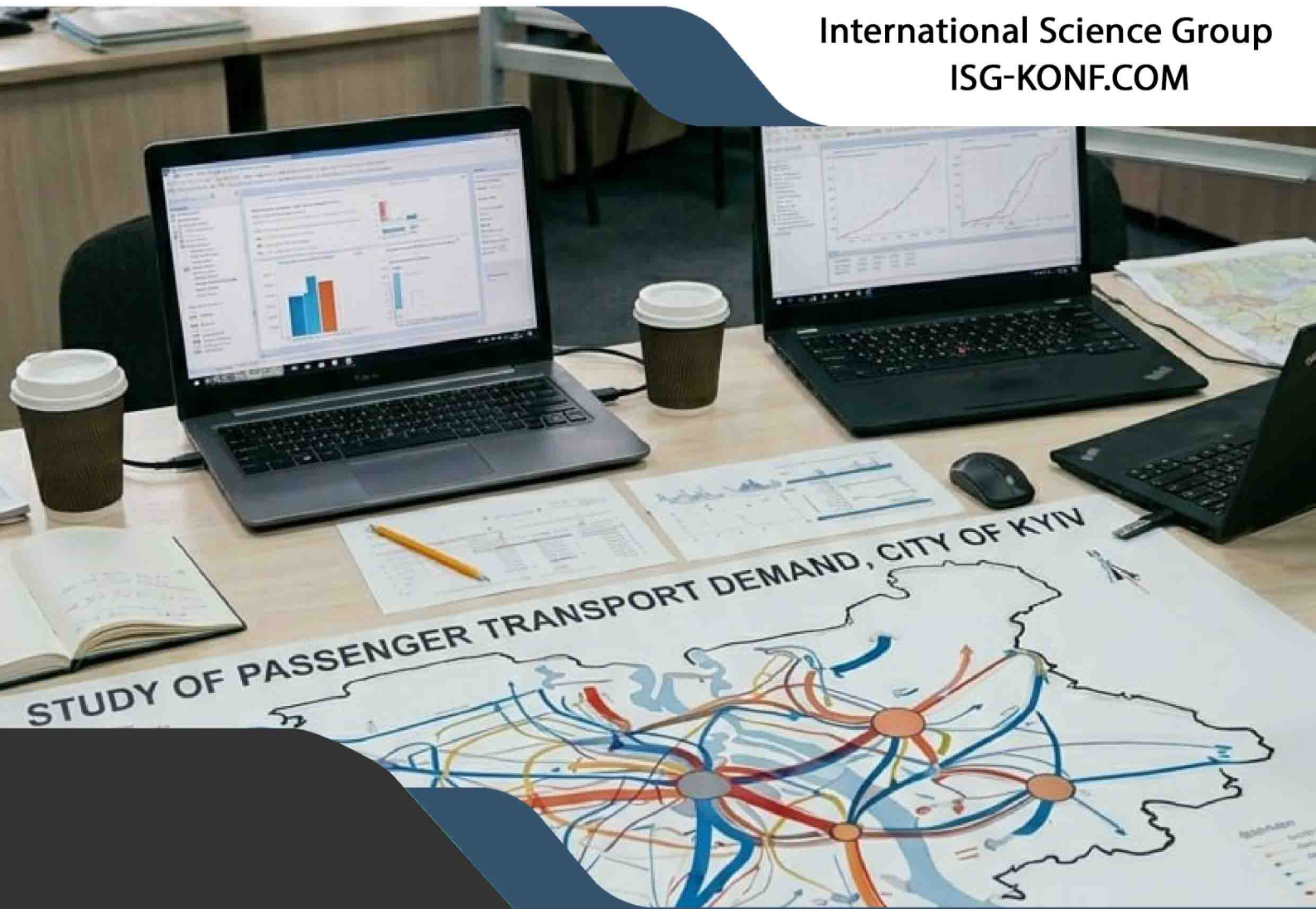




International Science Group
ISG-KONF.COM



ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ

ISBN 979-8-90383-427-3

DOI 10.46299/979-8-90383-427-3

Доля К.В., Доля О.Є.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ

Монографія

2026

UDC 656.13:656.025

Відомості про авторів

Олена Доля - кафедра інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна <https://orcid.org/0000-0002-0364-988X>

Костянтин Доля - кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна <https://orcid.org/0000-0002-4693-9158>

ISBN — 979-8-90383-427-3

DOI — 10.46299/979-8-90383-427-3

Опубліковано Primedia eLaunch

<https://primediaelaunch.com> Текст © 2026 International Science Group (isg-konf.com) та автори.

