p q}, \quad (2.4)$$

де N - чисельність генеральної сукупності;

t - значення функції довірчої ймовірності (беруть із табл. 2.1 відповідно до обраної надійності);

p і $q = 1 - p$ - вибіркві частки (за рівноймовірних подій приймають $p = q = 0,5$);

Δ - гранична похибка репрезентативності вибірки (у частках одиниці).

Таблиця 2.1

Залежність прийнятого значення функції t від вимог до надійності

Надійність, %	85	95	99	99,9
Функція t	1,5	2	2,6	3,3

Вимірювання параметрів транспортного потоку можуть виконуватися спостерігачами, із застосуванням різних технічних засобів, а також пересувними лабораторіями, оснащеними відповідним обладнанням.

За результатами вибірових обстежень обчислюють середньогодинну інтенсивність руху, що дає змогу визначити добову, а далі - середньомісячну та середньорічну інтенсивність. Додатково виділяють максимальні погодинні значення для кожного місяця й за рік, а також розраховують пропускну спроможність відповідної ділянки вулично-дорожньої мережі.

Незалежно від застосованого методу обстеження, зібрані відомості будуть корисними лише за умови належної структуризації та систематизації. Для прогнозування навантажень на ділянках міської ВДМ і для загальної оцінки дорожньої обстановки використовують методи статистичного аналізу та обробки даних, які допомагають виявляти закономірності та досліджувати процеси в складних організаційно-технічних системах, зокрема у транспортно-дорожньому комплексі. Виявлені закономірності надалі лягають в основу інформаційних систем і транспортних моделей, за допомогою яких можна досліджувати поведінку системи за змін різних факторів, що негативно впливають на дорожній рух.

2.4 Концептуальна модель і структурна організація системи керування міськими автобусними перевезеннями

Якісного управління можна досягти шляхом упровадження системних рішень, однією з підсистем яких є система керування міськими автобусними перевезеннями. Така система має забезпечувати як стратегічне, так і оперативне управління. Визначаються довгострокові стратегічні завдання, а критеріями якості управління виступають підвищення безпеки, надійності та стабільності. Коректність роботи системи значною мірою залежить від якості вихідних даних і адекватності методів їх оброблення. Це забезпечується наявністю:

- модуля збору, зберігання та адміністрування інформації про параметри транспортної системи, а також моніторингу даних щодо транспортних і пішохідних потоків;

- інтелектуального ядра для аналізу та оцінювання даних із подальшою підготовкою рекомендацій (автоматизоване планування, перенаправлення на альтернативні маршрути, оптимізація структури на маршрутах відповідно до транспортних потреб населення тощо);

- модуля підтримки ухвалення управлінських рішень, у якому з-поміж запропонованих альтернатив обирають найкращу для подальшого застосування в аналогічних ситуаціях.

Систему управління автобусними перевезеннями розробляють з метою надання особам, що приймають рішення, рекомендацій на підставі наукового аналізу статистичної інформації про поточні транспортні та пасажирські потоки щодо:

- оптимізації маршрутної мережі міста;

- підбору оптимальної підстанції для кожного маршруту залежно від часу доби;
- виявлення проблемних ділянок дорожньої мережі;
- зменшення негативного впливу ГПТ на довкілля поблизу міських автомагістралей;
- скорочення часу доставки пасажирів;
- мінімізації простоїв транспортного засобу в заторах і на підстанції під час очікування подачі ТЗ до місця посадки та висадки;
- підвищення рівня задоволеності населення якістю пасажирських перевезень.

Запропонована система управління міськими автобусними перевезеннями дає змогу не лише формувати стратегії розвитку системи громадського транспорту, а й здійснювати оперативне керування транспортним процесом за умов змінних параметрів транспортної системи. Завдяки зворотному зв'язку система управління дозволяє зіставляти поточні значення параметрів із модельними і, у разі їх розбіжності, виявляти причини проблемних ситуацій, а також оперативно коригувати управлінські рішення.

Тривожні впливи на транспортну систему умовно поділяють на регулярні (години пік), що зумовлені часом доби, днем тижня, сезоном та іншими періодичними чинниками, і разові, до яких належать масові заходи. Такі збурення змінюють структуру та параметри пасажиропотоків. За повторюваних збурень реакцію системи забезпечують коригуванням поточних параметрів (інтервалів руху, місткості рухомого складу тощо), не торкаючись її структури (схем руху, введення додаткових маршрутів), що, як правило, необхідно при масових заходах.

Запропонована система дає змогу прогнозувати параметри зазначених тривожних впливів (години пік, масові події) та перевіряти ефективність рішень як для регулярних, так і для одноразових збурень. Удалі конфігурації можуть бути збережені для повторного застосування.

Крім того, систему можна використовувати для коригування параметрів роботи ГПТ у разі появи нових центрів формування й поглинання пасажиропотоків. Упровадження системи управління автобусними перевезеннями підвищить привабливість громадського транспорту. Концептуальну модель подано на рисунку 2.4.

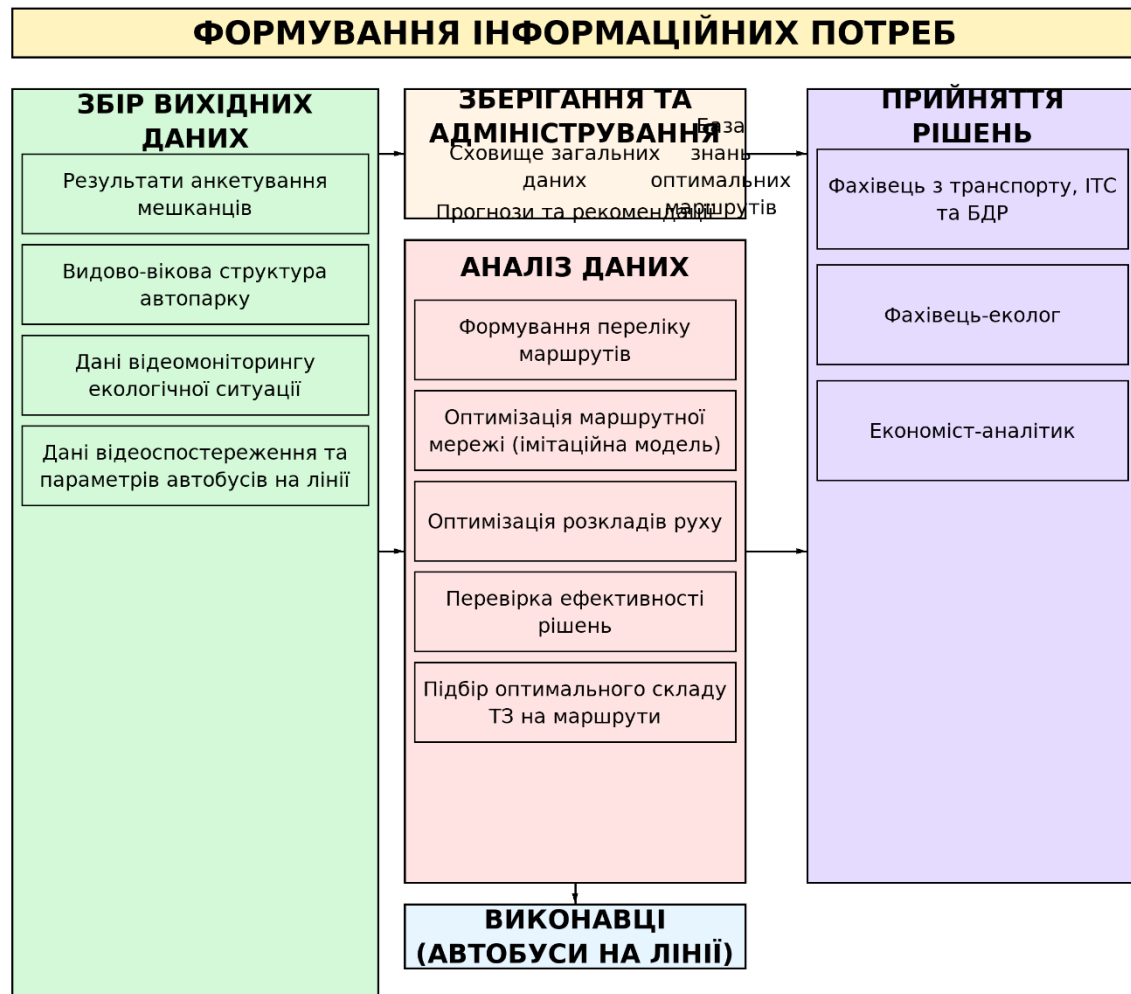


Рисунок 2.4 - Концептуальна схема системи керування міськими автобусними перевезеннями

Під час опрацювання великих масивів вхідних даних якість результатів визначається рівнем їх формалізації та коректністю структурування. У модулі

введення та зберігання інформації дані умовно поділено на первинні, довідкові та розрахункові.

До первинних віднесено відомості про населення міста (таблиці «Групи пасажирів», «Причини переміщень», «Транспортні райони»). Довідкові дані охоплюють параметри вулично-дорожньої мережі (таблиця «Розділ ВДМ»), рухомого складу (таблиця «Транспорт» із допоміжними таблицями «Тип виду перевезення» та «Тип рухомого складу») і маршрутів громадського пасажирського транспорту (таблиця «Маршрут»). Розрахункові значення - це отримані навантаження на УДС разом із розрахованими матрицями витрат і відповідностей (таблиця «Навантаження УДС») (рисунк 2.5).

Розраховані навантаження класифікують за станами: «нижче пропускної спроможності», «відповідає пропускній спроможності», «перевищено пропускну спроможність», «критичне значення». За допомогою запитів можна виявляти проблемні ділянки ВДМ із критичними навантаженнями, а також маршрути, що проходять через ці відрізки. Це створює підстави для коригування маршрутної мережі з урахуванням фактичної завантаженості доріг.

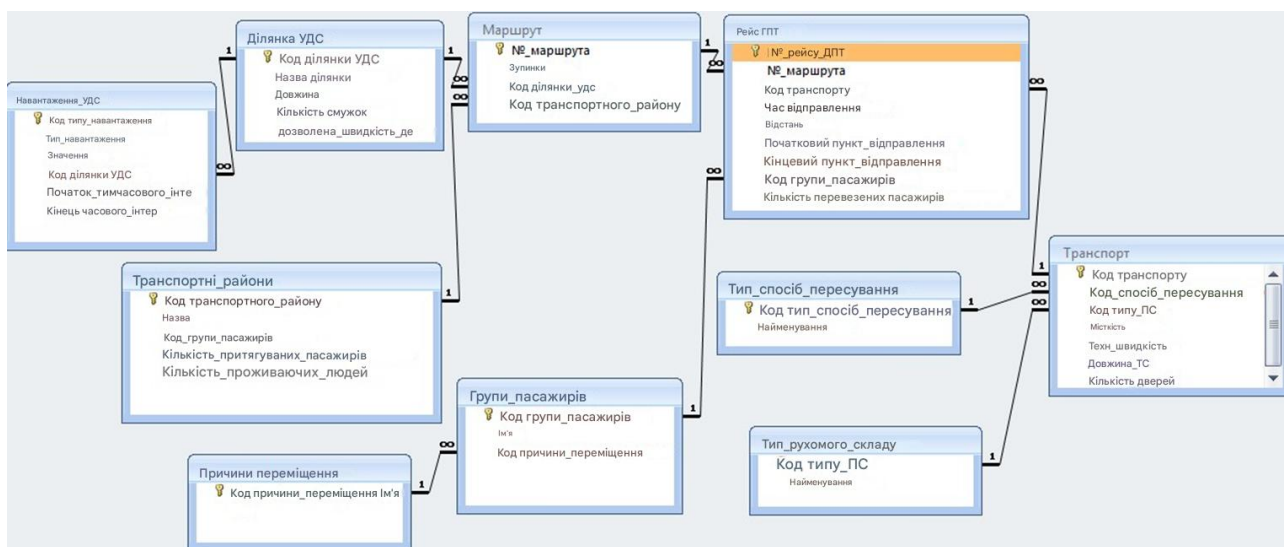


Рисунок 2.5 - Інформаційно-логічна модель даних

Для переходу до строгої математичної постановки транспортної задачі необхідно:

- визначити критерій ефективності;
- описати змінні моделі, що на нього впливають;
- задати принципові та технічні обмеження, аби задача була коректною й розв'язною.

Критерій ефективності (цільова функція/параметр оптимізації) має бути вимірюваним і, головне, адекватно відображати результативність роботи системи у заздалегідь обраному сенсі. Оскільки під час організації міських автобусних перевезень потрібно задовольнити транспортні потреби населення за мінімальний час і водночас знизити навантаження на проблемні ділянки ВДМ, цільовий функціонал моделі приймаємо у вигляді векторної мінімізації:

Векторний критерій оптимізації приймемо у вигляді

$$Z = \begin{cases} Z_1 \rightarrow \min, & Z_1 = f(X_i^1) - \text{сумарна кількість маршрутних ТЗ;} \\ Z_2 \rightarrow \min, & Z_2 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 - \text{середній час доставки пасажирів.} \end{cases} \quad (2.5)$$

Деталізація складових:

$f_1(v_{\text{піш}}, F, l_i^{\text{марш}}, X_i^2, X_i^3)$ - середній час підходу пасажирів до зупинки;

$f_2(K_j^{\text{перев}}, l_i^{\text{марш}}, X_i^1, X_i^2)$ - середній час очікування автобуса;

$f_3(Q_{(i,j)}^{\text{вх}}, Q_{(i,j)}^{\text{вих}}, n_{x_i}^{\text{об}}, t_o, X_i^2, X_i^3)$ - середній час посадки–висадки пасажирів.

$f_4(K_{\text{подач}}, Q_{(i,j)}^{\text{вх}}, Q_{(i,j)}^{\text{вих}}, L_j^{\text{сп}}, n_{x_i}^{\text{об}}, t_o, X_i^2, X_i^3)$ - середній час простою ТЗ на зупинці
 $f_5(J_v^{\ell}, T_{\text{заг}}, X_i^2)$ - середній час поїздки.

Вектор $X_i = \{x_i^1, x_i^2, x_i^3\}$ містить керовані характеристики i -го маршруту: x_i^1 - кількість ТЗ на маршруті;

x_i^3 - число зупиночних пунктів на маршруті;

x_i^2 - кількість ТЗ за типами (структура випуску) на маршруті.

Середній час підходу пішки до зупинки залежить від середньої відстані між зупинками $l_{\text{ср}}$ і обчислюється:

$$f_1(v_{\text{піш}}, F, l_i^{\text{марш}}, X_i^2, X_i^3) = \frac{K_{\text{н.п.}} K_{\text{в.о.}}}{v_{\text{піш}}} \cdot \frac{1}{3} + \frac{F + l_{\text{ср}}}{4}. \quad (2.6)$$

де:

$K_{\text{н.п.}}$ - коефіцієнт непрямолінійності траєкторії підходу ($K_{\text{н.п.}} \in [1,2]$);

$K_{\text{в.о.}}$ - коефіцієнт вибору зупинки, що мінімізує час доставки порівняно з варіантом через найближчу зупинку;

$v_{\text{піш}}$ - швидкість пішого руху;

F - щільність маршрутної мережі;

$l_{\text{ср}}$ - середня відстань між сусідніми зупинками.

Коефіцієнт вибору зупинкового пункту $K_{\text{в.о.}}$ визначають за співвідношенням

$$K_{\text{в.о.}} = 1 + \frac{v_{\text{піш}}}{v_i^{\text{осн}}}, \quad (2.7)$$

де $v_i^{\text{осн}}$ - характерна «опорна» швидкість для маршруту i , що використовується у порівнянні з пішим доступом.

Нехай $v_{x_i}^{\text{спол}}$ - швидкість сполучення, що задається як функція, залежна від типу рухомого складу. Якщо $v_{x_i}^{\text{спол}} > v_{\text{поток}}^{\text{ср}}$, де $v_{\text{поток}}^{\text{ср}}$ - середня швидкість транспортного потоку, то для узгодження з умовами руху приймаємо $v_{x_i}^{\text{спол}} = v_{\text{поток}}^{\text{ср}}$.

Середню відстань між зупинками на маршруті i обчислюємо за формулою

$$l_{\text{сер}} = \frac{l_i^{\text{марш}}}{x_i^3}, \quad (2.8)$$

де $l_i^{\text{марш}}$ - довжина i -го маршруту, а x_i^3 - кількість зупиночних пунктів на цьому маршруті.

Підставивши співвідношення одержимо вираз для середнього часу підходу пішки до зупинки:

$$f_1(v_{\text{піш}}, F, l_i^{\text{марш}}, X_i^2, X_i^3) = \frac{K_{\text{н.п.}}}{v_{\text{піш}}} \cdot \frac{1}{3} \left(1 + \frac{v_{\text{піш}}}{v_{x_i}^{\text{спол}}}\right) + \frac{1}{4} \left(F + \frac{l_i^{\text{марш}}}{X_i^3}\right). \quad (2.9)$$

Коли пасажиромісткість рухомого складу вичерпана, пасажирів відмовляють у посадці, тож він очікує наступний рейс. На відміну від підходу з «половиною інтервалу» $0,5 t_u$, додатково враховуємо перевищення попиту над наявними місцями на j -му зупинковому пункті:

$$f_2(K_j^{\text{пв}}, l_i^{\text{марш}}, X_i^1, X_i^2) = 0,5 t_u K_j^{\text{пв}}, \quad (2.10)$$

де коефіцієнт

$$K_j^{\text{пв}} = 1 + \frac{Q_{(i,j)}^{\text{вх}}}{q_{x_i} - \sum_{l=1}^{j-1} Q_{(i,l)}^{\text{вих}} + \sum_{l=1}^{j-1} Q_{(i,l)}^{\text{вх}}}. \quad (2.11)$$

де $Q_{(i,j)}^{\text{вх}}$ і $Q_{(i,j)}^{\text{вих}}$ - відповідно притоки та відтоки пасажирів на зупинці j маршруту i ;

q_{x_i} - місткість ТЗ (залежить від типу рухомого складу x_i).

Мережевий інтервал руху на маршруті i дорівнює

$$t_u = \frac{T_{об}}{X_i^1} = \frac{l_i^{марш}}{v_{x_i}^{спол} X_i^1}, \quad (2.12)$$

де $T_{об}$ - час повного обороту по маршруту; X_i^1 - кількість випущених на лінію ТЗ.

З урахуванням вище наведених формул очікування автобуса набуває вигляду

$$f_2(K_j^{пв}, l_i^{марш}, X_i^1, X_i^2) = 0,5 \frac{l_i^{марш}}{v_{x_i}^{спол} X_i^1} \left(1 + \frac{Q_{(i,j)}^{вх}}{q_{x_i} - \sum_{l=1}^{j-1} Q_{(i,l)}^{вих} + \sum_{l=1}^{j-1} Q_{(i,l)}^{вх}}\right). \quad (2.13)$$

Середній час посадки–висадки залежить від кількості дверей у рухомого складу і обчислюється як

$$f(Q_{(i,j)}^{вх}, Q_{(i,j)}^{вих}, n_{x_i}^{дв}, \bar{t}_o; X_i^2, X_i^3) = \sum_{j=1}^{X_i^3} \frac{Q_{(i,j)}^{вх} + Q_{(i,j)}^{вих}}{n_{x_i}^{дв}} \bar{t}_o, \quad (2.14)$$

де $j = 1, 2, \dots, X_i^3$ - зупиночні пункти на маршруті i ;

$n_{x_i}^{дв}$ - кількість дверей ТЗ (як функція від типу ТЗ);

$\bar{t}_o$ - середній час, який витрачає один пасажир на посадку або висадку.

Розподіл випадкової величини $\bar{t}_o$ доцільно описувати законом:

$$f(\bar{t}_o) = \frac{\lambda \cdot (\lambda \bar{t}_o)^k}{k!} e^{-\lambda \bar{t}_o}, \quad (2.15)$$

де $\lambda = \frac{1}{M(t_{oc})}$ - величина, обернена до математичного сподівання часу простою на проміжній зупинці t_{oc} .