Ілюстрації © 2026 International Science Group та автори.

Дизайн обкладинки: International Science Group (isg-konf.com).

Усі права захищено. Надруковано у Сполучених Штатах Америки. Жодна частина цього видання не може бути відтворена, поширена чи передана в будь-якій формі або будь-якими засобами, а також збережена в базі даних чи системі пошуку без попереднього письмового дозволу видавця. За зміст і достовірність матеріалів відповідальність несуть автори. При використанні та запозиченні матеріалів обов'язкове посилання на видання.

Монографія поєднує теоретичні засади й прикладні інструменти аналізу пасажирських транспортних кореспонденцій, моделювання OD-потоків та керованого перерозподілу пасажирів у міських, приміських, міжміських і міжнародних системах перевезень. Окрему увагу приділено інтеграції класичних моделей із data-driven підходами та цифровими джерелами даних для підвищення надійності мережі, зменшення перевантаження й оптимізації пересадкових вузлів. Додатково висвітлено практичні підходи до сценарного перерозподілу попиту в пікові періоди та методи оцінювання стійкості маршрутної мережі до операційних збурень.

Видання рекомендоване як навчально-аналітичне джерело для здобувачів спеціальності J8 «Автомобільний транспорт», студентів, аспірантів і науково-педагогічних працівників, а також для фахівців із транспортного планування, управління рухом і розвитку міської мобільності. Матеріали можуть бути використані для підготовки курсових і магістерських робіт, виконання прикладних розрахунків та обґрунтування управлінських рішень у транспортних системах різного масштабу.

The recommended citation for this publication is:

Доля, О. Є., & Доля, К. В. (2026). Дослідження пасажирських транспортних кореспонденцій. Primedia eLaunch. <https://doi.org/10.46299/979-8-90383-427-3>

UDC 656.13:656.025

Анотація

У роботі комплексно досліджено пасажирські транспортні кореспонденції як методичну та прикладну основу прийняття рішень у міських, приміських, міжміських і міжрегіональних системах перевезень. Актуальність теми зумовлена тим, що в умовах зростання мобільності населення, нерівномірності добового попиту, обмеженості рухомого складу та фінансових ресурсів саме якість оцінювання та інтерпретації OD-структури визначає ефективність як стратегічного планування, так і щоденного операційного управління. Доведено, що транспортні кореспонденції не є суто статистичним продуктом; вони виконують функцію «керуючого шару» між попитом пасажирів і параметрами транспортної пропозиції, забезпечуючи обґрунтований вибір маршрутної конфігурації, частоти руху, політики пересадок, тарифних рішень та пріоритетів інвестицій.

Метою роботи є теоретичне узагальнення та практична систематизація підходів до формування, оцінювання і використання матриць кореспонденцій для керованого перерозподілу пасажиропотоків між маршрутами. Для досягнення мети розв'язано сукупність взаємопов'язаних завдань: проаналізовано класичні моделі попиту і їх обмеження; визначено роль гравітаційних залежностей у формуванні міжзонних потоків; досліджено поведінкову природу маршрутного вибору; обґрунтовано підходи до інтеграції цифрових джерел даних; сформовано перелік практичних KPI для валідації і моніторингу; запропоновано організаційну рамку впровадження OD-моделей у циклі управління транспортною системою.

Теоретичну основу дослідження становлять положення транспортного

планування щодо етапності моделювання попиту: генерація поїздок, розподіл за напрямками, вибір виду транспорту, призначення потоків на мережу. Показано, що помилки на етапі оцінювання OD-матриці мають мультиплікативний характер: навіть локальні зміщення у кореспонденціях призводять до системних перекосів у прогнозах завантаження, а відтак — до неефективних управлінських рішень щодо випуску, інтервалів і розподілу місткості. На цій підставі обґрунтовано перехід від «статичних» рідко оновлюваних матриць до динамічних постановок, які враховують часову неоднорідність попиту, поведінкову адаптацію пасажирів і мережеві каскадні ефекти.

Методологія роботи поєднує кілька взаємодоповнювальних блоків. Перший блок — гравітаційний, що описує силу міжзонної взаємодії через «маси» зон та узагальнені витрати досягнення. Другий блок — стохастичний вибір маршруту, який відображає імовірнісну природу поведінки пасажира в умовах множини альтернатив. Третій блок — оптимізаційний, орієнтований на кероване налаштування частот, пересадкових параметрів і розподілу ресурсів із урахуванням обмежень мережі. Четвертий блок — валідаційний, який передбачає перевірку моделі не лише за середньою похибкою, а за системою операційно значущих показників якості.

Окремо в роботі поглиблено поняття привабливості зони призначення та привабливості маршруту. Показано, що привабливість є багатоконпонентною категорією, яка включає концентрацію робочих місць, освітньо-сервісний потенціал, доступність пересадкових вузлів, надійність стикувань та комфорт повної поїздки. Саме тому однакова за масштабом транспортна інтервенція в різних частинах мережі дає різний результат перерозподілу: ефект визначається не тільки зміною часу чи тарифу, а й інтегральною «цінні-

стю досягнення» зони. Такий висновок має прикладну вагу для пріоритезації коридорів: першочерговими мають бути ті напрямки, де сумісно високі потенціал попиту, привабливість вузлів та чутливість користувачів до поліпшення сервісу.

Значну увагу приділено даним і практиці калібрування. Порівняно традиційні джерела (опитування, бортові обстеження, ручні підрахунки) з пасивними цифровими даними (AFC, GPS/AVL, мобільна аналітика). Доведено, що найвища стійкість моделі досягається при інтеграції кількох джерел у межах єдиної процедури узгодження з контролем зміщень вибірки. Запропоновано валідацію за набором КРІ: похибка потоків за контрольними перерізами, похибка пікового навантаження, похибка частки пересадочних поїздок, похибка повного часу подорожі, стабільність прогнозу на позабазових днях, а також показники мережевої вразливості. Такий підхід дозволяє уникнути хибної «ілюзії точності», коли модель коректна в середньому, але помиляється у критичних пікових зонах.

Практичні результати систематизовано за просторовими рівнями. Для міських систем ключовими факторами є регулярність інтервалів, надійність пересадок, пропускна здатність вузлів і динаміка пікового попиту. Для приміських систем домінують повний час «двері–двері», інтеграція підвезення з магістральними маршрутами та тарифна цілісність. Для міжміських і міжнародних напрямків вирішальними стають порогові ефекти міжвидової конкуренції, стійкість хабових стикувань і ризик каскадних затримок. На всіх рівнях підтверджено, що перерозподіл пасажирів має оцінюватися сценарно: базовий режим, піковий режим, режим збурень і режим відновлення попиту потребують окремих параметризацій.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні класичної OD-парадигми з data-driven підходами, мережевими індикаторами стійкості та регламентною логікою управління. На відміну від підходів, які обмежуються описом середніх потоків, запропонована рамка орієнтована на керуваність перерозподілу: тобто на здатність оператора не лише «бачити» попит, а й цілеспрямовано змінювати його структуру через узгоджені транспортні інтервенції. Практично це означає перехід від реактивного реагування на перевантаження до проактивного сценарного управління на основі верифікованих моделей.