Середній час затримки ТЗ на зупинці в очікуванні виконання посадки/висадки визначається кількістю та довжиною ТЗ, що вже перебувають на майданчику до підходу наступного рейсу:

$$f_4(K_{\text{зад}}, Q_{(i,j)}^{\text{ВХ}}, Q_{(i,j)}^{\text{ВИХ}}, L_j^{\text{оп}}, l_{x_i}^n, \bar{t}_o; X_i^2, X_i^3) = K_{\text{зад}} \cdot f(Q_{(i,j)}^{\text{ВХ}}, Q_{(i,j)}^{\text{ВИХ}}, n_{x_i}^{\text{ДВ}}, \bar{t}_o; X_i^2, X_i^3), \quad (2.16)$$

де $K_{\text{зад}}$ - коефіцієнт затримки ТЗ на зупинці:

$$K_{\text{зад}} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.17)$$

N_2 - загальна кількість ТЗ на зупинці в поточний момент;

N_1 - кількість ТЗ, що одночасно здійснюють посадку/висадку.

Останню оцінюють як

$$N_1 = \frac{L_j^{\text{оп}}}{\sum_{r=1}^n l_{x_i}^r}, \quad (2.18)$$

де $L_j^{\text{оп}}$ - корисна довжина зупинкового майданчика j ; $l_{x_i}^r$ - довжина r -го ТЗ (функція типу рухомого складу).

Середній час затримки рухомого складу на зупинці (черга до місця посадки/висадки) з урахуванням наявних на майданчику ТЗ задаємо як

$$f_4(K_{\text{зад}}, Q_{(i,j)}^{\text{ВХ}}, Q_{(i,j)}^{\text{ВИХ}}, L_j^{\text{оп}}, l_{x_i}^n, \bar{t}_o; X_i^2, X_i^3) = \frac{N_2}{L_j^{\text{оп}}} \sum_{j=1}^{X_i^3} \frac{Q_{(i,j)}^{\text{ВХ}} + Q_{(i,j)}^{\text{ВИХ}}}{n_{x_i}^{\text{ДВ}}} \bar{t}_o, \quad (2.19)$$

де N_2 - кількість ТЗ, що одночасно знаходяться на зупинці; інші позначення - як у попередніх формулах.

Середній час перебування пасажирів в автобусі складається з часу в русі та додаткового простою в заторах:

$$f_5(\bar{l}_e, T_{\text{зат}}; X_i^2) = \frac{\bar{l}_e}{v_{x_i}^{\text{спол}}} + T_{\text{зат}}, \quad (2.20)$$

де $\bar{l}_e$ - середня відстань переміщень пасажирів; $T_{\text{зат}}$ - час простою в заторах, що оцінюється як

$$T_{\text{зат}} = \frac{l_{\text{проб}}}{v_{\text{зат}}}, \quad (2.21)$$

$l_{\text{проб}}$ - довжина проблемної ділянки; $v_{\text{зат}}$ - швидкість потоку на цій ділянці (визначається за кількістю смуг, часткою легкових авто та інтенсивністю руху у двох напрямках згідно з чинними методиками).

На модель накладаються обмеження. Перше - повне задоволення попиту на маршруті i :

$$\sum_{n=1}^{X_i^2} Q_{(n,x_i)} \cdot X_{(n,x_i)}^1, \quad (2.22)$$

де $n = 1, 2, \dots, X_i^2$ - типи ТЗ на маршруті i ;

$X_{(n,x_i)}^1$ - кількість ТЗ типу n на маршруті i ;

Q_i - пасажиропотік на маршруті i ;

$Q_{(n,x_i)}$ - число пасажирів, перевезених одним ТЗ типу n на маршруті i , що обчислюється як

$$Q_{(n,x_i)} = \frac{q_{x_i^n} \cdot l_i^{\text{марш}}}{24 \cdot v_{x_i^n}^{\text{спол}}}, \quad (2.23)$$

де $q_{x_i^n}$ - місткість ТЗ типу n ; $l_i^{\text{марш}}$ - довжина маршруту; $v_{x_i^n}^{\text{спол}}$ - швидкість сполучення для цього типу ТЗ.

2. Пропускна спроможність ділянок ВДМ. Сумарне навантаження від рухомого складу, що проходить ділянками вулично-дорожньої мережі вздовж маршруту i , не повинно перевищувати доступний резерв пропускної спроможності:

$$\sum_{n=1}^{x_i^2} D_{(n,x_i)} X_{(n,x_i)}^1 \leq D_i, \quad (2.24)$$

де D_i - сукупний резерв пропускної спроможності тих відтинків ВДМ, якими проходить маршрут i ;

$D_{(n,x_i)}$ - коефіцієнт використання пропускної спроможності транспортним засобом типу n на маршруті i , який визначається як

$$D_{(n,x_i)} = \frac{K_{x_i}^r l_i^{\text{марш}}}{24 v_{x_i^n}^{\text{спол}}}, \quad (2.25)$$

де $K_{x_i}^r$ - коефіцієнт приведення пропускної спроможності, що враховує еквівалентність різних типів ТЗ до одиниці «легковий автомобіль»; $l_i^{\text{марш}}$ - довжина маршруту; $v_{x_i^n}^{\text{спол}}$ - швидкість сполучення для ТЗ типу n .

3. Обмеження на очікування автобуса. Час очікування пасажиром автобуса на маршруті i не повинен перевищувати допустимого мережевого інтервалу руху:

$$f_2(K_j^{\text{пв}}, l_i^{\text{марш}}, X_i^1, X_i^2) \quad (2.26)$$

4. Обмеження на час підходу пішки. Час підходу пасажира до зупинкового пункту, який залежить від віддаленості точки походження в межах транспортного району, не має перевищувати норматив:

$$f_1(v_{\text{піш}}, F, l_i^{\text{марш}}, X_i^2, X_i^3) < t_{\text{підходу}}^{\text{max}}. \quad (2.27)$$

2.5 Транспортна модель

Транспортна модель - це програмний комплекс, що поєднує модель мережі, модель попиту на перевезення та модель впливів. Модель мережі відтворює вулично-дорожню систему у вигляді вузлів і відрізків, нанесених на карту міста з урахуванням масштабу для подальшого автоматизованого обчислення довжин ділянок. Для кожного відрізка задають характеристики: ширину проїзної частини, кількість смуг, максимально допустиму швидкість, стан покриття тощо, а також вводять обмеження (дозволи/заборони на розвороти, ліві/праві повороти, односторонній рух і ін.).

Після формування геометрії мережі задають транспортні райони та можливі схеми організації руху (індивідуальний транспорт, громадський транспорт, вантажні перевезення тощо). На побудовану схему ВДМ накладають можливі траси ІТ і чинні маршрути ГТ, наносять зупиночні пункти та вводять розклад руху. Отже, модель мережі фактично відображає транспортну пропозицію міста.

Модель попиту складається з множини об'єктів попиту й описує транспортні потреби населення, використовуючи інтегровану в PTV VISUM класичну чотириетапну процедуру. Ключовими компонентами є матриці витрат (фіксують часові, грошові або інші витрати, пов'язані з переміщеннями

між транспортними зонами) та матриці кореспонденцій (відображають потребу в поїздках між зонами).

Мережна та попитова моделі слугують основою для побудови моделі впливів. Оскільки будь-який вплив спрямовано на учасників руху, у PTV VISUM можна сформулювати:

1. модель впливу на користувача (водії індивідуального транспорту, пасажирів громадського транспорту, пішоходів);
2. модель впливу на перевізника (транспортні підприємства та організації, що здійснюють перевезення);
3. модель впливу на довкілля (розрахунок шумового навантаження та викидів).

Модель користувача забезпечує вибір оптимального маршруту переміщення пасажирів, що є базою для побудови картограм транспортних навантажень на ділянках міської ВДМ. Ядром процедури моделювання переміщень виступають алгоритми пошуку маршрутів, які визначають найкращі шляхи між транспортними районами; у якості пошукових алгоритмів застосовують методи визначення найкоротчих/найшвидших шляхів (тощо), відповідно до заданих критеріїв.

Пошук маршрутів здійснюють за допомогою алгоритмів на кшталт найкоротшого шляху або підбору множини прийнятних шляхів (наприклад, Branch & Bound). Далі поїздки кожної кореспонденції між транспортними районами розподіляють за знайденими шляхами. У PTV VISUM поєднання цих двох етапів - пошуку та розподілу - реалізоване процедурою Перерозподілу. Для моделювання переміщень громадським транспортом у PTV VISUM доступні три варіанти цієї процедури. Якщо необхідно зіставити чинну маршрутну мережу (із точним розкладом) із планованою (де розклад ще не визначено), доцільно використовувати перерозподіл за інтервалами, оскільки він, як правило, не передбачає узгодження розкладів.

Отримані внаслідок перерозподілу навантаження на відрізках і поворотах стають вихідними даними для побудови моделей впливу на перевізників і довкілля.

Модель перевізника дає змогу оцінити економічну результативність і ефективність маршрутної мережі та розкладу руху через обчислення показників витрат (виробничих і фінансових) і очікуваних доходів, пов'язаних із платою пасажирів за проїзд.

Таким чином, моделі впливів забезпечують комплексне зіставлення варіантів організації руху і вибір оптимального рішення як з точки зору підвищення ефективності використання рухомого складу підприємств-перевізників, так і з урахуванням мінімізації негативного впливу на довкілля без втрати мобільності населення.

Необхідною передумовою підвищення ефективності управління громадським транспортом міста є створення такої системи керування, яка дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення на базі комплексних моделей об'єкта управління та розробленого на їх основі алгоритму організації міських автобусних перевезень.

Процес вироблення науково обґрунтованого рішення щодо коригування міської маршрутної мережі громадського транспорту починається з введення вихідних даних, на основі яких формують модель вулично-дорожньої мережі та матриці кореспонденцій. Для оцінки навантажень на відрізках мережі виконують комп'ютерний експеримент, що дає змогу виявити ділянки, які потребують оптимізації. Якщо модельні результати узгоджуються з підсумками вибіркового натурного обстеження, модель вважають адекватною і її можна використовувати для корекції мережі так, щоб нові маршрути не проходили через перевантажені відтинки. Запропонований варіант перевіряють на моделі для прогнозування можливих наслідків з урахуванням перерозподілу транспортних потоків. Рішення має відповідати накладеним обмеженням і транспортним потребам населення.

Налаштування параметрів маршрутної мережі виконують доти, доки розрахункові навантаження на ділянках не стануть меншими або рівними їх пропускній спроможності. Після цього здійснюють підбір оптимального за техніко-експлуатаційними характеристиками рухомого складу для кожного маршруту та формують розклад руху з урахуванням максимально допустимих інтервалів.

Алгоритм ухвалення рішень щодо підвищення ефективності організації міських автобусних перевезень подано на рисунку 2.6.

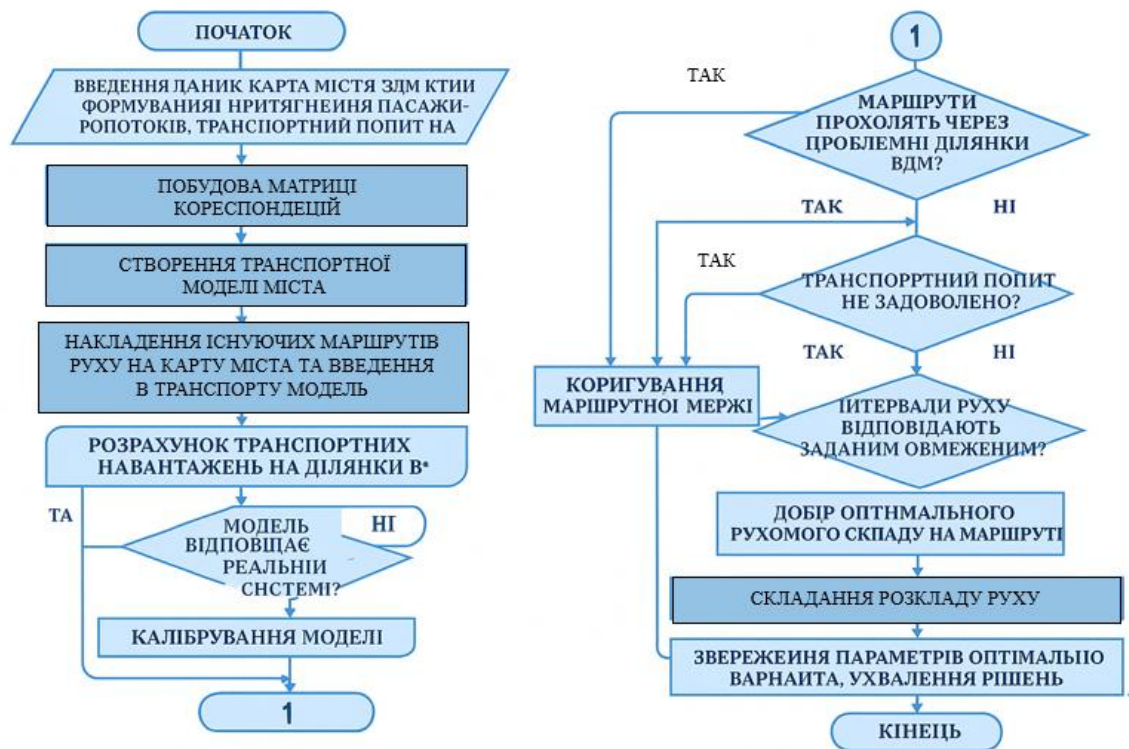


Рисунок 2.6 – Алгоритм організації міських автобусних перевезень

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДКОВИХ ВУЗЛІВ

3.1. Показники функціонування та якості обслуговування у міській маршрутній ПТС

Зростання рівня автомобілізації у містах безпосередньо підвищує інтенсивність руху на вулично-дорожній мережі (ВДМ) і, як наслідок, погіршує рівень транспортного обслуговування. Ключовим викликом стає перерозподіл транспортної рухливості між індивідуальним автотранспортом та масовим пасажирським транспортом (МПТ). На вибір МПТ істотно впливають (і) реальна комфортність поїздки та пересадки і (ii) просторово-часове покриття маршрутної мережі. За відсутності привабливих параметрів сервісу (зручність, передбачуваність, безпека, доступність) спостерігається стійке зміщення попиту на користь приватних авто, що підсилює затори та зовнішні витрати для міста.

Відповідно до сучасних підходів, інтегральна комфортність поїздки визначається виконанням ряду вимог, які піддаються кількісній перевірці під час обстежень та моніторингу:

- достатня площа на одного пасажирів у салоні (стоячі місця - критичний фактор у пікові години);
- санітарний стан і частота прибирання рухомого складу;
- мікроклімат у салоні (температура/вологість, ефективність вентиляції/кондиціонування);
- освітленість салону та посадкових майданчиків;
- акустичний комфорт (допустимі рівні шуму) та вібрація.

Практично придатними, стабільно відтворюваними показниками комфортності в експлуатаційній статистиці є коефіцієнти заповнення салону - статичний і динамічний.

Статичний коефіцієнт заповнення (на момент часу t):

$$k_{\text{stat}}(t) = \frac{N_{\text{pax}}(t)}{N_{\text{cap}}}, \quad (3.1)$$

де $N_{\text{pax}}(t)$ - кількість пасажирів у салоні в момент t , N_{cap} - місткість (пас./місця стоячи+сидячи згідно з техпаспортом та прийнятою нормою площі на стоячого пасажера).

Динамічний коефіцієнт заповнення (за інтервал спостереження ΔT):

$$k_{\text{dyn}} = \frac{\int_{\Delta T} N_{\text{pax}}(t) dt}{N_{\text{cap}} \cdot \Delta T}, \quad (3.2)$$

Він відбиває середнє навантаження салону за рейс/годину та краще корелює з відчутним рівнем сервісу в пікові періоди.

Для коректної інтерпретації комфортності доцільно фіксувати також ефективну площу на одного пасажера у зоні стояння:

$$A_{\text{eff}} = \frac{A_{\text{stand}}}{N_{\text{stand}}}, \quad (3.3)$$

де A_{stand} - доступна площа для стояння (м^2), N_{stand} - кількість пасажирів, що стоять. Методично A_{eff} калібрується за відеообстеженнями/лічильниками дверей та використовується як контрольний індикатор до k_{stat} і k_{dyn} .

Просторове покриття та структурна насиченість МПТ описуються двома базовими показниками.

1. Щільність маршрутної мережі:

$$D_m = \frac{L_m}{S_{urb}}, \left[\frac{\text{км}}{\text{км}^2}, \right. \quad (3.4)$$

де L_m - сумарна довжина маршрутів, S_{urb} - сельбищна площа міста. Показник застосовують для порівняння з альтернативними конфігураціями мережі та для оцінювання доступності в межах пішохідного радіуса посадки.

Маршрутний коефіцієнт насиченості ВДМ:

$$K_m = \frac{L_m}{L_{vdm}}, \quad (3.5)$$

де L_{vdm} - довжина вулично-дорожньої мережі, що фактично використовується для перевезень МПТ. Значення $K_m > 1$ вказує на мультипокриття окремих вулиць декількома маршрутами; занадто високі K_m можуть сигналізувати про дублювання та нераціональне використання ресурсу.

Зміна параметрів МПТ (структури маршрутів, інтервалів, типів рухомого складу, схеми пересадок тощо) неминуче трансформує систему показників, до яких належать:

1. Кількість транспортних районів (зональне розбиття для моделювання попиту);
2. Загальна кількість маршрутів у мережі;
3. Кількість пересувань (походжень-прибуттів) пасажирів за період;
4. Обсяг перевезень (пас./год; пас.-км/добу);
5. Коефіцієнт пересадності;
6. Транспортна робота:

$$W = \sum_{i \in \mathcal{R}} Q_i \cdot L_i, \quad (3.6)$$

де Q_i - пасажиропотік на маршруті i , L_i - довжина маршруту i ;

7. Середня дальність маршрутної поїздки:

$$\bar{l}_{\text{mar}} = \frac{\sum_i Q_i \cdot l_i}{\sum_i Q_i} \quad (3.7)$$

8. Середня дальність поїздки по мережі (з урахуванням пересадок);

9. Коефіцієнт заповнення салону по мережі (агрегація k_{dyn} за маршрутами та періодами);

10. Необхідна кількість пасажиромісць (за місткістю та інтервалами):

Розвиток мережі (зміна D_m , K_m), коригування інтервалів та типорозміру рухомого складу безпосередньо впливають на:

- час доступу і загальний час поїздки, що визначають конкурентоспроможність МПТ відносно приватного авто;
- коефіцієнт пересадності k_{tr} (структурні розв'язки можуть зменшити кількість пересадок або підвищити їх передбачуваність);
- коефіцієнти заповнення k_{stat} , k_{dyn} (баланс між частотою, місткістю та розподілом попиту);
- транспортну роботу W та випуск рухомого складу за піковими інтервалами;
- якість сервісу (мікроклімат, чистота, шум/вібрації), що опосередковано впливає на еластичність попиту.

3.2 Структура та функції транспортно-пересадкових вузлів у міських мережах

У подальшому під транспортно-пересадковим вузлом (ТПВ) розумітимемо сукупність елементів інфраструктури, що забезпечують організовані пересадки між видами/маршрутами МПТ, а також між міськими й позаміськими перевезеннями. У межах міста Рівне до ТПВ віднесено три ключові об'єкти, просторово розміщені в різних районах міста та формуючі «пересадковий каркас» мережі:

- Автовокзал Рівне (вул. Київська) - головний міжміський/приміський хаб;
- Автостанція «Чайка» (вул. Василя Червонія, район Льонокомбінату) - вузол приміського/внутрішньоміського сполучення північного сектора;
- Автостанція «Залізнична» - інтегрований вузол «залізниця ↔ приміські/міжміські автобуси - міський пасажирський транспорт».



Рисунок 3.1 - Автовокзал та автостанції в плані міста

Автовокзал експлуатує 22 посадкові платформи, що працюють на різноспрямованих маршрутах. Сумарний добовий випуск становить понад 1 000 відправлень; зафіксовано $\approx 1\,099$ рейсів/добу, з яких:

- 463 - у приміському сполученні ($\approx 42,1$ % добового випуску);
- 636 - у міжміському сполученні ($\approx 57,9$ %).

Пікові інтервали відправлень:

- Приміський сегмент. Ранкове вікно 07:00–08:00 - 39 відправлень ($\approx 8,4$ % добових приміських рейсів). Післяобіднє вікно 15:00–16:00 - 38 відправлень ($\approx 8,2$ %).