Прикладна цінність результатів полягає у можливості впровадження в діяльність транспортних агенцій циклу: *збір даних* → *калібрування* → *сценарне тестування* → *пілот* → *постаудит* → *оновлення параметрів*. У роботі обгрунтовано доцільність трирівневого горизонту управління: операційного (доба/тиждень), тактичного (місяць) і стратегічного (квартал/півріччя). Саме така структура забезпечує одночасно чутливість до короткострокових змін і стійкість довгострокових рішень.

Отже, виконане дослідження підтверджує, що транспортні кореспонденції є системоутворювальним елементом сучасного управління пасажирськими перевезеннями. Їх практична ефективність визначається не тільки математичною коректністю побудови матриці, а й здатністю перетворити результати моделювання на конкретні регламенти дій: оптимізацію маршрутів, збалансований розподіл випуску, підвищення надійності стикувань і зменшення ризику каскадних перевантажень. Запропонований підхід формує методичну базу для підвищення доступності, надійності та якості транспортного обслуговування населення у системах різного масштабу.

Ключові слова: пасажирські транспортні кореспонденції, OD-матриця,

перерозподіл пасажиропотоків, маршрутний вибір, гравітаційна модель, привабливість зон, транспортні мережі, сценарне моделювання, валідація КРІ, управління громадським транспортом.

Зміст

Вступ	11
Фізичний зміст математичних залежностей та розшифрування по- значень	16
1 Транспортні кореспонденції	19
1.1 Висновки до розділу	28
2 Особливості пасажирських кореспонденцій	30
2.1 Методичні акценти оцінювання пасажирських кореспонден- цій	34
2.2 Прикладне значення для управління міською мобільністю .	36
2.3 Підсумкові положення щодо специфіки пасажирських OD- потоків	37
2.4 Висновки до розділу	38
3 Транспортні мережі пасажирських перевезень	40
3.1 Поглиблений огляд досліджень мереж пасажирського транс- порту	45
3.2 Практичні висновки для проектування мультимодальних систем	47
3.3 Висновки до розділу	51
4 Вплив транспорту на суспільство	53

4.1	Транспорт і соціальна інклюзія	54
4.2	Економічний і просторовий вплив пасажирського транспорту	55
4.3	Стійкість суспільства і кризова роль транспортної системи	56
4.4	Висновки до розділу	57
5	Ефективність транспортних мереж	58
5.1	Методичні підходи до оцінювання ефективності	59
5.2	Ефективність на рівні транспортної мережі	59
5.3	Ефективність на рівні окремого маршруту	60
5.4	Ефективність на країновому рівні	61
5.5	Практична рамка підвищення ефективності	62
5.6	Висновки до розділу	63
6	Формування пасажиропотоків	64
6.1	Теоретико-методична рамка формування пасажиропотоків	64
6.2	Закономірності формування міських пасажиропотоків . . .	65
6.3	Особливості формування приміських пасажиропотоків . .	66
6.4	Моделі формування міжміських пасажиропотоків	67
6.5	Формування міжнародних і міжконтинентальних пасажиро- потоків	68
6.6	Інтегрована модель і сценарний аналіз пасажиропотоків . .	69
6.7	Висновки до розділу	78

7	Перерозподіл пасажирів між маршрутами	79
7.1	Передумови та механізми перерозподілу пасажирів	79
7.2	Гравітаційне моделювання перерозподілу пасажирів	84
7.3	Привабливість маршрутів і зон: структура та оцінювання	90
7.4	Інтеграція гравітаційної моделі з маршрутним вибором	95
7.5	Динамічна адаптація пасажирів після інтервенцій	101
7.6	Візуалізація ключових ефектів перерозподілу	106
7.7	Висновки до розділу	121
8	Фактори формування привабливості	122
8.1	Теоретичні основи привабливості маршруту та інтегральні індекси	122
8.2	Час, комфорт, безпека, ціна та їхня нелінійна взаємодія у виборі маршруту	130
8.3	Мережева, просторова та динамічна модель формування привабливості	140
8.4	Калібрування, сценарне оцінювання та управлінські інтервенції	148
8.5	Висновки до розділу	153
	Висновки по роботі	155
	Список літератури	158

Вступ

Транспортна система сучасного міста та агломерації функціонує в умовах постійної зміни попиту, просторової структури зайнятості, режимів мобільності населення та технологічних можливостей обліку поїздок. У цих умовах питання коректного опису і прогнозування переміщень пасажирів набуває не лише наукового, а й безпосередньо управлінського значення. Будь-яке рішення щодо маршрутної мережі, інтервалів руху, пріоритету громадського транспорту, розміщення пересадкових вузлів або тарифної інтеграції фактично спирається на припущення про те, як саме формуються й перерозподіляються пасажирські потоки між зонами походження і призначення. Якщо ці припущення некоректні, система отримує накопичувальний ефект помилок: локальні невідповідності в даних перетворюються на системні втрати якості обслуговування, перевантаження окремих коридорів та неефективне використання ресурсів перевізника.

Центральним інструментом аналітики попиту є матриця транспортних кореспонденцій *origin–destination* (OD), яка відображає інтенсивність переміщень між територіальними зонами в заданому часовому інтервалі. Значення OD-підходу полягає в тому, що він дозволяє поєднати просторову структуру міста, поведінкові механізми вибору маршруту, характеристики транспортної мережі та операційні обмеження системи в єдиній формальній рамці. У прикладному сенсі OD-матриця є «мовою» взаємодії між стратегічним плануванням і диспетчерською практикою: саме через неї абстрактні моделі попиту трансформуються в конкретні рішення щодо випуску рухомого складу, узгодження пересадок, управління піковим навантаженням і оцінки результатів

змін у мережі.

Актуальність теми дослідження додатково підсилюється тим, що класичні методи обстежень (домогосподарські опитування, ручні підрахунки, бортові анкети) вже не забезпечують необхідної оперативності в середовищі швидких змін. Сучасні транспортні агенції дедалі більше покладаються на цифрові джерела даних: транзакції автоматизованої оплати, GPS/AVL-телеметрію, журнали руху, дані детекторів та агреговану мобільну аналітику. Однак саме зростання обсягу даних не гарантує якості рішень. Ключовою стає методична здатність інтегрувати різноманітні джерела, контролювати зміщення вибірки, коректно калібрувати моделі та валідувати результати в термінах управлінських KPI, а не тільки статистичних метрик помилки.

Окремою складністю є просторово-часова неоднорідність попиту. Поведінка пасажирів у ранковому піку, міжпіковому періоді та вечірньому піку має різні закономірності, а чутливість до часу очікування, надійності пересадок і тарифних параметрів істотно відрізняється між сегментами поїздки. Через це використання «середньодобових» уніфікованих матриць дедалі частіше призводить до помилкових висновків. У роботі прийнято позицію, що адекватне управління можливе лише за умови переходу до динамічних моделей, які відтворюють зміну попиту в часі та враховують адаптивний характер маршрутного вибору.

З методичної точки зору важливо також розуміти, що формування кореспонденцій і перерозподіл потоків не є ізольованими процесами. Зміна параметрів на одному маршруті (інтервал, траса, швидкість, тариф, пересадкове вікно) майже завжди породжує вторинні ефекти в суміжних коридорах, на фідерних лініях і у вузлах високої центральності. Така взаємозалежність

означає, що транспортну мережу необхідно розглядати як систему з внутрішнім зворотним зв'язком, де локальна інтервенція може спричиняти каскадний ефект. Саме тому в роботі значна увага приділена інтеграції OD-підходу з мережевими метриками стійкості та з моделями керованого перерозподілу пасажирів.

Теоретичну основу дослідження становить поєднання гравітаційної логіки міжзонної взаємодії, стохастичних моделей маршрутного вибору та оптимізаційних постановок операційного управління. Гравітаційний підхід дозволяє формалізувати вплив «мас» зон і узагальнених витрат на інтенсивність поїздок. Моделі вибору маршруту уточнюють, яким чином цей попит розподіляється між альтернативами в умовах відмінностей за часом, надійністю, комфортом і вартістю. Оптимізаційний блок переводить аналітичні висновки в прикладні регламенти: як розподілити випуск, які вузли посилювати, у яких коридорах очікувати критичне наближення до межі пропускнуої здатності та як оцінювати ефект від змін.