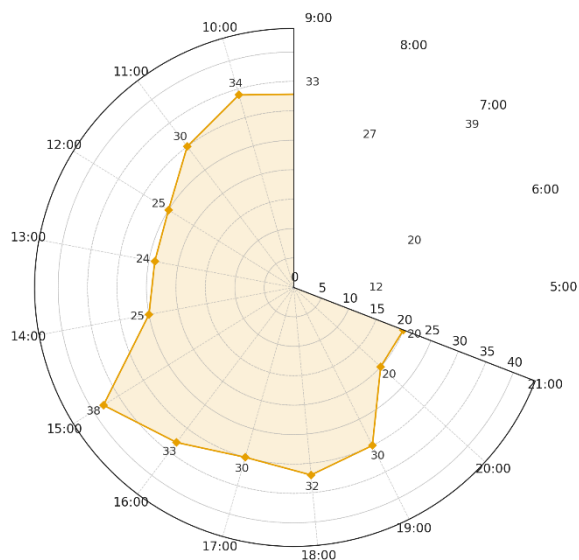
- Міжміський сегмент. Ранкове вікно 08:00–10:00 - 126 відправлень ($\approx 19,8$ % добових міжміських рейсів). Вечірнє вікно 16:00–19:00 - 171 відправлення ($\approx 26,9$ %).

Концентрація міжміських відправлень у вечірньому півпіку (≈ 27 %) вказує на підвищене навантаження платформ та під'їзних смуг у цей період, що вимагає пріоритизації регулювання підходів ТЗ, збільшення чергових посадкових позицій та посиленого пасажирського інформування. Для приміського сегмента короткі «піки» попиту 07:00–08:00 та 15:00–16:00 доцільно перекривати локальною зміною інтервалів і/або тимчасовою заміною типорозміру рухомого складу.

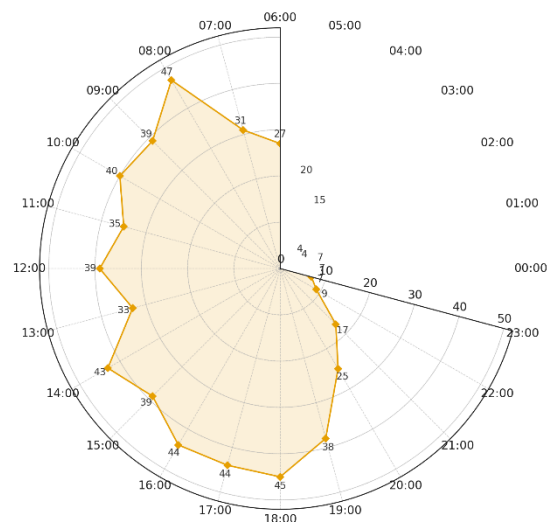
Таблиця 3.1

Добова структура відправлень з Автовокзалу

Сегмент	Відправлень/добу	Частка, %	Пікове вікно 1	Обсяг	Частка в сегменті	Пікове вікно 2	Обсяг	Частка в сегменті
Приміські	463	42,1	07:00 – 08:00	39	8,4	15:00 – 16:00	38	8,2
Міжміські	636	57,9	08:00 – 10:00	126	19,8	16:00 – 19:00	171	26,9
Разом	1 099	100	-	-	-	-	-	-



Приміське сполучення



Міжміське сполучення

Рисунок 3.2 - АС «Рівне»: добовий розподіл відправлень

АС «Чайка» виконує роль комбінованого транспортно-пересадкового вузла (ТПВ) північного сектора міста з обслуговуванням приміських, міжміських та міжнародних напрямів. В інфраструктурі - 9 платформ, касові вікна, зони очікування, навігаційні покажчики, під'їзні смуги та короткочасна стоянка. Просторове охоплення вузла формує радіус пішохідної доступності 300–600 м (5–10 хв ходу), у межах якого зосереджені основні зупинки міського МПТ для стиковок «підвіз ↔ відправлення».

За діючими розкладами з автостанції виконується 264 відправлення/добу, з них:

- 212 - у міжміському сполученні ($\approx 80,3\%$),
- 44 - у приміському ($\approx 16,7\%$),
- 8 - у міжнародному ($\approx 3,0\%$).

Переважаючий міжміський сегмент визначає як профіль пасажирських потоків (більша середня дальність поїздки, менша еластичність до інтервалів), так і технологічні вимоги до платформ: довші стоянки, більший багажообіг, потреба в чіткішій інформаційній підтримці та уніфікованій навігації.

Пікові інтервали.

- Для приміських напрямів зафіксовано два «піка» попиту: 07:00–09:00 - 8 відправлень і 16:00–19:00 - 11. Разом це 19 відправлень, що становить $\approx 43,2\%$ добового приміського випуску (19/44).

- Для міжміських напрямів основна концентрація припадає на 14:00–16:00 - 60 відправлень ($\approx 28,3\%$ від сегмента 212/добу).

Таким чином, приміські рейси мають більш виражену біпікову добову хвилю, тоді як міжміські - однопікову післяобідню концентрацію з тривалими «плечима» до і після піку.

Середня інтенсивність відправлень становить $\approx 29,3$ відправлення на платформу за добу (264/9). У вікні 14:00–16:00 через усі платформи проходить ≈ 30 відправлень/год (60 за 2 години), тобто $\approx 3,3$ відправлення/год на платформу. Це відповідає орієнтовному середньому циклу обслуговування ~ 18 хв/платформа (включно з подачею, вирівнюванням, посадкою/багажем і звільненням позиції). Для приміських піків (07:00–09:00; 16:00–19:00) сумарна інтенсивність нижча (≈ 4 і $\approx 3,7$ відпр./год відповідно через усі платформи), тож їх доцільно перекривати локальним ущільненням інтервалів і/або варіюванням місткості ТЗ, не змінюючи конфігурації платформ.

Для забезпечення гарантованих стиковок з міськими маршрутами у пікові хвилі рекомендовано застосовувати буфер надійності з цільовою імовірністю встигнути ($p=0,9$)–0,95 (особливо у вікні 14:00–16:00 для міжміських відправлень). Практично це досягається завдяки синхронізації підвізних міських маршрутів, виділенню пріоритетів на під'їздах до вузла та оперативному інформуванню пасажирів у реальному часі.

З огляду на пікові «хвилі» міжміських відправлень, у залі очікування та на відкритих майданчиках варто контролювати ефективну площу на одного пасажирів та динамічний коефіцієнт заповнення; для зниження пікових черг - передбачити зонування потоків за напрямками/платформами, дублювання табло з відліком до відправлення, зрозумілу навігацію до кас/перонів, а також організовані «коридори» до ТЗ великої місткості. Для міжнародних відправлень, попри відносно невелику частку, важливі зрозумілі мовні

дублювання та інформування про час проходження формальностей.

Доцільним є впровадження єдиного інформаційного шару: табло в залі та на перонах, мобільні push-сповіщення, API для провайдерів е-квитка та навігаційних застосунків. Це скорочує середній час очікування, підвищує прозорість для пасажирів і зменшує ризик пропуску рейсу в піку.

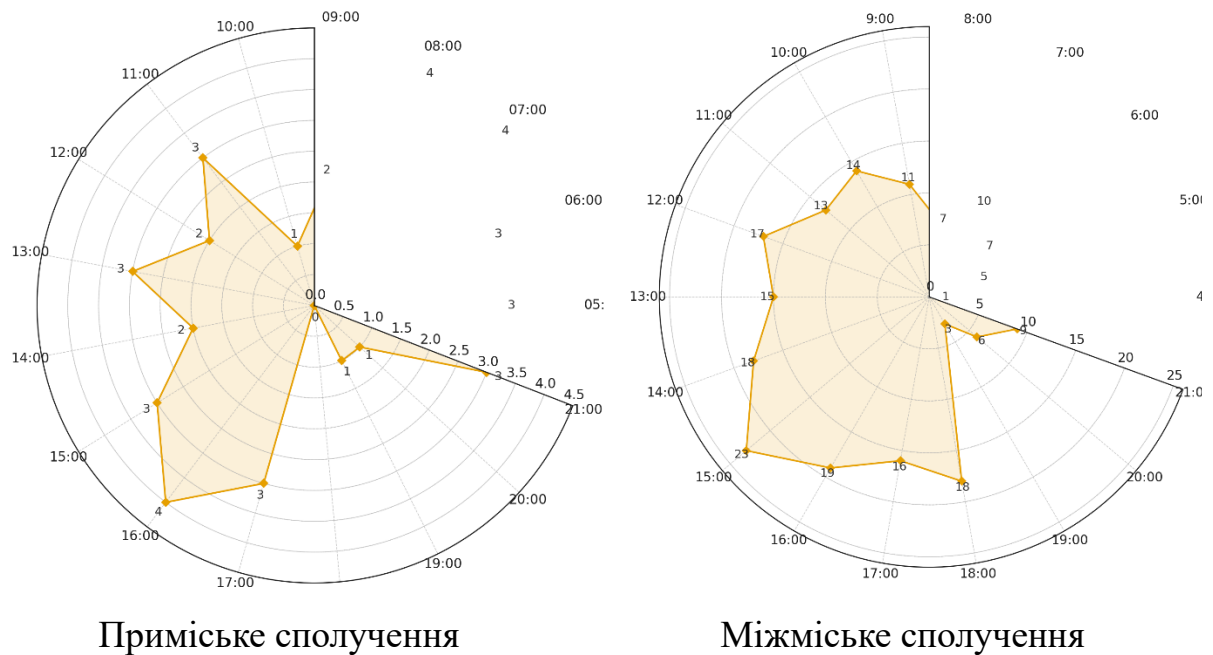


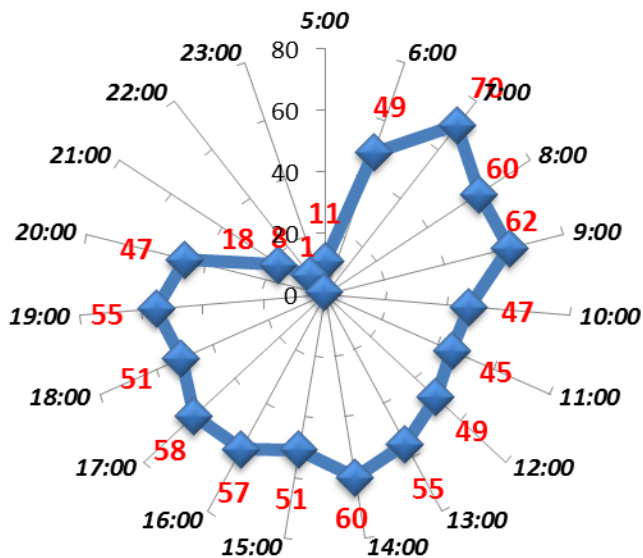
Рисунок 3.3 - АС «Чайка»: добовий розподіл відправлень

Залізничний вокзал розташований за адресою: Привокзальна площа, 1. За числом і характером взаємодіючих видів транспорту вузол класифікується як залізнично-автомобільний ТПВ, оскільки в його межах функціонує також автостанція «Залізнична», що забезпечує стиковки з приміськими та міжміськими автобусними маршрутами.

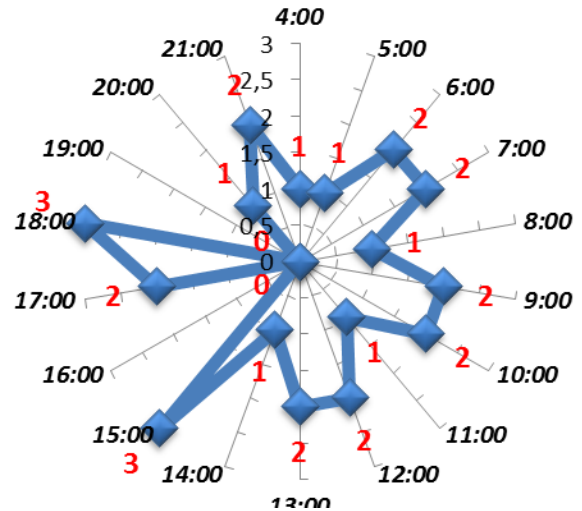
На автостанції виконуються відправлення у приміському та міжміському сполученнях (рис. 3.4).

- Приміські маршрути: Добовий обсяг відправлень - 854. Пікові години - 07:00–09:00, сумарно 192 відправлення ($\approx 22,5\%$ від добового приміського випуску; ≈ 96 відпр./год у піку).

- Міжміські маршрути: Добовий обсяг відправлень - 28. Зафіксовано два однакові пікові інтервали: 15:00–16:00 та 18:00–19:00, у кожному - 3 відправлення (разом 6 у піках; $\approx 21,4\%$ від добового міжміського випуску).



Приміське сполучення



Міжміське сполучення

Рисунок 2.4 - АС «Залізнична»: добовий розподіл відправлень

Пікове навантаження припадає на ранковий інтервал 07:00–09:00 і становить 192 відправлення. Загалом за добу на приміських маршрутах виконується 854 відправлення.

За даними діаграми, для міжміського сполучення виокремлюються два рівнозначні пікові вікна - 15:00–16:00 та 18:00–19:00; у кожному з них фіксується по 3 відправлення. Загальна добова кількість міжміських рейсів дорівнює 28.

3.3. Показники роботи міської пасажирської транспортної системи у взаємодії з транспортно-пересадковими вузлами

Для аналізу було відібрано зупинки міського громадського транспорту, розташовані в зонах впливу транспортно-пересадкових вузлів (ТПВ). Такі зупинки розглядаються як пасажироутворювальні пункти, оскільки саме тут формуються та концентруються основні потоки посадки/висадки, а також здійснюються пересадки між напрямками.

Емпіричні вимірювання виконувалися за методикою пасажирообміну з поінтервальним урахуванням кожної події посадки/висадки впродовж доби. Базовим кроком агрегації обрано 15-хвилинні інтервали, що забезпечує достатню роздільну здатність для виявлення «голок» попиту та порівняння пікових і міжпікових періодів.

З огляду на характер добового профілю попиту, обідні пасажирообміни мають суттєво менші значення (орієнтовно у 3–4 рази нижчі), тому вони розглядалися переважно як контрольний фон для порівняння з ранковими та вечірніми піками. Для міста Рівне сформовано репрезентативну вибірку по зупинках із загальною кількістю понад 35 000 спостережень, що дає змогу проводити як точковий, так і узагальнений аналіз за групами локацій.

Натурні обстеження здійснювалися у трьох часових вікнах, орієнтованих на ключові хвилі попиту:

- ранкове: 07:30–09:30;
- обіднє: 12:00–14:00;
- вечірнє: 17:00–19:00.

Початок фіксації подій - 07:30, завершення - 19:00. Така сітка дозволяє зіставляти пікові інтервали однакової тривалості (по 2 години) та мінімізує сезонно-добові викривлення.

. За вихідними матеріалами обіднє вікно могло розглядатися як 12:00–14:30. Для коректної порівнюваності з ранковим і вечірнім піками у звіті використано нормовану тривалість 12:00–14:00 (2 години). За потреби можливе відновлення саме інтервалу 12:00–14:30 з перерахунком показників.

У кожному вікні розраховувалися ключові індикатори: пасажирообмін на зупинці за 15-хв. інтервали; коефіцієнт піковості (відношення максимального 15-хв. значення до середнього), співвідношення посадок/висадок, а також орієнтовні проксі-показники часу простою (через інтенсивність посадки). Отримані результати підтверджують, що ранковий та вечірній періоди стабільно демонструють істотно вищі значення пасажирообміну порівняно з обіднім інтервалом (у середньому в 3–4 рази), що наочно ілюструється на рисунку 3.5.

Запропонована схема спостережень і агрегації є достатньо чутливою для виявлення локальних «вузьких місць» у зоні ТПВ, дозволяє коректно порівнювати локації між собою та слугує надійною основою для подальшого моделювання випуску рухомого складу, синхронізації пересадок і планування інфраструктурних заходів.

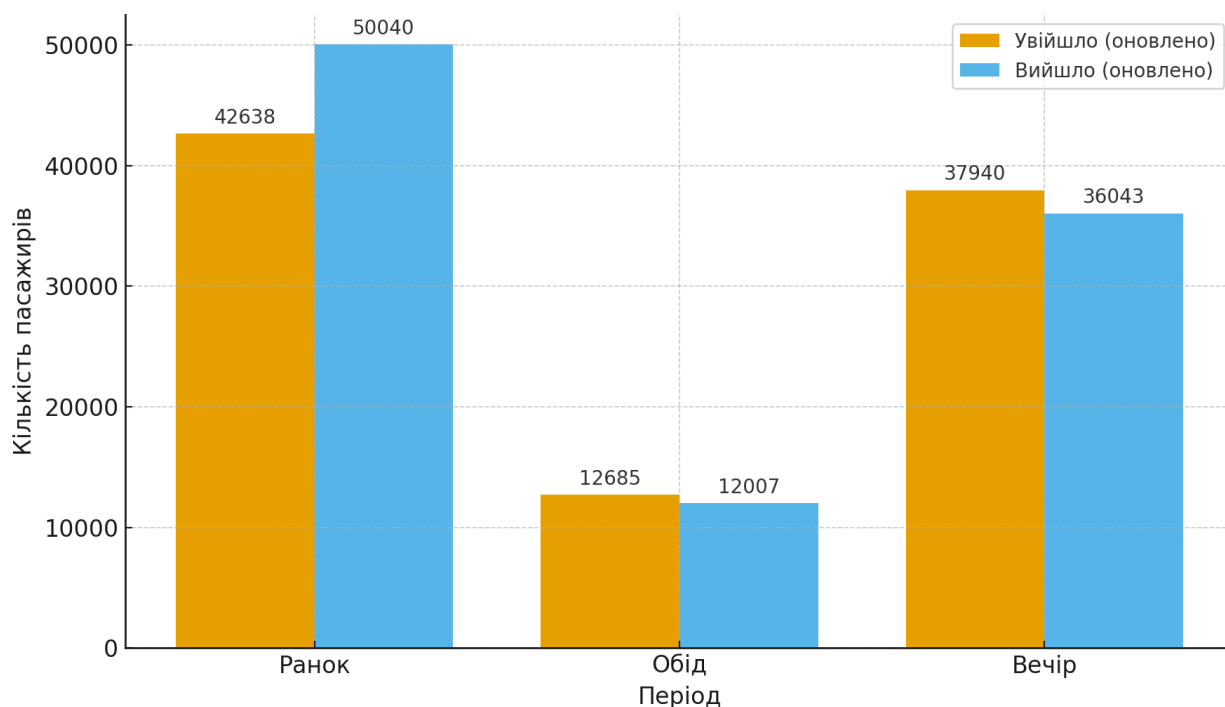


Рисунок 3.5 – Пасажирообмін на зупинках за період спостереження (посадки/висадки)

Упродовж ранкового періоду (07:30–09:30) інтенсивність посадки пасажирів на зупинці демонструє близьку до рівномірної динаміку за 15-хвилинними інтервалами спостереження (див. рис. 2.6).

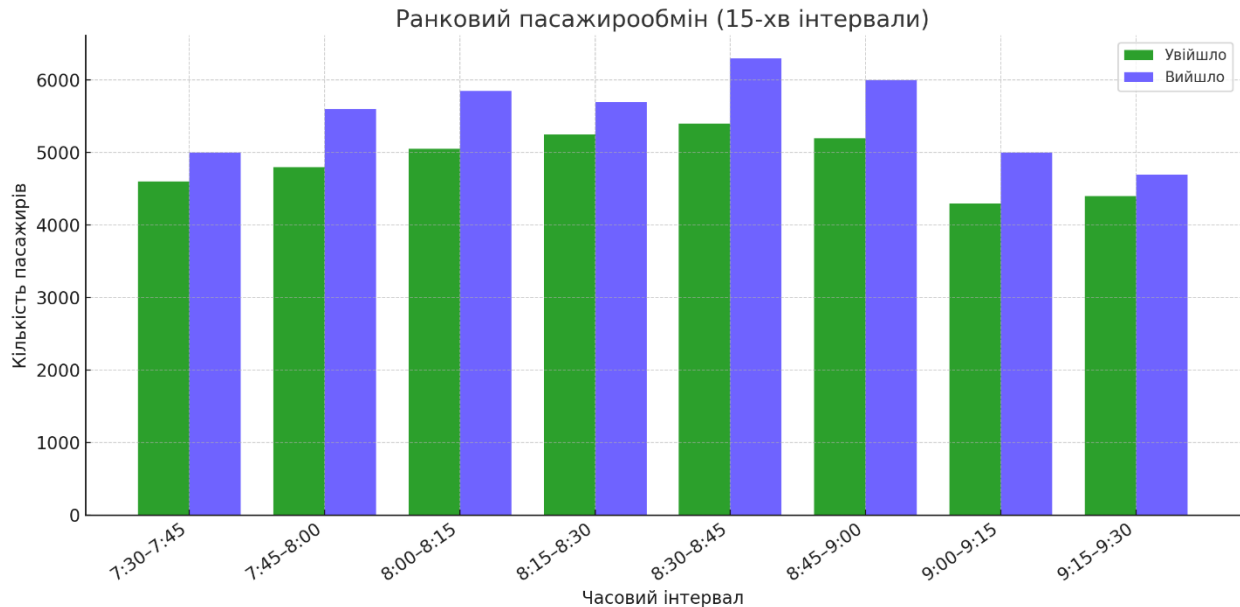


Рисунок 3.6 – Ранковий пасажирообмін на зупинках (посадки та висадки)

У обідній часовий інтервал фіксується істотна варіабельність пасажирообміну між суміжними 15-хвилинними інтервалами.