Мета дослідження — розробити узгоджену методичну рамку аналізу та використання пасажирських транспортних кореспонденцій для підвищення ефективності планування і управління транспортними мережами на різних просторових рівнях.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовано такі основні завдання:

- узагальнити сучасні підходи до побудови та оновлення OD-матриць у системах пасажирських перевезень;
- проаналізувати роль гравітаційних і поведінкових моделей у поясненні

формування кореспонденцій;

- дослідити механізми перерозподілу пасажирів між маршрутами та умови виникнення каскадних ефектів у мережі;
- обґрунтувати підхід до інтеграції традиційних і цифрових джерел даних у єдиній процедурі калібрування;
- сформувати систему валідації результатів на основі операційно релевантних КРІ;
- запропонувати практичну організаційну рамку впровадження OD-аналітики в цикл управління транспортною агенцією.

Об’єкт дослідження — процеси формування та перерозподілу пасажирських потоків у транспортних мережах.

Предмет дослідження — методи оцінювання OD-кореспонденцій, моделі маршрутного вибору та інструменти управлінського використання результатів моделювання.

Практична спрямованість роботи полягає в орієнтації на рішення, які можуть бути безпосередньо впроваджені у діяльність операторів перевезень та органів транспортного планування. Ідеться не лише про довгострокові інфраструктурні проекти, а й про швидкі тактичні й операційні заходи: перерозподіл випуску між коридорами, корекцію частот у пікових інтервалах, налаштування пересадкових вікон, пріоритезацію вузлів за критичністю та регулярний постаудит якості сервісу. Такий фокус дозволяє розглядати OD-моделювання не як «академічний модуль», а як постійно діючий елемент системи управління якістю транспортного обслуговування.

Структурно робота побудована за логікою послідовного переходу від теоретичних основ до прикладних механізмів. Спочатку розкрито базові поняття транспортних кореспонденцій і особливості їх часово-просторової природи. Далі розглянуто мережевий контекст пасажирських перевезень і соціально-економічні наслідки транспортних рішень. Наступні розділи присвячено ефективності мереж, формуванню пасажиропотоків і детальному аналізу перерозподілу між маршрутами з використанням гравітаційних і поведінкових моделей. Завершальні частини містять інтерпретацію результатів, рекомендації щодо валідації та практичні регламенти впровадження.

Таким чином, вступ окреслює ключову методичну позицію роботи: ефективне управління пасажирськими перевезеннями неможливе без системного, регулярно оновлюваного й валідаційно контрольованого аналізу транспортних кореспонденцій. Саме інтеграція OD-підходу, мережевого мислення, цифрових даних і сценарного управління формує підґрунтя для підвищення надійності, доступності та якості транспортної системи в умовах невизначеності.

Фізичний зміст математичних залежностей та розшифрування позначень

Щоб забезпечити однозначне трактування математичного апарату, у роботі всі формули інтерпретуються як моделі реальних фізичних, часових, поведінкових і організаційних процесів у транспортній системі. Тобто кожен вираз описує не абстрактну алгебраїчну конструкцію, а конкретний механізм: формування попиту, перерозподіл потоків, зміну швидкості руху, накопичення затримок, зміну сприйняття сервісу пасажирями та реакцію мережі на інтервенції оператора.

Узагальнено фізичний зміст формул у роботі зводиться до таких класів:

- **Балансові співвідношення:** відображають закон збереження пасажиропотоку (що входить у вузол, має вийти або перерозподілитися між маршрутами).
- **Гравітаційні залежності:** описують інтенсивність міжзонних переміщень як функцію «мас» зон і опору переміщенню (часу, вартості, відстані, пересадок).
- **Поведінкові моделі вибору:** задають імовірність вибору маршруту як результат порівняння узагальнених витрат і сприйнятої корисності альтернатив.
- **Динамічні рівняння:** формалізують зміну попиту та привабливості в часі, включаючи інерцію, адаптацію пасажирів і післяшочкове відновлення.

- **Оптимізаційні постановки:** задають вибір керованих параметрів (інтервали, тарифи, ресурси) за критеріями максимуму ефекту або мінімуму втрат при бюджетних та інфраструктурних обмеженнях.

Для уніфікації інтерпретації надалі прийнято таку фізичну семантику основних позначень:

- T — часові витрати (хв): поїздка, очікування, пересадка, затримка; фізично це тривалість перебування пасажира в транспортному процесі.
- C — грошові витрати (грн/ум. од.): тариф, сукупні транспортні витрати домогосподарства.
- F, x, q, v — потоки та навантаження (пас./год або пас./добу): фактична інтенсивність переміщення по дугах, маршрутах, вузлах.
- P — імовірність вибору альтернативи (безрозмірна величина від 0 до 1).
- U — узагальнена корисність маршруту; фізично це інтегральна міра «привабливості мінус витрати» у сприйнятті пасажира.
- G — узагальнена вартість поїздки; включає часові, тарифні, пересадкові, комфортні та ризикові складові.
- S — індекс безпеки (безрозмірний): відображає ризик інцидентів, конфліктів, небезпечних умов у поїзді.
- K — індекс комфорту (безрозмірний): фізично агрегує щільність у салоні, мікроклімат, плавність ходу, шум.

- R — надійність сервісу: імовірність дотримання графіка або успішної пересадки у допустимому часовому вікні.
- A — доступність: узагальнена характеристика досяжності робочих місць, сервісів і вузлів мережі.
- $\omega, \alpha, \beta, \theta, \lambda$ — параметри чутливості/ваги; вони показують, наскільки сильно конкретний фактор впливає на результат моделі.
- B — бюджетні або ресурсні ліміти; фізично це верхня межа доступних управлінських інтервенцій.

Важливо підкреслити, що складові формул мають зміст лише в узгодженій системі одиниць та часових горизонтів. Тому в роботі всі часові змінні інтерпретуються в межах єдиного експлуатаційного такту (доба/тиждень/місяць залежно від задачі), а потокові — в порівнюваних перерізах мережі. Саме така узгодженість дозволяє коректно порівнювати сценарії та уникати псевдоефектів, що виникають через різні бази нормування.

Таким чином, «що є що» у формулах визначається не лише символом, а його роллю в системі: *стан* (поточний попит, потік, час), *реакція* (вибір пасажира), *параметр чутливості* (вага фактора), *керуюча дія* (інтервенція оператора) та *обмеження* (ресурсні, інфраструктурні, безпекові). Саме в цій логіці далі подані всі аналітичні співвідношення монографії.

1 Транспортні кореспонденції

Транспортні кореспонденції (origin–destination, OD) є базовою категорією транспортного планування, оскільки саме вони формалізують обсяги переміщень пасажирів між зонами відправлення та прибуття. У практиці управління міською мобільністю OD-матриця виступає аналітичним ядром, через яке поєднуються демографічні характеристики території, просторове розміщення робочих місць, параметри транспортної мережі та поведінкові реакції користувачів [1, 2, 3]. Саме на основі коректно оцінених кореспонденцій приймаються рішення щодо конфігурації маршрутів, частоти руху, тарифної інтеграції та етапності інфраструктурних інвестицій.

У класичній структурі моделювання попиту OD-кореспонденції пов'язують етапи генерації поїздок із вибором виду транспорту та призначенням потоків на мережу. Через це помилки на етапі оцінювання матриці кореспонденцій мають мультиплікативний ефект: вони впливають і на прогноз завантаження, і на оцінку ефективності альтернативних сценаріїв розвитку мережі [4, 5]. Для складних транспортних систем, де інтервали руху, пересадкові зв'язки та часові обмеження суттєво змінюються протягом доби, значення OD-моделей лише зростає.

Узагальнена форма подання кореспонденцій у гравітаційному підході має вигляд

Подальша математична залежність подана у формулі (1).