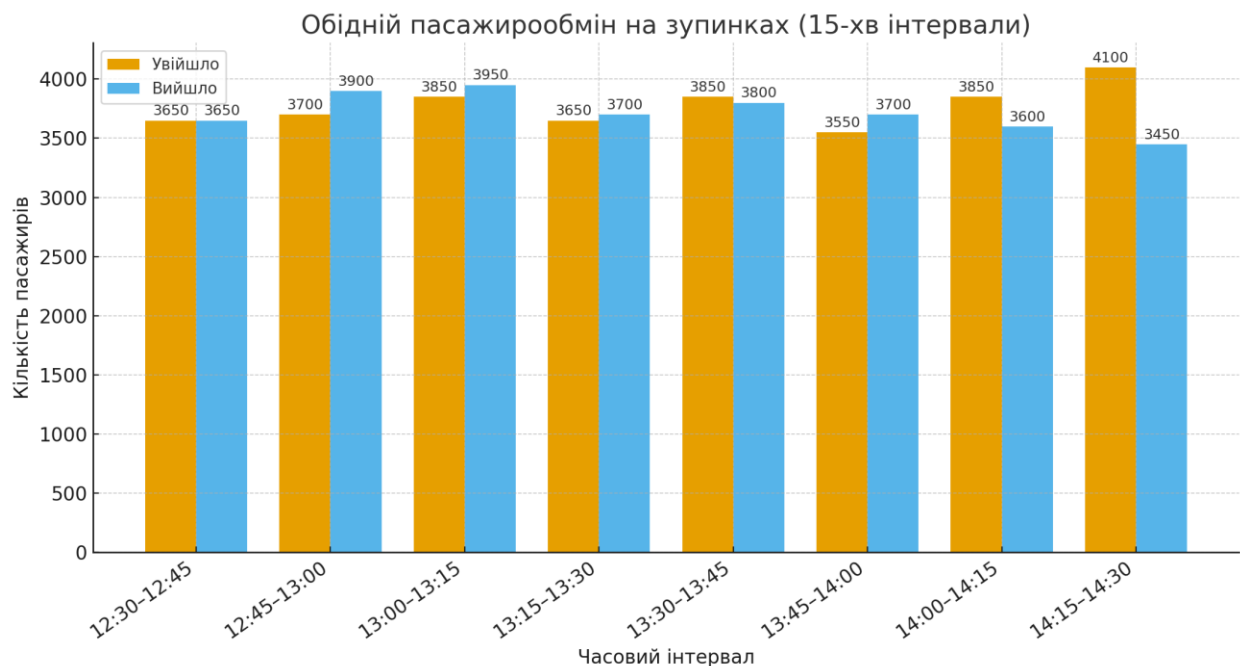


Рисунок 3.7 – Кількість пасажирів що ввійшли-вийшли на зупинках за час спостереження в обідній період

Динаміку пасажирообміну у вечірній часовий інтервал (17:00–19:00) наведено на рисунку 3.8.

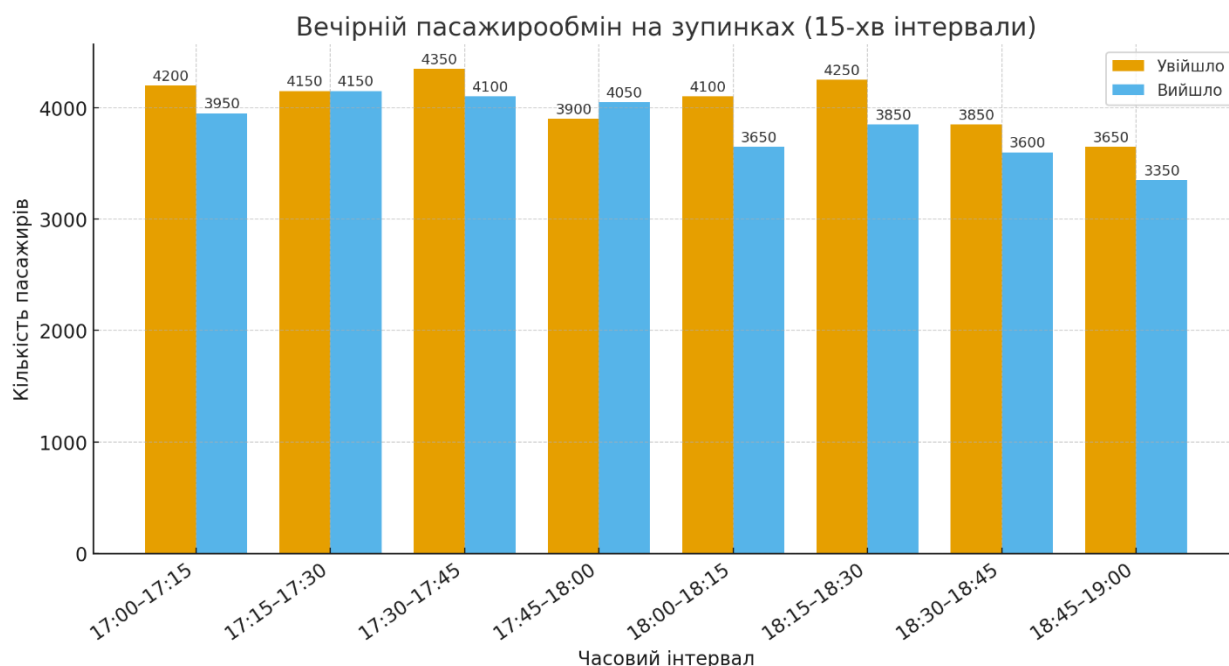


Рисунок 3.8 – Динаміка вечірнього пасажирообміну на зупинках (15-хв інтервали)

Зупинка «Автовокзал» формує один із найбільших вузлів пасажироутворення в міській мережі. Високий пасажирообмін зумовлений концентрацією приїжджих пасажирів із міжміських та приміських напрямів, які далі розподіляються по міських маршрутах, використовуючи «Автовокзал» як первинну точку пересадки. Це створює стале ядро попиту та визначає роль зупинки як ключового підсилювача міської мобільності.

Відповідно до рисунка 3.9, ранковий період характеризується порівняно рівномірним підходом рухомого складу: на зупинку прибуває 23–28 автобусів та 8–10 тролейбусів за вибраний інтервал спостереження. Така регулярність свідчить про узгодженість графіків міських ліній із хвилями прибуття міжміських/приміських рейсів, що сприяє зменшенню часу очікування пересадки та рівномірнішому завантаженню платформ.



Рисунок 3.9 – Ранкові прибуття на зупинку «Автовокзал» (автобуси та тролейбуси)

Вечірній період (див. рис. 3.10) для зупинки «Автовокзал» вирізняється вищою нерівномірністю підходів рухомого складу порівняно з ранком: кількість прибуттів автобусів коливається від 18 до 29 одиниць за інтервал спостереження, тролейбусів - від 4 до 9. Така варіабельність свідчить про формування «пакетів» прибуттів і пауз між ними, що потенційно збільшує коливання завантаження платформи та довжину черг на посадку.

Окремо зафіксовано, що інтенсивність посадки пасажирів у ранкову годину пік (08:30–09:30) демонструє значну нерівномірність між суміжними 15-хвилинними інтервалами. Це вказує на наявність короточасних локальних «сплесків» попиту, які не повністю згладжуються чинним випуском.

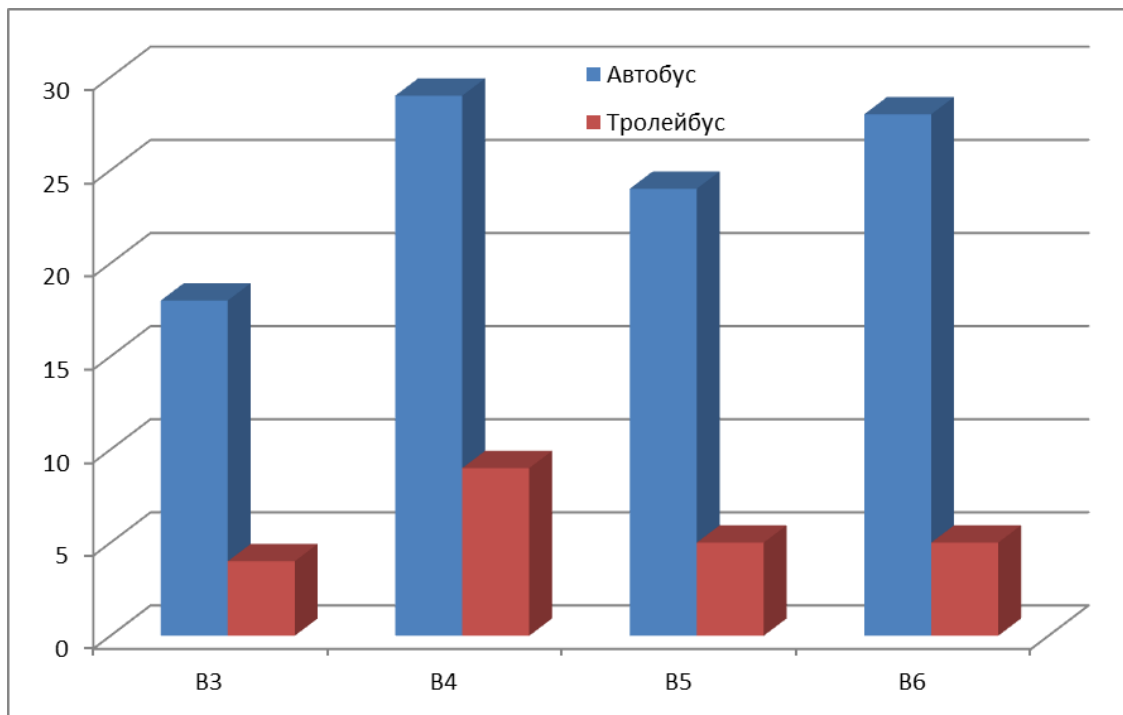


Рисунок 3.10 – Динаміка прибуття транспортних засобів на зупинку
«Автовокзал» у вечірній час

За підсумками спостережень сумарна кількість пасажирів, що виконали посадку до автобусів, дорівнює 914, тоді як до тролейбусів - 1088. Крім того, тролейбусні перевезення демонструють нижчу варіабельність між 15-хвилинними інтервалами (вища рівномірність потоку), що підтверджує їх більш стабільний характер у межах досліджуваного періоду (рис. 3.11)

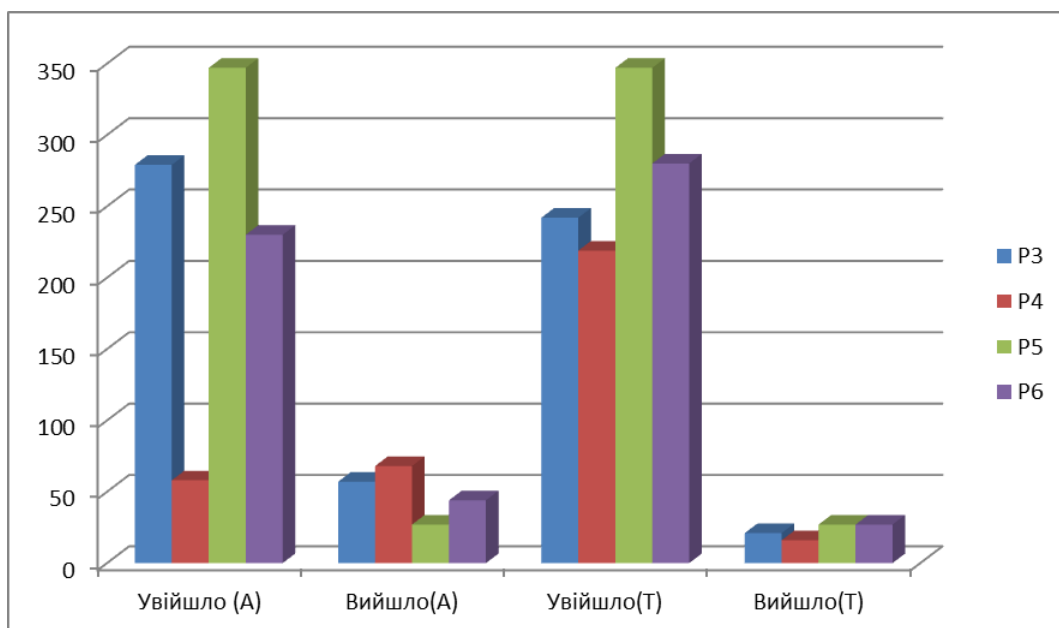


Рисунок 3.11 – Ранковий пасажирообмін (08:30–09:30) на зупинці
«Автовокзал» за видами міського транспорту

Профіль вечірнього навантаження (17:30–18:30) зберігає структурну подібність до ранкового інтервалу, проте загальна інтенсивність нижча: зафіксовано 687 посадок у автобуси та 388 - у тролейбуси (рис. 3.12). Відносно ранку сукупний вечірній пасажирообмін на платформі «Автовокзал» зменшується орієнтовно удвічі, що свідчить про часткове розосередження потоків у часі та/або інші патерни повернення пасажирів (зміна місця призначення, альтернативні види транспорту, піша доступність). Практично це дає змогу оптимізувати випуск у вечірньому вікні без ризику формування надмірних черг, зберігаючи водночас гарантовані стиковки та стабільний рівень сервісу

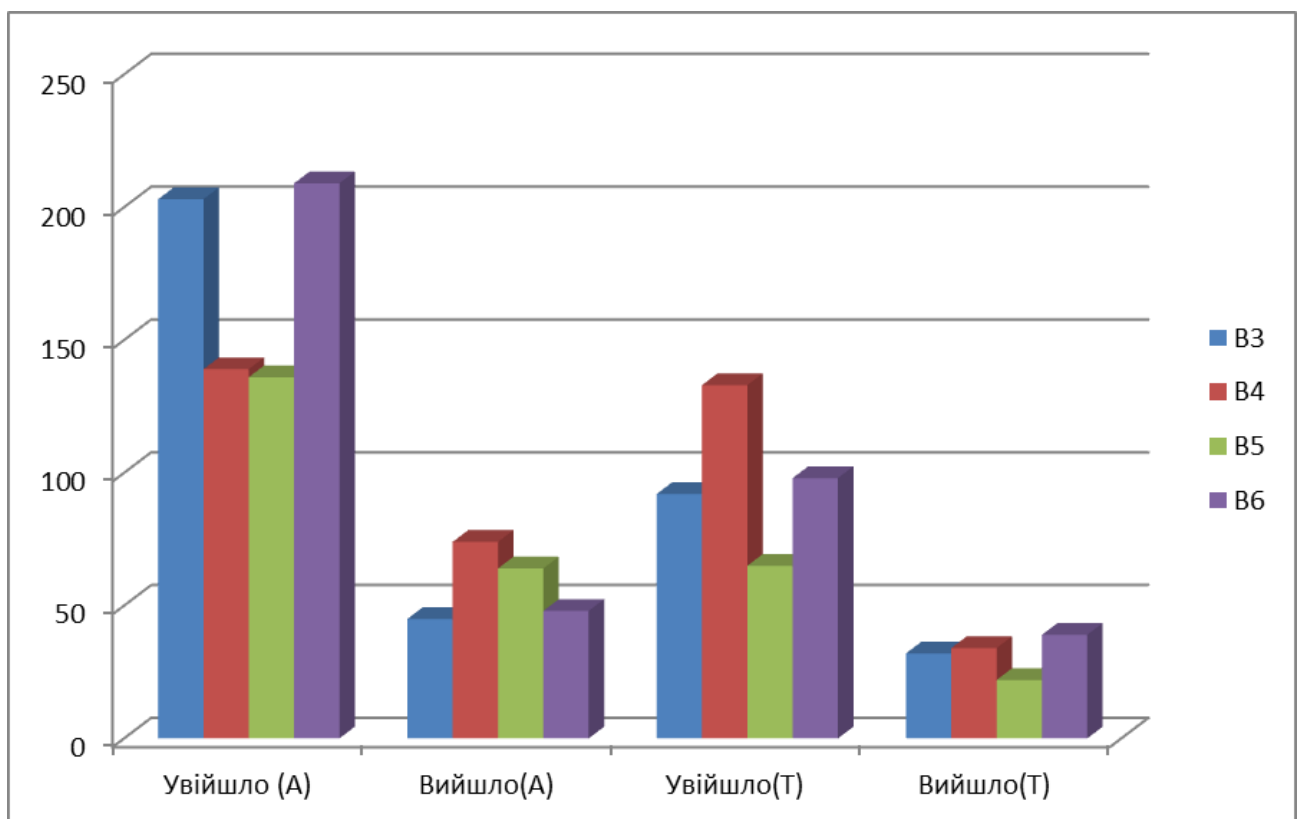


Рисунок 3.12 – Зупинка «Автовокзал»: пасажирообмін за видами транспорту у вечірньому інтервалі 17:30–18:30

Використовуючи статистику натурних обстежень пасажирообміну по зупинках, можна побудувати аналітичні залежності зміни інтенсивності

посадок/висадок за часовими параметрами доби з кроком 15 хвилин. Практично доцільно використовувати квадратичні регресійні моделі для окремих періодів доби (ранок, обід, вечір), що відтворюють характерні «параболічні» профілі пікових хвиль.

У загальному вигляді для періоду p (ранок/обід/вечір) модель можна подати як

$$y_p(t) = a_p t^2 + b_p t + c_p, \quad (3.8)$$

де $y_p(t)$ - пасажирообмін (посадки/висадки) у 15-хв інтервалі, t - номер інтервалу часу всередині періоду, a_p, b_p, c_p - параметри, оцінені за даними спостережень (метод найменших квадратів). За потреби розглядають окремі моделі для посадок і висадок.

Графічні результати калібрування цих залежностей для відповідних періодів доби наведено на рисунках 3.13–3.15.

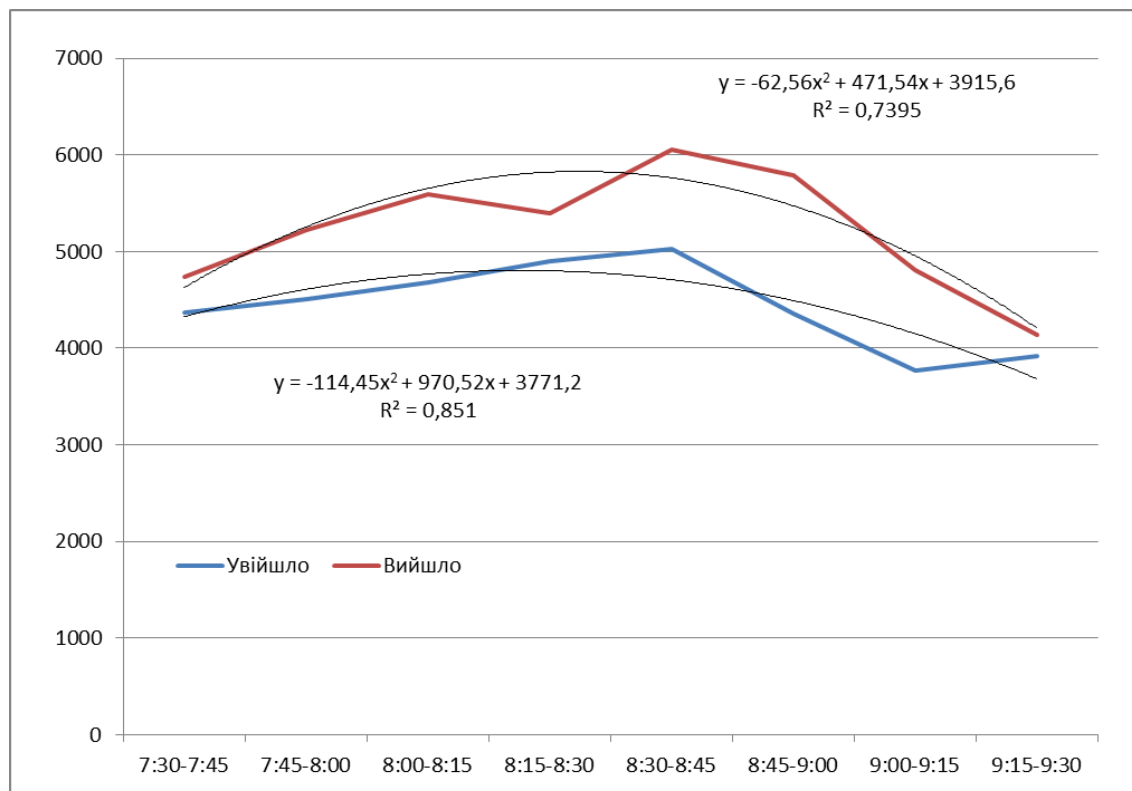


Рисунок 3.13 – Ранкові залежності пасажирських посадок та висадок на зупинках

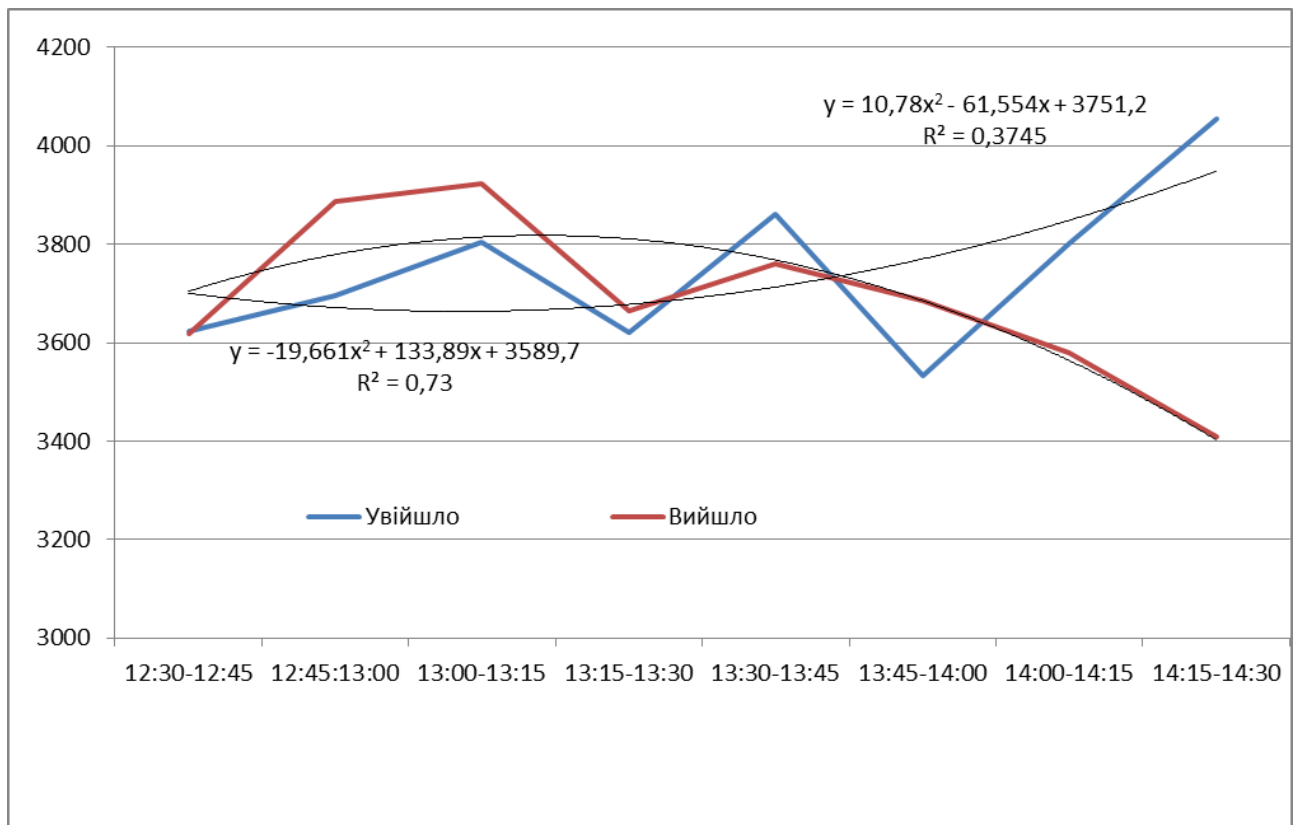


Рисунок 3.14 – Аналітичні залежності пасажирообміну на зупинках (обідній період)

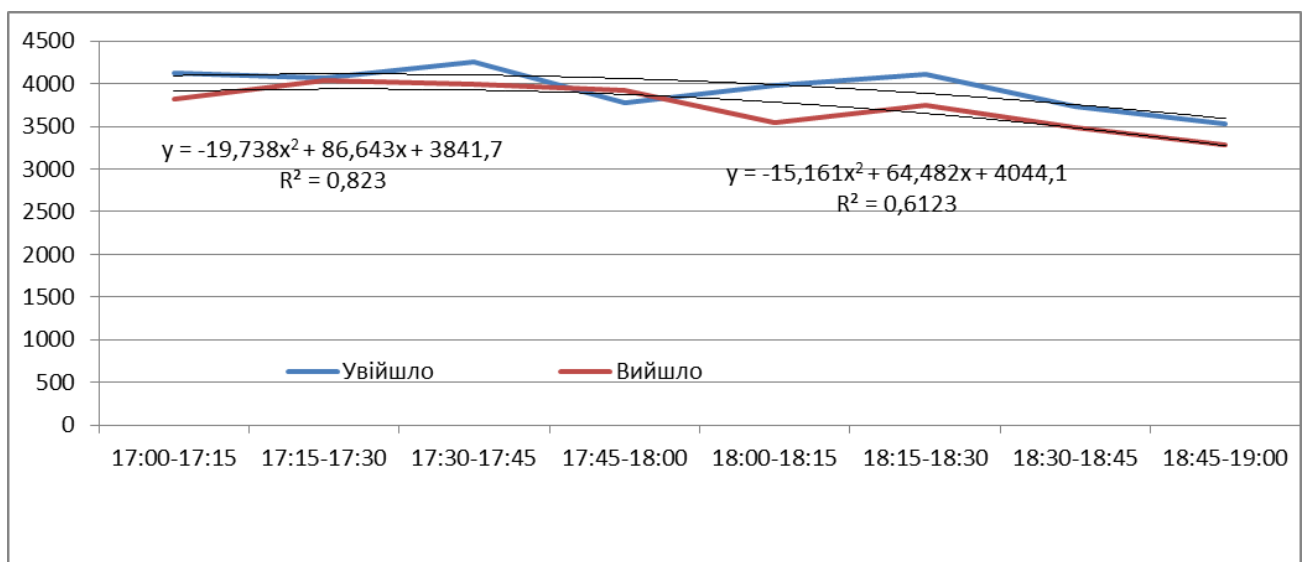


Рисунок 2.15 – Аналітичні залежності пасажирообміну на зупинках (вечірній період)

3.4 Організаційно-технологічні рішення для ефективної взаємодії МПТС у ТПВ

З метою обґрунтування вибору типів рухомого складу було визначено середньодобові пасажиропотоки для трьох транспортно-пересадкових вузлів (ТПВ) з окремим виділенням ранкових та вечірніх годин пік. Паралельно проаналізовано транспортну мережу міста та провізну здатність міського пасажирського транспорту як упродовж доби, так і у пікові інтервали.

За результатами обстежень, через Автовокзал Рівне протягом доби прибуває 32 148 пасажирів; із них 6 994 - у ранкові години пік, тоді як у вечірній пік з міста від'їжджають 3 692 пасажирів. Автостанція «Чайка» забезпечує 6 408 пасажирів за добу, з яких 880 припадає на ранок і 1 262 - на вечір. Найбільший пасажирообіг фіксується у комбінованому ТПВ «Залізничний вокзал + АС «Залізнична»»: середньодобово 72 200 пасажирів, із них 17 086 - у ранковий пік та 10 890 - у вечірній.

Оцінка провізної здатності міського громадського транспорту показала таке. У районі Автовокзалу добовий потенціал становить 77 971 пасажир, з можливістю перевезення 19 523 осіб уранці та 13 861 увечері, що загалом відповідає наявному попиту. У районі АС «Чайка» добова провізна здатність сягає 81 871 пасажир (з них 16 364 - уранці та 11 464 - увечері), що також забезпечує нормативний рівень обслуговування. Водночас у зоні залізничного вокзалу спостерігається дефіцит: добова провізна здатність міського транспорту дорівнює 53 604 пасажирам (із них 12 834 - у ранковий пік та 8 573 - у вечірній), що менше потреби на 18 596 пасажирів за добу; зокрема, нестача у піках становить 4 252 пасажирів вранці та 2 317 - увечері.

Для усунення дисбалансу прийнято рішення про цільову зміну типів рухомого складу саме на маршрутах, що зв'язують ТПВ - найбільші центри формування попиту. До пріоритетних віднесено маршрут № 56 (АС «Чайка» -

Залізничний вокзал) та маршрут № 64 (Залізничний вокзал - вул. Рівненська), де заміна/підсилення рухомого складу дає змогу оперативно підвищити провізну здатність у критичних інтервалах та зменшити дефіцит перевезень у вузлових точках.

Таблиця 3.2

Опис запропонованих пасажирських маршрутів

Маршрут № 56 (Автостанція "Чайка" - Залізничний вокзал)	
Час роботи маршруту	6:40-22:32
Інтервал руху	8 хв.
Протяжність маршруту	6.6 км.
Кількість рейсів	108
Маршрут № 64 (Залізничний вокзал - вул. Рівненська)	
Час роботи маршруту	6:50-23:40
Інтервал руху	5 хв.
Протяжність маршруту	8 км.
Кількість рейсів	187

Для двох ключових сполучень, що забезпечують підвіз/розвіз у зоні пересадкового вузла «Залізничний вокзал», визначено середню місткість автобусів і добові обсяги перевезень до заміни рухомого складу.

Середня пасажиромісткість (до заміни):

- Маршрут №56: $q_{\text{сер}} = 37 \text{ пас.}$
- Маршрут №64: $q_{\text{сер}} = 43 \text{ пас.}$

Добовий пасажиропотік (до заміни):

$$Q_{\text{доб, 56}} = 37 \cdot 108 = 3996 \text{ пас./доб, } Q_{\text{доб, 64}} = 43 \cdot 187 = 8041 \text{ пас./доб.}$$

Для підвищення провізної здатності без зміни чинних графіків обрано цільову заміну автобусів на тип «Богдан А601», який забезпечує вищу місткість та кращі умови перевезення в міських режимах.

Середня пасажиромісткість (після заміни):

- Маршрут №56: $q_{\text{сер}}^* = 99 \text{ пас.}$
- Маршрут №64: $q_{\text{сер}}^* = 99 \text{ пас.}$

Добовий пасажиропотік (після заміни):

$$Q_{\text{доб}, 56}^* = 99 \cdot 108 = 10692 \text{ пас./доб}, Q_{\text{доб}, 64}^* = 99 \cdot 187 = 18513 \text{ пас./доб}.$$

Приріст за рахунок заміни:

$$\Delta Q_{56} = 10692 - 3996 = 6696, \Delta Q_{64} = 18513 - 8041 = 10472, \Delta Q_{\text{разом}} = 17168 \text{ пас./доб}.$$

З урахуванням модернізації на маршрутах №56 та №64, сукупний добовий пасажирооборот міського пасажирського транспорту, що обслуговує район вокзалу, становить:

$$Q_{\text{доб, заг}} = 2530 + 4032 + 3025 + 16401 + 2080 + 880 + 2750 + 10692 + 18513 + 4320 + 14204 = 79427 \text{ пас./доб}.$$

Структура за видами:

Маршрутні таксі:

$$Q_{\text{доб, МТ}} = 2530 + 4032 + 3025 + 16401 + 2080 + 880 + 2750 + 10692 + 18513 + 4320 = 65223 \text{ пас./доб}.$$

Тролейбуси: $Q_{\text{доб, трол}} = 14204 \text{ пас./доб}.$

Перехід на автобуси більшої місткості забезпечив приріст перевезень близько 17,2 тис. пас./доб сукупно на двох маршрутах, не вимагаючи коригування розкладів. Досягнуте значення 79 427 пас./доб є прийнятним для стабільного сервісу в зоні пересадкового вузла «Залізничний вокзал». Достатньо замінити 17 одиниць за схемою «1:1» (стара → нова), щоб забезпечити потрібну провізну здатність на сполученнях, що інтегрують вокзал з іншими ТПВ.

Більшу частину нової місткості доцільно прив'язати до пікових інтервалів; надалі - впровадити моніторинг завантаження (дані е-квитка/лічильників) для тонкого налаштування випуску.

Таким чином, адресна заміна рухомого складу на маршрутах №56 та №64 дозволяє швидко й економно ліквідувати вузькі місця, підвищуючи і провізну здатність, і якість обслуговування пасажирів у критичному для міста вузлі.

Для запровадження швидкісного (експресного) сполучення має виконуватися баланс часу: додаткові витрати пасажира на доступ/очікування/пересадку при користуванні експресом мають не перевищувати виграш у часі від більшої швидкості на ділянці руху. Інакше кажучи, сумарна економія на лінійному перегоні повинна компенсувати (і бажано перевищувати) усі супровідні часові втрати. Це можна описати аналітичною умовою (3.9):

$$\underbrace{\left(\frac{l_{c,зв}}{V_{c,зв}} - \frac{l_{c,е}}{V_{c,е}} \right)}_{\text{економія часу в русі}} \geq \underbrace{\Delta t_{\text{дод}}}_{\text{доступ/очікування/пересадка для експресу}} \quad (3.9)$$

де $t_{\text{рух,е}}$, $t_{\text{рух,зв}}$ - часи перебування в русі в експресному та звичайному режимах (хв);

$V_{c,е}$, $V_{c,зв}$ - швидкості сполучення (км/год) у швидкісному та звичайному режимах;

$l_{c,е}$, $l_{c,зв}$ - середні довжини поїздок пасажирів у відповідних режимах (км).
За відсутності змін у довжині поїздки ($l_{c,е} \approx l_{c,зв} = l$) умова спрощується до $l (1/V_{c,зв} - 1/V_{c,е}) \geq \Delta t_{\text{дод}}$.

Необхідна кількість автобусів на маршруті при експресній організації руху визначається через час обороту та інтервал прибуття (3.10):

$$N_e = \lceil \frac{T_{об,е}}{I_e} \rceil, \quad (3.10)$$

де $T_{об,е}$ - час обороту автобуса в експресному режимі (хв);

I_e - встановлений інтервал руху експрес-рейсів (хв).

З практичних міркувань нижня межа інтервалу експресів не має погіршувати узгодженість із графіками звичайних рейсів та підвізних ліній. Втім, у цій роботі експресні рейси розглядаються як альтернатива звичайним між найбільшими пасажироутворювальними зонами, тож чинні інтервали звичайного руху не є жорстким обмеженням для I_e .

Ключове завдання - підібрати інтервали так, щоби забезпечити потрібну пропускну спроможність у години пік. Для цього використовуємо співвідношення попиту та місткості (3.11):

$$I = \frac{q_{сер} \cdot k_u}{Q}, I_e = \frac{q_{сер,е} \cdot k_{u,е}}{Q_e}, \quad (3.11)$$

де I - інтервал у звичайному режимі (хв), I_e - інтервал експресів (хв);

$q_{сер}$, $q_{сер,е}$ - середня місткість одиниці рухомого складу у відповідних режимах (пас.);

k_u , $k_{u,е}$ - коефіцієнти використання місткості (0–1);

Q , Q_e - відповідно максимальний годинний пасажиропотік у звичайному та частка потоку, яку планується обслуговувати експресами (пас./год). За потреби можна покласти $Q_e = \alpha Q_{max}$ (де $\alpha \in (0; 1]$ - частка, яку перебирають на себе експреси у піку).

Час обороту на маршруті (в одному з напрямів - експресному або звичайному) обчислюється з урахуванням руху, зупинок і відстою (3.12):

$$T_{об} = t_{рух} + n \cdot t_{зуп,е} + t_{відст}, \quad (3.12)$$

де $t_{\text{рух}}$ - сумарний час у русі «туди–назад» (год);

$t_{\text{зуп,е}}$ - середній простій на кожній проміжній зупинці в експресному режимі (год);

n - кількість проміжних зупинок, що обслуговуються експресом;

$t_{\text{відст}}$ - технологічний відстій на кінцевих (год).

Скорочення переліку зупинок (зменшення n) прямо знижує $T_{\text{об}}$, підвищує $V_{\text{с,е}}$ та розширює пропускну спроможність при фіксованому випуску.

На швидкість сполучення в експресному режимі найбільше впливають: кількість проміжних зупинок n , середній простій на них $t_{\text{зуп,е}}$, пріоритетність на перехрестях/виділені смуги.

У нашому випадку основними генераторами попиту вибрано вокзальні комплекси та центральну частину Рівного. Саме між цими полюсами доцільно формувати «хребет» експресного обслуговування з мінімально необхідним переліком зупинок, аби виконати аналітичну умову і отримати відчутну економію часу для пасажирів.

Для стійкої реалізації варто додатково перевірити: буфер надійності пересадки (щоб $\Delta t_{\text{дод}}$ не «з'їдала» виграш часу), а також варіанти розподілу попиту $(Q_e, Q - Q_e)$ між експресом і звичайними рейсами у ранковий та вечірній піки.

Зведено, експресна організація руху має сенс тоді, коли реально досягне підвищення $V_{\text{с,е}}$ (за рахунок скорочення n , пріоритетів, оптимізації простоїв) перекидає додаткові часові витрати пасажира на доступ/очікування, а підібрані I_e та $T_{\text{обе}}$ забезпечують необхідну пропускну спроможність у пікові інтервали.

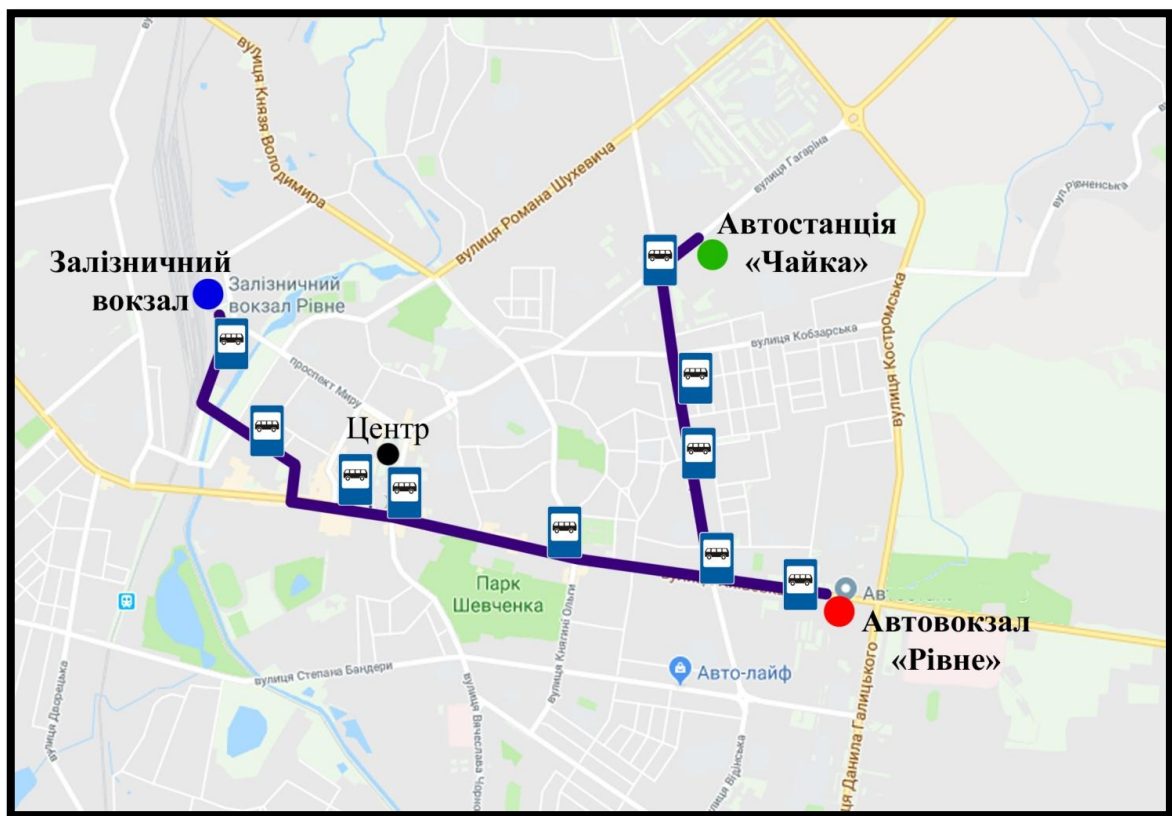


Рисунок 3.17 – Мережа маршрутних зв'язків між пересадковими вузлами

Таблиця 3.3

Комплекс показників автобусного руху в стандартному режимі

Показники Напрямок сполучення	Довжина маршруту км	Тривалість обороту, хв	Експлуатац ійна швидкість, км / год.	Проміжні зупинки, од.	Простій на проміжній зупинці, хв.
Автовокзал – Зал. вокзал	4	38	23	5	0,75
Автовокзал – АС «Чайка»	2,5	28	23	3	0,75
Зал. вокзал – АС «Чайка»	5	46	23	7	0,75

Практика експлуатації та результати розрахунків свідчать: переважна частка пасажирів потребує швидкого, прямого (безпересадкового) переміщення між ключовими транспортними районами. Таку потребу найкраще задовольняє експресне сполучення між цими пунктами.

Для реалізації цього підходу доцільно запустити нові експрес-маршрути, які напряду з'єднають центральну частину міста з вокзальними комплексами. Базовий принцип організації полягає у цільовому скороченні переліку проміжних зупинок: за рахунок мінімізації кількості зупинок зменшується сумарний час у дорозі, підвищується швидкість сполучення та скорочується середній час поїздки для кінцевого користувача.

Впровадження експресних ліній передбачає раціональний добір зупиночних пунктів. Пропонується застосувати описаний вище оптимізаційний підхід: у маршрутній схемі зберігаються лише вузлові зупинки з найбільшими пасажиропотоками, які послідовно об'єднуються у скорочені за кількістю зупинок маршрути (див. рис. 3.18). Такий відбір забезпечує концентрацію обслуговування на головних генераторах попиту та максимізує часовий виграш у порівнянні зі звичайним режимом руху.

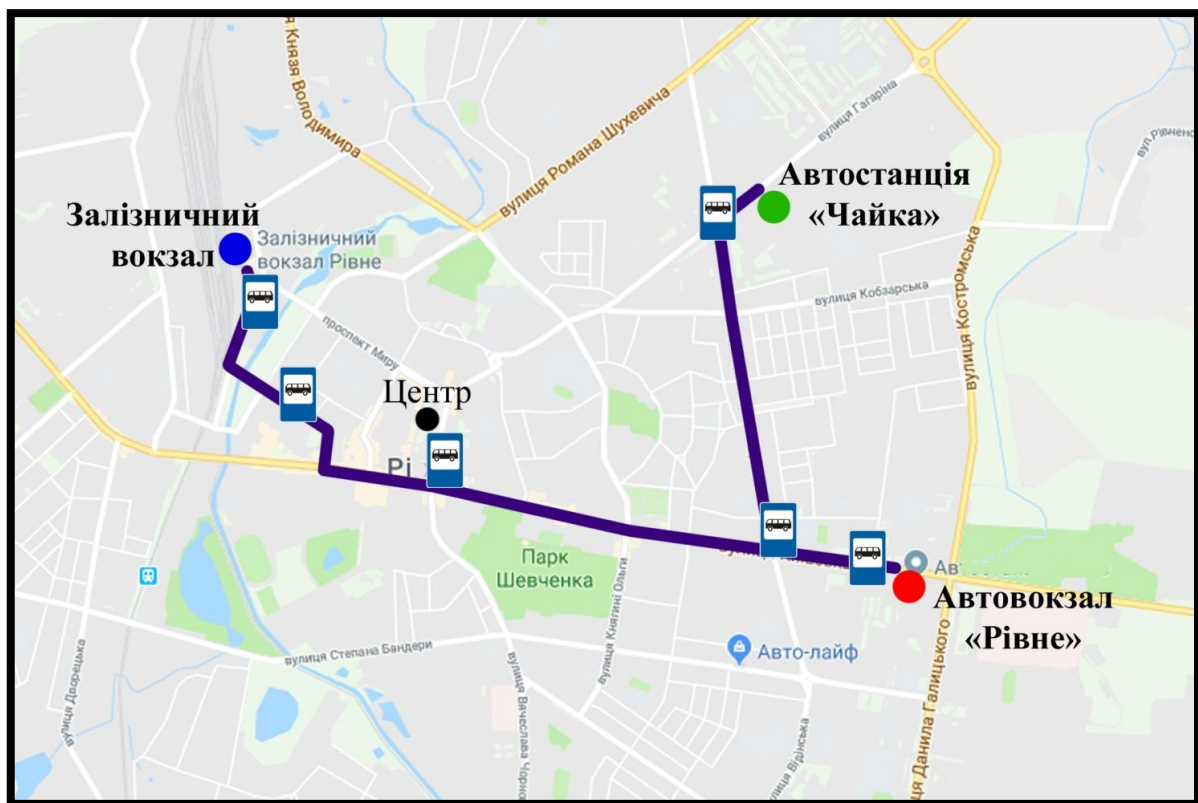


Рисунок 3.18 – Маршрутна схема зв'язків ТПВ у режимі експрес

Розглянемо окремо зв'язки між вокзальними комплексами та можливості їх експресного обслуговування.

- Автовокзал ↔ АС «Чайка». Для формування експресної лінії доцільно звести перелік зупинок до мінімуму: дві основні зупинки біля кожного з вокзальних комплексів і одна проміжна в районі 12-ї школи (див. рис. 3.19). Кінцеві платформи рекомендовано організувати у безпосередній близькості до входних груп вокзалів, щоб мінімізувати час підходу пішки та втрати на пересадки.



Рисунок 3.19 – Впровадження експресного сполучення між районами «Автовокзал» та АС «Чайка»

Автовокзал ↔ Залізничний вокзал. Найраціональніша трасу експресного сполучення доцільно прокладати через центральну частину міста з проходженням повз Центральний ринок. Саме в цій зоні доцільно розмістити точково-обмежений набір проміжних зупинок, які забезпечать захоплення найбільш інтенсивних потоків без істотного зниження швидкості сполучення (рис. 3.20).

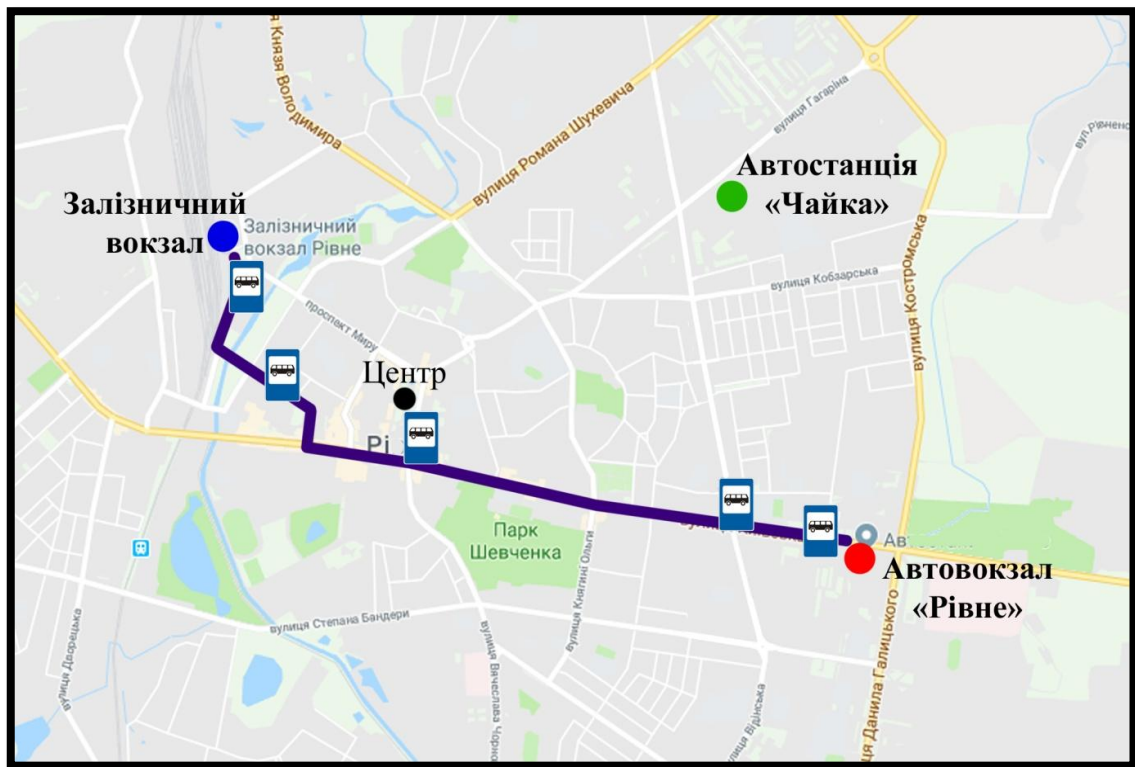


Рисунок 3.20 – Побудова експресного маршруту, що поєднує райони «Автовокзал» і «Залізничний вокзал»

АС «Чайка» ↔ Залізничний вокзал. Наявні зв'язки спираються на існуючу мережу та задіюють три проміжні зупинки в центральній частині (рис. 3.20). З погляду експресного стандарту таку конфігурацію варто раціоналізувати: або перевести частину рейсів у режим «обмежених зупинок», або прокласти альтернативну коротшу трасу з мінімально необхідним набором

зупинок. Останній підхід забезпечить вищу швидкість сполучення та скорочення часу поїздки.

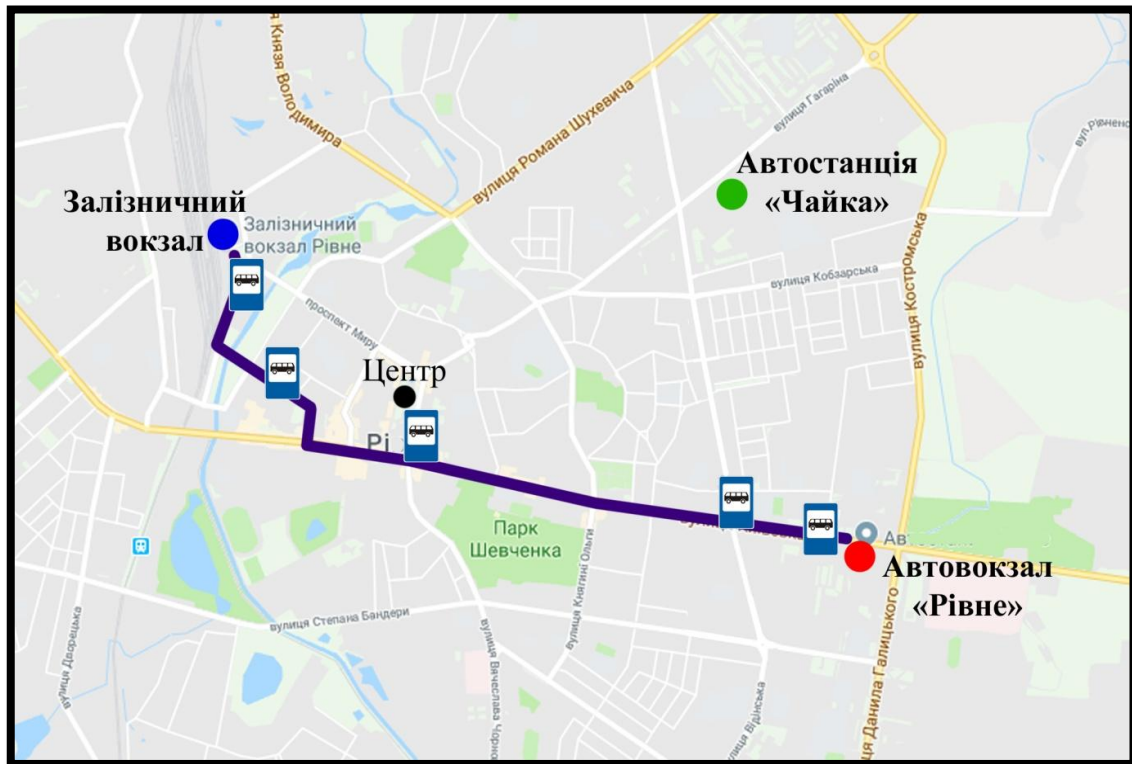


Рисунок 3.20 – Впровадження експресного сполучення між районами «Автовокзал» та «Залізничний вокзал»

Для всіх пар вузлів типу «вокзал–вокзал» ключовою вимогою є максимальне скорочення переліку проміжних зупинок до вузлових пунктів із найбільшими пасажиропотоками (центральні хаби, потужні генератори попиту). Такий підхід дозволяє сформувати експресний характер обслуговування, підвищити швидкість сполучення та зменшити сумарні часові витрати пасажирів на найнавантаженіших ділянках мережі.

У якості інженерного рішення пропонується пряме сполучення між відповідними пунктами за альтернативними трасами:

- варіант через вул. Гагаріна - вул. Міцкевича - просп. Миру;
- варіант через мікрорайон «Північний» із проходженням вул. Черняка - вул. Шухевича - вул. Литовська - вул. Набережна - просп. Миру (див. рис. 3.21).

За умови підтвердження практичної ефективності цих новацій на маршрутах, доцільно перейти до синхронізації розкладів: узгодити час відправлень міських автобусів із графіками руху поїздів та приміських/міжміських автобусів. Ідеться про організацію відправлень з кінцевих пунктів у вікна масових прибуттів на станцію, коли спостерігається найбільша концентрація поїздів або автобусів, що забезпечить надійні пересадки та мінімізує очікування.

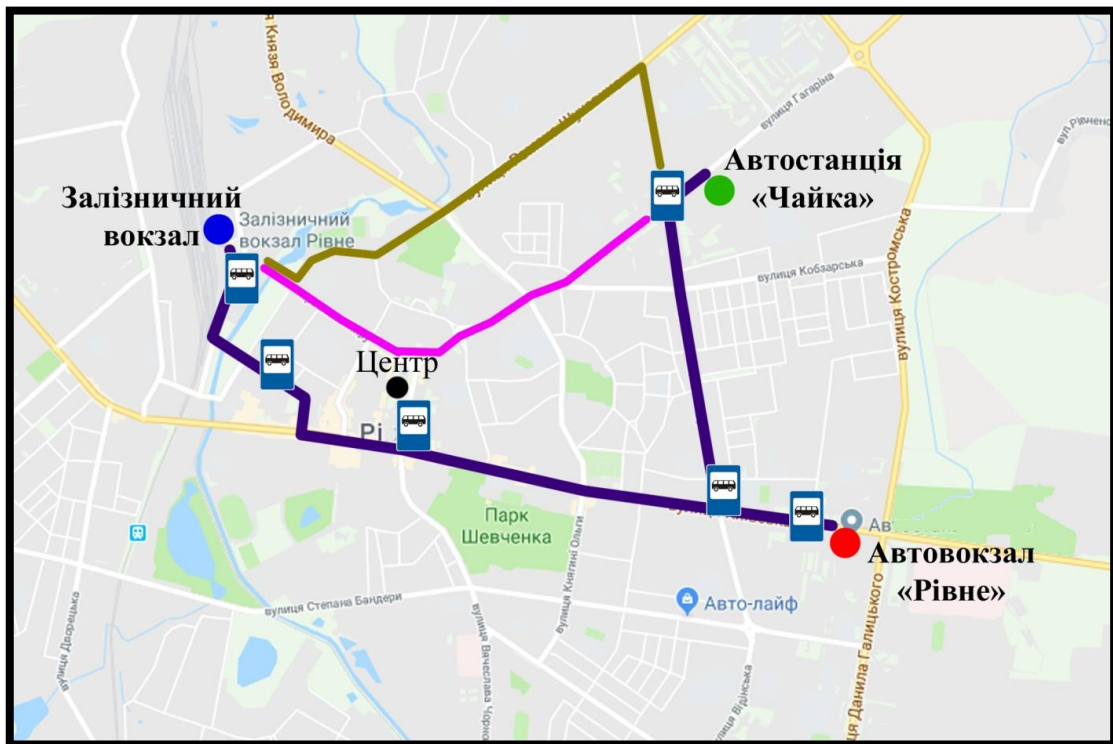


Рисунок 3.21 – Реалізація експресного транспортного зв’язку між АС «Чайка» та Залізничним вокзалом

За підсумками проведених досліджень і розрахунків подамо зіставлення роботи автобусних маршрутів у звичайному та експресному режимах у форматі діаграм (рис. 3.22–3.23).

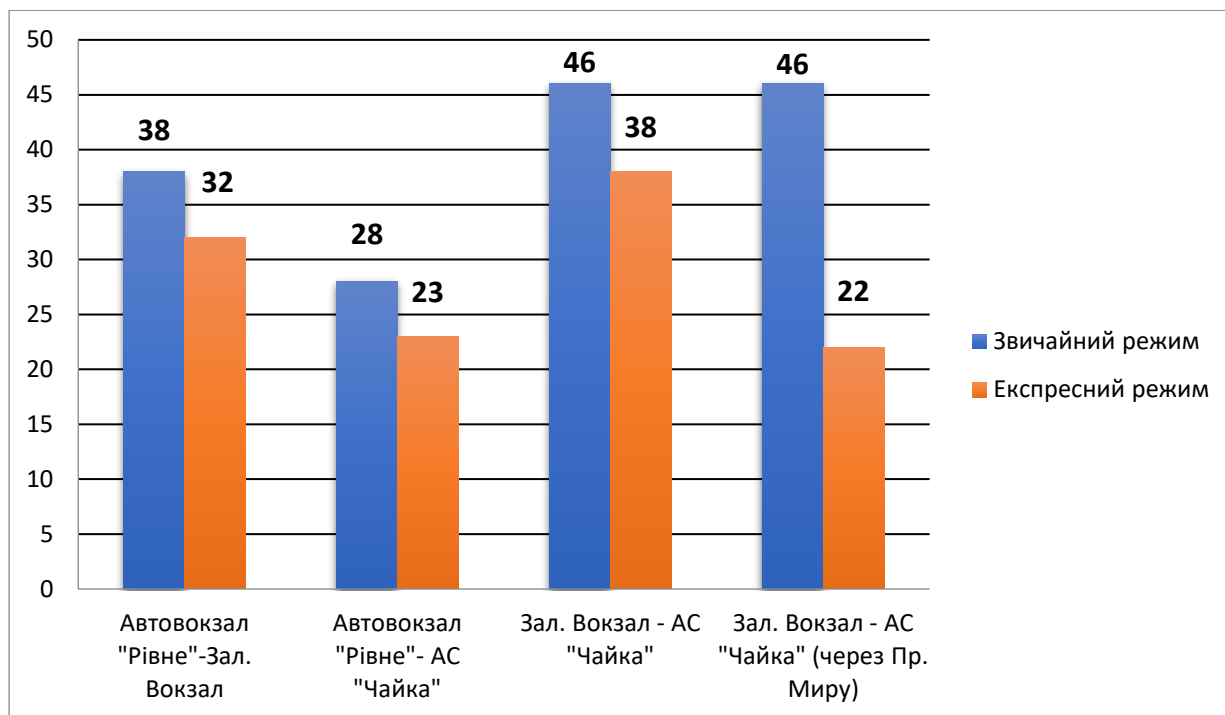


Рисунок 3.22 – Порівняння роботи автобусів за тривалістю оборотного рейсу, хв

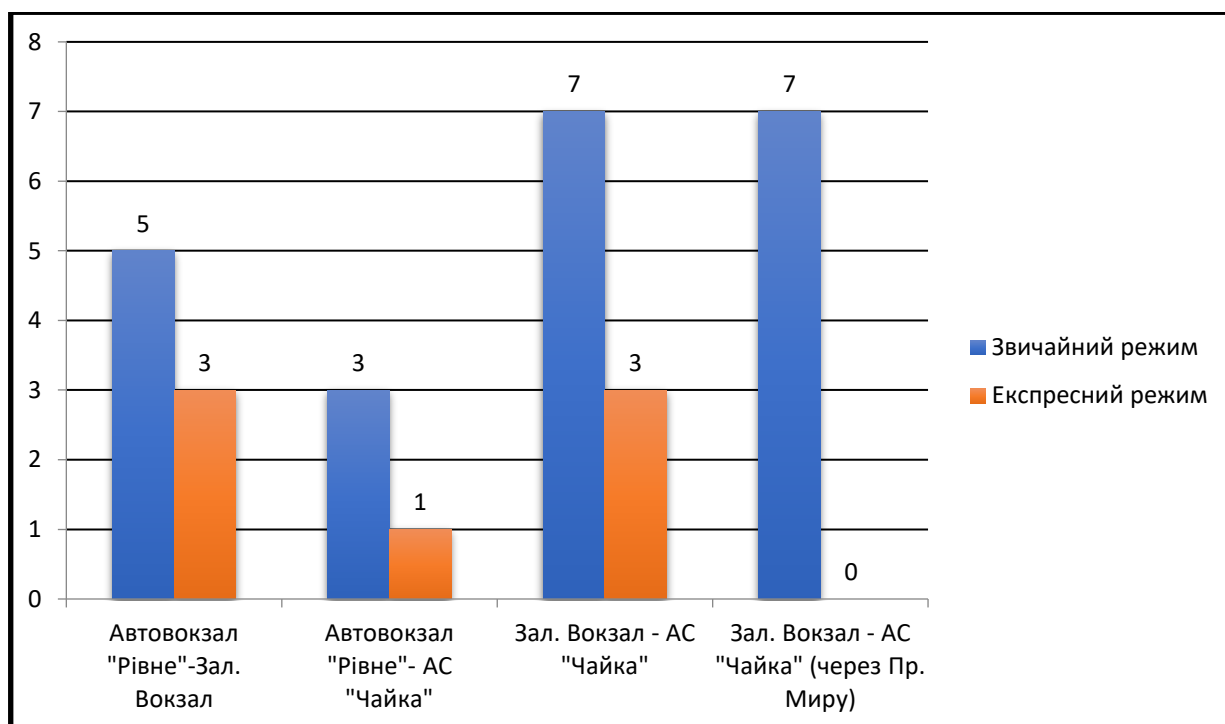


Рисунок 3.23 – Порівняння роботи автобусів за кількістю проміжних зупинок, од

Порівняння роботи маршрутів у звичайному та експресному режимах показує системне скорочення тривалості оборотного рейсу завдяки зменшенню кількості проміжних зупинок. На напрямі Автовокзал «Рівне» - Залізничний вокзал час обороту знижується з 38 до 32 хв (–6 хв; –15,8%), а число зупинок - з 5 до 3 (–40%). Для сполучення Автовокзал «Рівне» - АС «Чайка» тривалість рейсу скорочується з 28 до 23 хв (–5 хв; –17,9%), водночас кількість зупинок - з 3 до 1 (–66,7%). Маршрут Залізничний вокзал - АС «Чайка» демонструє зменшення часу з 46 до 38 хв (–8 хв; –17,4%) при скороченні зупинок із 7 до 3 (–57,1%). Найбільший ефект фіксується на варіанті через просп. Миру: тривалість обороту зменшується з 46 до 22 хв (–24 хв; –52,2%), а проміжні зупинки повністю усуваються ($7 \rightarrow 0$, –100%).

Отже, експресна організація руху забезпечує відчутний виграш у часі на всіх розглянутих напрямках, причому масштаб зменшення тривалості поїздки прямо корелює зі скороченням числа зупинок. Практично це означає підвищення швидкості сполучення, зростання оборотності рухомого складу та потенційне збільшення провізної здатності без додаткового випуску, а також кращу передбачуваність пересадок у вузлових точках мережі.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Система організації охорони праці на підприємствах автомобільного транспорту

Система управління охороною праці (СУОП) на автотранспортному підприємстві покликана запобігати нещасним випадкам і профзахворюванням, створювати безпечні та здорові умови праці для всіх категорій персоналу - водіїв, диспетчерів, механіків, мийників, заправників і адміністративних працівників. Вона ґрунтується на вимогах законодавства з охорони праці та профільних галузевих правил, а також на принципах ієрархії контролів і постійного поліпшення, що реалізуються за підходом PDCA. Ключовими завданнями є ідентифікація небезпек, оцінка та прийнятність ризиків, планування й виконання заходів, навчання і контроль, медичне забезпечення та періодичні перевірки ефективності.

Організаційна відповідальність у межах СУОП розподіляється чітко. Роботодавець формує політику, визначає цілі, надає ресурси й затверджує положення та процедури, у тому числі порядок розслідування подій. Служба або фахівець з охорони праці організовує ризик-менеджмент, веде реєстр небезпек, здійснює внутрішні аудити, координує навчання та контролює дотримання вимог у підрозділах. Керівники експлуатаційних і ремонтних дільниць забезпечують практичне впровадження інструкцій на робочих місцях і щоденний нагляд. Медичний працівник або ліцензований постачальник

медпослуг проводить попередні та періодичні огляди, а також перед- і післярейсовий контроль водіїв із відповідною фіксацією допусків. Представники працівників беруть участь у перевірках і надають пропозиції щодо поліпшень.

Документаційна основа СУОП охоплює політику та цілі в сфері охорони праці, положення про систему, реєстр небезпек і карти ризиків по робочих місцях, інструкції за професіями й процесами (зокрема для робіт у зонах високої напруги та з підйомним обладнанням), програми навчання та перевірки знань із журналами інструктажів, порядок забезпечення, обліку і заміни засобів індивідуального захисту, наряди-допуски для небезпечних робіт, процедури реагування та розслідування інцидентів, плани дій на випадок надзвичайних ситуацій, а також реєстри медичних оглядів і допусків до рейсу. Актуальність цих документів підтримується шляхом періодичного перегляду та оновлення після змін у технологіях, складі рухомого парку або за підсумками інцидентів.

Ідентифікація небезпек і оцінка ризиків здійснюються системно та безперервно. Типові джерела небезпеки для автотранспортного підприємства - дорожній рух і маневрування в депо, рухомі механізми та підйомники, роботи в оглядових ямах і на естакадах, електронебезпека (у тому числі висока напруга електробусів і зарядних станцій), поводження з паливно-мастильними матеріалами, газом і мийними засобами, пожежо- та вибухонебезпека, несприятливий мікроклімат, шум і вібрація, а також ергономічні та психофізіологічні фактори - монотонність, стрес, втома. Оцінювання ризиків проводять за матрицею «ймовірність × наслідок» із визначенням прийнятності та планів зниження за ієрархією контролів: від усунення та заміни до інженерних і адміністративних заходів і, в останню чергу, застосування ЗІЗ. Дорожньо-транспортна складова інтегрується через постановку вимірюваних цілей безпеки руху, зокрема зниження частоти ДТП на маршрутах і контроль поведінкових факторів водіїв.

Навчання та перевірка знань персоналу включають вступний, первинний, повторний і позаплановий інструктаж, а також спеціальну підготовку для робіт підвищеної небезпеки - у зонах високої напруги, з підйомними механізмами, при виконанні газонебезпечних або «гарячих» робіт. Тренування за планами дій у надзвичайних ситуаціях і пожежної евакуації проводяться регулярно, з обов'язковим документуванням результатів і коригувальних дій. Медичні огляди є невід'ємним елементом допуску до роботи: попередні та періодичні огляди визначають професійну придатність, а щозмінні перед- і післярейсові - підтверджують поточний стан водія, відстежують ознаки втоми, сп'яніння чи хвороби. Програма керування втомою передбачає раціональне планування змін і відпочинку, мікропаузи, ротацію завдань і психологічну підтримку.

Операційні контролі формують «першу лінію» профілактики. На території депо впроваджують односторонні схеми руху, низькі ліміти швидкості, виділяють і позначають «сліпі зони», використовують сигнальників при заїздах у бокси, блокують підйомники й фіксують колеса. У ремонтних зонах застосовують процедури lockout/tagout, підставки під кузов і мости, витяжну вентиляцію, безіскрові інструменти в ПММ-зонах і наряди-допуски для зварювання. На дільницях заправки й заряджання забезпечують заземлення, сорбенти для локалізації розливів, контроль статичної електрики та герметичності систем; у випадку електротранспорту організовують огорожені ВН-зони, використовують інструмент з необхідним класом ізоляції та відповідні діелектричні ЗІЗ. Для салону й кузова регламентують безпечну мийку, протиковзкі покриття, належне розміщення та утримання вогнегасників, аптечок і схем евакуації. Диспетчерська служба аналізує ризики на маршрутах, визначає небезпечні ділянки, готує інструкції дій у разі ДТП, пожежі чи технічної несправності.

Засоби індивідуального захисту підбираються за результатами оцінки ризиків, а норми їх забезпечення, видачі, обліку й заміни закріплюються в локальній документації. До типових ЗІЗ належать спецодяг і спецвзуття, каски,

захисні окуляри, рукавички (зокрема діелектричні), страхувальні системи для робіт на висоті та респіратори. Періодично проводяться огляди ЗІЗ і навчання правильному користуванню ними.

Ефективність СУОП оцінюється за допомогою кількісних і якісних показників: частота та тяжкість травматизму, коефіцієнт ДТП у перерахунку на мільйон кілометрів пробігу, частка виконаних заходів плану зниження ризиків, своєчасність навчання персоналу, кількість виявлених небезпек на 100 працівників. Результати внутрішніх аудитів і менеджмент-рев'ю лягають в основу коригувальних і запобіжних дій, а розслідування інцидентів завершується аналізом першопричин і впровадженням стійких рішень. Взаємодія з підрядниками та відвідувачами регламентується процедурами попередньої кваліфікації, обов'язковими інструктажами, погодженими планами безпеки й контролем виконання вимог при доступі на територію підприємства.

У підсумку СУОП на автотранспортному підприємстві - це інтегрована система політик, процедур, технічних і організаційних заходів, яка охоплює весь цикл діяльності: від планування робіт і підготовки персоналу до медичного супроводу, операційного контролю, моніторингу результатів і постійного вдосконалення. Її дієвість забезпечується поєднанням правових і стандартних вимог із практичним ризик-орієнтованим підходом, прозорим розподілом відповідальності та невинною роботою над культурою безпеки.

4.2. Безпека праці при керуванні автобусом при перевезенні пасажирів

Безпека праці водія автобуса визначається поєднанням технічної справності транспортного засобу, професійної підготовки та

психофізіологічного стану водія, організації робочого часу й відпочинку, а також культурою взаємодії з пасажирями й іншими учасниками дорожнього руху. До виїзду на лінію водій проходить передрейсовий медичний огляд і перевіряє справність автобуса під час щоденного обслуговування: гальмівні системи, рульове керування, шини, світлотехніку, склоочисники, дверні приводи, аварійні виходи, вогнегасники й аптечку, системи клімат-контролю та вентиляції, інформаційні табло й засоби зв'язку. Виявлення несправностей, здатних вплинути на безпеку руху або евакуацію, є підставою для недопуску транспортного засобу до роботи; водій фіксує зауваження у відповідному журналі та інформує механіка або диспетчера.

Під час посадки та висадки пасажирів водій зобов'язаний забезпечити повне припинення руху, щільну зупинку біля бордюру, відчинення дверей лише після повної зупинки та за відсутності перешкод у зоні дверей. Особлива увага приділяється маломобільним пасажиром, дітям, вагітним, людям поважного віку: використання апарелей, відкидних трапів або «колінкування» підвіски супроводжується візуальним контролем стійкості візка та фіксації ременями. Рух автобуса допускається лише після переконання, що всі пасажирі зайняли безпечне положення, а візки та громіздкий багаж надійно зафіксовано; двері мають бути зачинені, індикатори - без помилок, а дзеркала й камери огляду не закриті предметами.

Водій підтримує ергономічно правильне робоче положення: відрегульовані сидіння, кермо, підголівник і дзеркала з урахуванням «сліпих зон». Протягом зміни слід дотримуватися затверджених графіків праці та відпочинку, планувати мікропаузи й уникати наднормової тривалості керування, що підвищує ризик сонливості та помилок. Будь-які ознаки втоми, запаморочення, порушення зору, емоційна нестабільність, а також прийом медикаментів, що впливають на увагу, є підставою для тимчасового відсторонення від керування з інформуванням диспетчера. Користування мобільним телефоном і гаджетами під час руху заборонене, окрім

використання гарнітури для короткого службового зв'язку; налаштування маршрутних пристроїв і навігації виконується виключно на стоянці.

Манера водіння має бути передбачуваною й плавною: розгони та гальмування - без різких піків прискорення, вписування в повороти - із запасом стійкості, дотримання дистанції - з урахуванням маси, габаритів і стану покриття. В умовах дощу, снігу, ожеледиці, туману або сильного бокового вітру швидкість знижується, збільшується інтервал, а використання систем ABS/ESP доповнюється підготовкою до можливих зносів і видовження гальмівного шляху. Під час руху в населених пунктах водій очікує непередбачуваних дій пішоходів і велосипедистів, особливо біля шкіл, лікарень, зупинок громадського транспорту; проїзд перехресть здійснюється без «жорстких» проїздів на жовтий і без блокування пішохідних переходів. На зупинках водій завчасно подає сигнал, обирає траєкторію під кутом, що мінімізує «сліпі зони», і контролює ситуацію в дзеркалах та камерах перед зачиненням дверей.

У салоні підтримується безпечний мікроклімат і порядок: температура та вентиляція регулюються відповідно до сезону для запобігання запотіванню скла й дискомфорту пасажирів; забороняється експлуатація з пошкодженими поручнями, ковзаючими покриттями або несправним освітленням. Комунікація з пасажиром має бути чіткою, спокійною, без конфліктів; у разі агресивної поведінки або підозри на правопорушення водій інформує диспетчера та, за потреби, правоохоронні органи, не вступаючи у фізичний контакт і не залишаючи робоче місце без необхідності. Перевезення стоячих пасажирів здійснюється в межах технічної місткості, а багаж розміщується так, щоб не перекривати проходи, аварійні виходи й доступ до вогнегасника.

Дії у разі відмови систем або аварійної ситуації відпрацьовуються за попередньо встановленими алгоритмами. За появи сторонніх шумів, вібрацій, падіння тиску в пневмосистемі, перегріву двигуна чи індикації критичних помилок водій безпечно зменшує швидкість, зупиняється у дозволеному місці, вмикає аварійну сигналізацію, виставляє знак аварійної зупинки та повідомляє

диспетчера. У випадку пожежі першочергово організовується евакуація пасажирів через основні та аварійні виходи зі сторонньої від проїжджу частину сторони; гасіння здійснюється вогнегасником лише за умови відсутності загрози життю. У разі ДТП водій забезпечує позначення місця пригоди, надання домедичної допомоги в межах навичок, виклик екстрених служб і збереження обстановки, якщо це не шкодить безпеці людей.

Особливості безпеки залежать від типу рухомого складу та енергосистеми. На автобусах із газобалонним обладнанням водій контролює індикатори герметичності й тиску, уникає джерел відкритого полум'я під час заправки, дотримується вимог провітрювання. На електробусах повага до правил високовольтної безпеки критично важлива: від'єднання й підключення зарядного роз'єма здійснюється лише в повній зупинці й під наглядом, забороняється самостійне втручання в ВН-компоненти; при підозрі на електричну несправність застосовується режим ізоляції та викликаються спеціалізовані служби. На гірських або приміських маршрутах водій використовує гальмування двигуном, уникати перегріву гальм та контролює навантаження на підйомах і спусках, дотримуючись попередньо визначених передач і швидкісних режимів.

Дисципліна щодо алкоголю, наркотичних і психотропних засобів, а також лікарських препаратів, що впливають на реакцію, є безумовною: будь-які порушення тягнуть за собою негайне відсторонення. Водій зобов'язаний користуватися ременем безпеки, а у випадках, передбачених конструкцією, - контролювати фіксацію ременів пасажирями на сидіннях, обладнаних відповідними пристроями. Усі інциденти, майже-інциденти та небезпечні спостереження повідомляються диспетчеру або відповідальному з охорони праці для аналізу причин і запобігання повторенню; водій бере участь у періодичних навчаннях, тренуваннях з евакуації, пожежогасіння та надання домедичної допомоги.

Таким чином, безпека праці при керуванні автобусом - це системний процес, що охоплює медичний контроль і підготовку водія, технічну

справність автобуса, культуру керування й сервісу, управління втомою та стресом, а також готовність до дій у нестандартних ситуаціях. Лише узгоджена робота водія, диспетчерської служби, технічного персоналу й служби охорони праці гарантує зниження виробничих ризиків, безпеку пасажирів і стабільну якість перевезень.

4.3. Заходи з пожежної безпеки

Пожежна безпека автотранспортного підприємства базується на превентивному контролі джерел запалювання та горючого навантаження, технічній справності інженерних систем і готовності персоналу до швидкої локалізації загорянь та організованої евакуації. На території депо, ремонтних і мийних зон, ПММ-дільниць, газо- та зарядних станцій підтримується належний протипожежний режим: робочі місця утримуються в чистоті без скупчення горючих відходів, проїзди та евакуаційні виходи завжди вільні, а куріння дозволене лише у спеціально відведених, обладнаних місцях. Будь-які роботи з відкритим полум'ям або іскроутворенням виконуються за нарядом-допуском із передбаченим відключенням/ізоляцією комунікацій, огороженням зони, наявністю первинних засобів пожежогасіння та контролем за відсутності парів пального.

Склади ПММ і мастил, а також пункти дозаправлення облаштовуються системами заземлення, вентиляції та піддонами для локалізації можливих розливів; тара зберігається герметично закритою, на видимих місцях розміщуються таблички про вибухопожежну небезпеку, заборону відкритого вогню й використання іскроутворювального інструменту. Прибирання

розливів здійснюється сорбентами з подальшою утилізацією відходів згідно з внутрішніми регламентами. У ремонтних зонах застосовуються безіскрові інструменти там, де це доцільно, а електрообладнання відповідає категорії приміщення щодо вибухопожежної небезпеки. Електрощитові утримуються зачиненими та не використовуються як склади; доступ мають лише уповноважені працівники.

Особливі вимоги висуваються до рухомого складу з альтернативними енергоносіями. Для автобусів на стисненому природному газі або пропан-бутані контролюється герметичність магістралей і арматури, виключається іскроутворення під час техобслуговування, забезпечується провітрювання боксів і регулярна перевірка газоаналізаторів. Під час заправлення дотримуються правил заземлення й відведення статичної електрики; заборонено користуватися мобільними телефонами поблизу колонки. Для електробусів і зарядних пунктів запобігають перегріву елементів живлення, контролюють стан кабелів і роз'ємів, підтримують чистоту та провітрювання зарядних приміщень, а персонал проходить цільовий інструктаж щодо дій при термічному розгоні батареї, зокрема швидкого відключення, огороження зони, охолодження без ризику ураження електричним струмом і виклику спеціалізованих служб.

Первинні засоби пожежогасіння розміщуються з урахуванням класів можливих пожеж і доступності з евакуаційних шляхів. У ПММ- і ремонтних зонах передбачаються порошкові та вуглекислотні вогнегасники відповідного об'єму; у електротехнічних зонах перевага віддається засобам, які не проводять струм і не пошкоджують обладнання; у кузовно-фарбувальних місцях - засоби для гасіння парів розчинників із посиленою вентиляцією та вибухозахищеними витяжками. На кожному автобусі вогнегасник, аптечка та молотки для аварійного скління закріплені у стандартних місцях, позначених піктограмами; водій перед виїздом перевіряє цілісність пломб і терміни придатності. Обслуговування вогнегасників, гідрантів, внутрішніх пожежних кранів і сигналізації виконується у визначені строки з фіксацією в журналах.

Система виявлення та оповіщення про пожежу підтримується у працездатному стані з регулярним тестуванням датчиків, сирен і резервного живлення. Евакуаційні шляхи маркуються світловими показниками, плани евакуації розміщуються на видимих місцях, а двері, що ведуть назовні, відчиняються у напрямку виходу без перешкод. Персонал проходить навчання діям при пожежі та щорічні тренування з евакуації: керівники підрозділів закріплюють відповідальних за виклик пожежно-рятувальної служби, відключення електроживлення, газу чи зарядних ліній, організацію зустрічі підрозділів ДСНС і перевірку явки на збірних пунктах. Особливий акцент робиться на ролі водія: у разі загоряння на лінії він зупиняє автобус у безпечному місці, евакуює пасажирів на узбіччя або за огорожу, блокує повторний доступ до салону, за можливості локалізує займання вогнегасником і негайно повідомляє диспетчера та екстрені служби.

Електро- і пожежна безпека інженерних мереж забезпечується своєчасними вимірюваннями опору ізоляції, перевіркою заземлення, цілими кабельними трасами без перевантаження, використанням автоматів захисту з коректно підібраними характеристиками. Забороняється застосування подовжувачів «гірляндами», підключення несертифікованих пристроїв і залишення підключеного обладнання без нагляду, якщо це суперечить інструкціям виробника. Усі аварійні відключення мають бути промарковані, а персонал - знати їх місцезнаходження. Після завершення робіт відповідальні особи проводять огляд приміщень, відключають непотрібне обладнання, перевіряють закриття пожежостійких дверей і відсутність джерел запалювання.

Документальне забезпечення включає затверджений протипожежний інструктаж для кожної ділянки, журнали реєстрації інструктажів і перевірок, плани локалізації та ліквідації аварійних ситуацій, схеми оповіщення й евакуації, перелік відповідальних осіб та їхні повноваження, а також протоколи навчань і тренувань з висновками щодо удосконалення. Механізм розслідування інцидентів, навіть «майже-пожеж», передбачає аналіз

першопричин, коригувальні дії та зворотний зв'язок у програму навчання, щоб виключити повторення. Співпраця з місцевими підрозділами ДСНС реалізується через попередні обстеження об'єктів, погодження під'їзних шляхів і місць забору води, а також спільні відпрацювання сценаріїв для ПММ-, газових і зарядних дільниць.

Завдяки поєднанню режимних заборон і дозволів, технічних бар'єрів, належної експлуатації обладнання та систематичної підготовки персоналу підприємство мінімізує ймовірність виникнення пожежі та зменшує наслідки можливих загорянь. Узгоджені дії водіїв, технічних служб, диспетчерів і відповідальних з пожежної безпеки забезпечують швидке виявлення небезпеки, своєчасне оповіщення, безпечну евакуацію пасажирів і локалізацію вогнища з урахуванням специфіки використовуваних енергоносіїв і технологічних процесів.

4.4. Підвищення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі

Підвищення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі досягається лише системним підходом, у якому інженерні рішення, керування швидкістю, контроль і виховання учасників руху доповнюються якісним утриманням інфраструктури, оперативною медичною допомогою та постійним аналізом даних. Базою має бути «безпечна система» із пріоритетом життя і здоров'я: помилки людей неминучі, отже інфраструктура, транспорт і правила повинні прощати ці помилки без фатальних наслідків. Першочергово впливають на травматизм швидкість та конфлікти на перехрестях, тому

управління швидкісними режимами і переформатування вузлів - ключові важелі. У містах рекомендовано впроваджувати зони 30 км/год у житловій забудові та біля шкіл/лікарень, застосовуючи підвищені платформи на переходах, «звуження» проїзної частини, острівці безпеки й розширення тротуарів у місцях переходів; на магістралях - фізично розділяти потоки бар'єрами/смугами безпеки, будувати кільцеві розв'язки замість колізійних «лівих поворотів», оптимізувати фази світлофорів, включно з пріоритетом для пішоходів (LPI) та громадського транспорту. Небезпечні місця і ділянки відбирають не лише за історією ДТП, а й за проактивними метриками: конфлікт-аналізом відео, картами ризику, недостатністю оглядовості, неузгодженістю геометрії, низькою шорсткістю покриття чи зношеною розміткою; для кожної такої локації готують пакет маловитратних «швидких» втручань (тактичний урбанізм: делінеатори, тимчасові острівці, переналаштування фаз) з подальшим капітальним закріпленням рішення після вимірювання ефекту.

Захист уразливих учасників руху - обов'язковий фокус. Безперервні, фізично відокремлені велодоріжки, підвищені або «зебра-на-платформі» переходи через усі гілки перехресть, заборона паркування в 5–10 м до переходів і виїздів, добрий рівень освітленості в пішохідних зонах, безбар'єрні бордюри та тактильні елементи суттєво знижують ризик наїздів. Поруч із навчальними та дитячими закладами працюють «шкільні вулиці» із часовим обмеженням автомобільного руху, а біля зупинок ГТ організовують «кишені» або платформні зупинки з чіткою видимістю та короткими шляхами переходу. Для громадського транспорту важливі виділені смуги, пріоритет на світлофорах і безпечна геометрія заїздів, що зменшує хаотичні маневри та конфлікти з пішоходами/велосипедистами.

Інтелектуальні системи керування рухом підсилюють інженерію. Адаптивне регулювання світлофорів, табло зворотного зв'язку про швидкість, контроль за зупинками у виділених смугах, автоматизоване відеофіксування перевищення швидкості, проїзду на заборонний сигнал і смугою ГТ формують

прогнозовану поведінку та знижують аварійність без постійної фізичної присутності поліції. Паралельно потрібні адресні інформаційні кампанії: ремені безпеки, дитячі крісла, видимість у темний час доби, тверезість за кермом, утримання від користування телефоном під час руху - із повторюваними меседжами та підкріпленням перевітками тверезості й швидкості. Для вантажного та сервісного транспорту дієве «керування доступом»: часові вікна для доставок, виділені місця завантаження, маршрути обходу шкільних зон і центрів, заборона небезпечних маневрів у пікові години.

Утримання мережі безпосередньо впливає на безпеку: своєчасна ліквідація колійності й ямковості, відновлення зчепних властивостей покриття, регулярне вимірювання світлоповернення розмітки та знаків, справна дренажна система, догляд за зеленими насадженнями для забезпечення оглядовості, правильна зимова тактика (антиожедні матеріали, превентивне соління, пріоритетні маршрути) зменшують як частоту, так і тяжкість ДТП. На роботах у смузі відведення впроваджують плани керування рухом на період будівництва (TMP): зрозумілу тимчасову розмітку, захисні бар'єри, зниження швидкості та нічне освітлення, щоб не створювати нових «чорних точок». Окрему увагу слід приділяти інвентаризації переходів і бар'єрів, щоб уникати пасток для людей з інвалідністю та користувачів колісного транспорту малої мобільності.

Екстрена допомога та післяаварійні дії - частина безпекової системи. Скорочення часу прибуття екстрених служб за рахунок пріоритету світлофорів, точних адресних орієнтирів і смуг для оперативного транспорту, навчання населення базовим навичкам домедичної допомоги, оснащення вузлових локацій дефібриляторами підвищують шанси постраждалих у «золоту годину». Для автобусних і трамвайних вузлів потрібні зрозумілі схеми евакуації та чіткі інструкції персоналу.

Керування безпекою повинно бути даноцентричним. Місто формує інтегровану базу даних ДТП і небезпечних подій, поєднує її з трафіковими, швидкісними й інфраструктурними шарами, застосовує мережеві методи

ранжування ризику, проводить аудити безпеки доріг на стадіях проектування та до-/післябудівельні інспекції. Ефективність рішень оцінюють «до-після» з контролем зовнішніх факторів, а коли немає достатньо ДТП-даних - за сурогатними показниками (кількість і тяжкість конфліктів, Time-to-Collision, Post-Encroachment Time). Ключові індикатори - загиблі й травмовані (KSI) на 100 тис. населення і на 100 млн км, частка мережі з лімітами 30 км/год у чутливих зонах, частка перехресть із захищеними переходами та острівцями, довжина захищеної веломережі, відсоток світлофорів із LPI/пріоритетом ГТ, рівень відповідності розмітки нормативам світлоповернення, середні швидкості за ділянками. Бюджетуванню допомагає скринінг витрат-вигод: маловитратні фізичні засоби зазвичай мають високі коефіцієнти ефективності, тоді як великі реконструкції виправдані на коридорах із стабільно високим ризиком.

Зрештою, стійке підвищення безпеки - це не разова кампанія, а безперервний цикл: виявити ризики, швидко застосувати тимчасові рішення, заміряти ефект, масштабувати найкраще й закріпити капітально. Поєднання зниження швидкостей, переформатування конфліктних вузлів, захисту вразливих учасників, автоматизованого контролю, якісного утримання та оперативної допомоги формує таке міське середовище, де звичайна людська помилка не перетворюється на трагедію.

Підвищення безпеки дорожнього руху досягається системним підходом «безпечної системи», у якому пріоритетом є збереження життя й здоров'я, а інфраструктура, транспорт і правила «прощають» неминучі людські помилки. Основними чинниками впливу залишаються швидкість та конфлікти на перехрестях, тому першочерговими діями є керування швидкісними режимами та переформатування небезпечних вузлів. У житловій забудові та біля закладів освіти й охорони здоров'я доцільно впроваджувати зони 30 км/год із підвищеними платформами на переходах, звуженням проїзної частини, острівцями безпеки та розширенням тротуарів у місцях переходів. На магістралях ефективними є фізичний поділ потоків, відсікання лівих

поворотів, заміна конфліктних розв'язок на кільцеві та оптимізація фаз світлофорів із раннім запуском пішоходів і пріоритетом громадського транспорту.

Захист уразливих учасників руху вимагає безперервної й фізично відокремленої веломережі, піднятих або контрастних пішохідних переходів через усі гілки перехресть, достатньої освітленості пішохідних зон та усунення паркування в межах видимості переходів. Біля зупинок громадського транспорту варто створювати безпечні платформи, короткі траєкторії переходу та чітку організацію посадки-висадки, щоб мінімізувати конфлікти з пішо- та велорухом. Для мікромобільності необхідні легальні місця паркування, зрозумілі правила швидкості у змішаних просторах і плавні стики покриттів без «ступенів», що створюють ризики втрати рівноваги.

Інтелектуальні транспортні системи доповнюють інженерні рішення: адаптивне керування світлофорами стабілізує потоки, інформаційні табло формують дисципліну швидкості, а автоматизована відеофіксація порушень зменшує небезпечну поведінку без постійної присутності поліції. Для великих коридорів корисні локальні «зелені хвилі» під заданий ліміт, детектори черг для запобігання блокуванню перехресть та пріоритет для автобусів, що скорочує хаотичні маневри. Паралельно потрібні регулярні освітні кампанії щодо ременів безпеки, дитячих крісел, тверезості за кермом та відмови від користування телефоном під час руху з обов'язковим підкріпленням перевірками швидкості й тверезості у «вікна ризику».

Належне утримання мережі прямо впливає на аварійність: своєчасна ліквідація колійності та ямковості, відновлення шорсткості покриття, підтримання нормативної світлоповертальності розмітки та знаків, очищення лотків і водовідведення, догляд за зеленими насадженнями для забезпечення оглядовості зменшують і частоту, і тяжкість ДТП. У сезонному розрізі важливо практикувати превентивне соління до опадів, швидке прибирання «каші» й підсилення контрасту розмітки у вологу погоду; навесні - оперативно усувати ямковість і полірування колії, що особливо небезпечно для двоколісних. Будь-

які будівельні та ремонтні роботи повинні виконуватися за планом керування рухом із зрозумілою тимчасовою розміткою, бар'єрами, обмеженнями швидкості та належним нічним освітленням, аби не створювати нових «чорних точок».

Вантажні та сервісні потоки потребують окремої політики доступу: часові «вікна» для доставок у центрах, визначені маршрути об'їзду чутливих зон, місця завантаження/розвантаження, спецсмуги на підйомах і ваговий контроль у русі для запобігання перевантаженню та руйнуванню покриття. На рівні проектування й експлуатації слід запровадити аудити безпеки доріг: перевірки на стадіях концепції, проекту, будівництва та перед запуском, а також регулярні інспекції існуючих вулиць із фокусом на видимості, геометрії, шорсткості й читабельності організації руху. Небезпечні місця потрібно відбирати не лише за історією ДТП, а й за проактивними індикаторами - конфлікт-аналізом відео, низькою видимістю, неузгодженою геометрією, зношеною розміткою - і для кожної локації готувати «швидкі» маловитратні втручання з подальшим капітальним закріпленням після вимірювання ефекту.

Екстрена допомога є частиною безпекової системи. Скорочення часу прибуття служб забезпечується пріоритетом проїзду, точними адресними орієнтирами, виділеними коридорами для оперативного транспорту, а навчання домедичній допомозі та встановлення дефібриляторів у вузлових місцях підвищують шанси постраждалих у «золоту годину». Для вузлів громадського транспорту потрібні зрозумілі схеми евакуації та інструкції персоналу, які відпрацьовуються під час тренувань.

Керування безпекою має ґрунтуватися на даних. Необхідно створити інтегровану базу ДТП і небезпечних подій, поєднану зі швидкісними та інфраструктурними шарами, застосовувати мережеві методи ранжування ризику, проводити «до-після» оцінювання з контролем зовнішніх факторів, а за браку даних - використовувати показники, як-от Time-to-Collision, Post-Encroachment Time чи телеметрику «жорстких гальмувань» із громадського транспорту. Ключовими індикаторами ефективності мають бути загиблі та

тяжко травмовані на 100 тис. населення і на 100 млн км, частка мережі із зонами 30 км/год у чутливих районах, довжина захищеної веломережі, відсоток перехресть із підсиленням пішохідним захистом, частка світлофорів із пріоритетом громадського транспорту та рівень відповідності розмітки нормативам.

Інституційно доцільно створити міжвідомчу раду з безпеки руху, ухвалити міську стратегію «Нуль смертей» із п'ятирічним планом дій, картою ризиків, переліком пріоритетних локацій та календарем малих і великих проєктів. Фінансування може поєднувати місцевий бюджет, дорожній фонд, державні програми співфінансування та донорські кошти; для малих рішень корисний «швидкий трек» із типовими дизайнами. Потрібна публічна панель індикаторів і щоквартальні звіти з фотофіксацією та польовими вимірами, а також контрактні KPI для підрядників утримання - від світлоповернення розмітки до часу усунення небезпечних дефектів. У підсумку сталий результат забезпечує безперервний цикл: виявлення ризиків, швидкі маловитратні зміни, вимірювання ефекту, масштабування найкращих рішень і капітальне закріплення - так формується середовище, у якому звичайна людська помилка не призводить до трагедії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу літературних джерел визначено, що сучасна концепція розвитку міських транспортних систем базується на принципах сталого розвитку, безпеки та доступності, а також на поєднанні планувальних, екологічних і технологічних підходів. Встановлено, що ефективне управління перевезеннями можливе лише за умови впровадження інтелектуальних транспортних систем, моніторингу показників сервісу та аналізу транспортного попиту.

2. Обґрунтовано необхідність переходу до моделі управління на основі даних (data-driven), що дозволяє оцінювати якість перевезень через систему KPI: середню швидкість, регулярність руху, заповнюваність салону та рівень безпеки.

3. Розроблено концептуальну транспортну модель, яка поєднує аналіз потоків, планування маршрутів і розподіл навантаження між видами транспорту з метою підвищення ефективності роботи мережі. Показано, що застосування імітаційного моделювання дозволяє точно прогнозувати вплив змін у мережі — наприклад, скорочення кількості зупинок або введення експресних маршрутів — на середній час поїздки пасажирів.

4. Обґрунтовано важливість методів обстеження руху (камери, GPS-дані, опитування пасажирів) для перевірки достовірності моделей і валідації розрахунків. Визначено, що якість роботи транспортно-пересадкових вузлів суттєво впливає на швидкість і комфорт поїздок, а тому їхня модернізація є ключовим фактором підвищення ефективності пасажирських перевезень.

5. Запропоновано оптимізаційні рішення: впорядкування потоків, облаштування піднятих платформ, острівців безпеки, покращення пішохідних зв'язків та створення умов для пересадки без затримок. Доведено, що впровадження експресного сполучення між ключовими вузлами (АС, вокзали,

університети, лікарні) скорочує час поїздки на 10–20% та підвищує регулярність руху автобусів.

6. Сформовано систему охорони праці на підприємстві автомобільного транспорту, яка включає оцінку ризиків, інструктажі, контроль технічного стану автобусів і дотримання вимог безпеки водія. Розроблено заходи щодо пожежної безпеки на підприємстві: протипожежні інструкції, контроль стану обладнання, навчання персоналу та створення евакуаційних схем.

7. Обґрунтовано комплекс дій із підвищення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі: зниження швидкісних режимів у житлових зонах, удосконалення освітлення та організацію безпечних пішохідних переходів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Huang, Z. D., Liu, X. J., Huang, C. C., & Shen, J. W. (2010). A GIS-based framework for bus network optimization using genetic algorithm. *Annals of GIS*, 16(3), 185-194.
2. Fu B.B., Zhang L., Li S.B., Li Y.X. Survivability of public transit network based on network structure entropy. *International Journal of Modern Physics C*, 26(9), 1550104, 2015.
3. Yuriy Vovk, Oleg Tson, Marcin Kicinski, Iryna Vovk, Volodymyr Dzyura, Yaroslav Vovk. (2025). Microtransportation: A sustainable solution for urban mobility challenges. *Journal of Chinese Architecture and Urbanism* 6561. <https://doi.org/10.36922/jcau.6561>
4. Доля В. К. Пасажирські перевезення : підручник. – Харків : Вид-во «Форт», 2011. – 504 с.
5. Босняк М. Г. Пасажирські автомобільні перевезення : навч. посіб. – Київ : Видавничий дім «Слово», 2009. – 272 с.
6. Яновський П. О. Пасажирські перевезення : навчальний посібник. – (електронне видання, доступ через наукові бібліотеки).
7. Кристопчук М. Є., Лобашов О. О. Приміські пасажирські перевезення : навч. посібник. – Харків : НТМТ, 2012. – 224 с.
8. О. П. Цьонь, О. П. Тимошів, В. В. Ковалик. Організація ефективного руху пасажирського транспорту / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – с. 137.
9. Вакуленко К. Є., Доля К. В. Управління міським пасажирським транспортом : навч. посібник. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 257 с.

10. Доля О. Є., Доля К. В. Наукові основи управління проєктами міських пасажирських перевезень : монографія. – Boston : Primedia eLaunch, 2020. – 136 с.
11. Гордієнко С. М. Міський транспорт : конспект лекцій. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013.
12. «Міський транспорт» : посібник. – Луцьк : ЛНТУ, 2021. – (електронний ресурс, доступ через сайт бібліотеки ЛНТУ).
13. Цьонь О.П., Плекан У.М. Транспортно-логістичне моделювання параметрів громадського транспорту. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Перспективи розвитку науки, освіти, технологій та суспільства в контексті євроінтеграції” 2 травня 2024, м. Рівне: ЦФЕНД, 2024. С.97-98.
14. Біліченко В. В. Проблеми та перспективи розвитку маршрутної мережі пасажирських перевезень у м. Вінниця // Наукові нотатки. – 2014. – Вип. 45. – С. 42–47.
15. Гриневич І. О., Бегерський Д. Б. Оптимізація маршрутної мережі громадського автотранспорту на прикладі м. Житомир // Матеріали наук.-практ. конф. ДУ «Житомирська політехніка». – 2020.
16. «Удосконалення системи міських пасажирських перевезень на основі інноваційних технологій» // Наукові праці НАУ (електронний ресурс). – Київ, 2019.
17. «Сучасні тенденції розвитку міського пасажирського транспорту» // Фаховий журнал (електронний ресурс, journals.urau.ua). – 2018.
18. Вовк Ю. Я., Цьонь О. П., Вовк І. П., Бігун Р. А., Зима І. М. Безпека транспорту в контексті глобальних цілей сталого розвитку 2030: Україна // Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: мат. XIV міжнар. наук.-практ. конф. – Кривий Ріг, 2019.
19. Боровик Н. А., Сив’юк Т. С. Якість транспортного обслуговування та попит споживачів транспортних послуг // Управління проєктами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2012. – Вип. 10. – С. 379–382.

20. Цьонь О.П., Плекан У.М. Сталий розвиток автомобільного транспорту: від ефективності до захисту інфраструктури. Тези XVII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» 21-23 жовтня 2024 року Житомир, с. 245-246.

21. Липак, М. Р., Цьонь, О. П., & Паскевич, Д. В. (2024). Розвиток міської транспортної інфраструктури в умовах урбанізації. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 217-217.

22. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.

23. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.