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j f(c_{ij}), \quad (1)$$

де позначення відповідають прийнятій нотації моделі.

У формулі (1) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Історично першими джерелами для побудови матриць були вибіркові обстеження домогосподарств, бортові опитування та ручні транспортні підрахунки. Їх ключова перевага — змістовна глибина (мета поїздки, соціальні характеристики користувача, ланцюги переміщень). Однак такі обстеження є дорогими, нечастими та вразливими до похибок вибірки, через що в оперативному управлінні вони не завжди забезпечують актуальність [1, 2].

Як відповідь на ці обмеження сформувалися методи непрямого відновлення OD-матриць із потокових даних на дугах мережі. У цій постановці задача є оберненою: необхідно знайти таку матрицю кореспонденцій, яка водночас узгоджується зі спостереженнями та зберігає правдоподібну просторову структуру попиту. Класичні ентропійні моделі та метод узагальнених найменших квадратів лишаються фундаментом цієї школи [5, 8, 9].

Для застосування таких методів критично важливе налаштування ваг спостережень, оскільки різні джерела даних мають різну точність і охоплення. Наприклад, стаціонарні лічильники добре відтворюють потоки на окремих перерізах, але погано відображають поведінкові мотиви; натомість опитування дають семантику поїздок, проте мають обмежену просторово-часову репрезентативність. Поєднання джерел у межах єдиної оцінювальної процедури суттєво підвищує стійкість матриці [10, 11].

Міські кореспонденції зазвичай характеризуються високою повторюваністю та вираженою піковістю. На їх параметри впливають щільність забудови

дови, рівень поліцентричності, концентрація місць зайнятості та доступність пересадкових вузлів. Дослідження просторової структури міст показують, що зміни у транспортній інфраструктурі можуть суттєво переформатовувати шаблони щоденної мобільності [12, 13]. Це вимагає регулярного оновлення OD-матриць навіть за відсутності великих інфраструктурних проєктів.

Приміські кореспонденції мають іншу природу: більшу середню дальність, вищу чутливість до часу в дорозі та підвищений ризик автомобільної залежності. Тому для такого типу поїздок особливо важливою є інтеграція рішень «місто–передмістя»: узгоджені тарифи, координація розкладів, надійні вузли підвезення й зручні пересадки. Ігнорування цих чинників призводить до системного зниження попиту на громадський транспорт у приміській зоні [14, 15].

На міжрегіональному та міжнародному рівнях кореспонденції стають чутливими до мережевої зв'язності та надійності стикувань. Для таких систем характерні каскадні ефекти: локальні збої в ключових вузлах можуть впливати на великі території через перерозподіл потоків і затримок. Саме тому класичні OD-матриці дедалі частіше аналізуються разом із показниками мережевої стійкості та центральності вузлів [16, 17].

Суттєвий методичний прогрес пов'язаний з використанням пасивних цифрових даних: транзакцій автоматизованої оплати проїзду, GPS/AVL-телеметрії та мобільних даних. Порівняно з традиційними опитуваннями ці джерела забезпечують набагато вищу часову деталізацію, що відкриває можливість частого оновлення матриць у коротких циклах. Водночас вони потребують ретельної обробки: очищення аномалій, просторового зіставлення та реконструкції неповних траєкторій [18, 19, 20].

Data-driven підходи до оцінювання кореспонденцій останніми роками активно розвиваються і на рівні академічних досліджень, і в практиці операторів перевезень. Їх перевага полягає в гнучкості та адаптивності до змін попиту, однак для надійного впровадження необхідні строгі процедури валідації, контроль зміщень вибірки та перевірка переносимості моделі між різними періодами часу [21, 10].

В операційному управлінні роль кореспонденцій не обмежується прогнозом завантаження. Вони прямо впливають на рішення щодо розподілу рухомого складу, налаштування інтервалів, планування випуску в пікові періоди та оцінки якості сервісу. На стратегічному рівні OD-аналіз визначає пріоритети коридорів і вузлів, на тактичному — сценарії корекції маршрутної мережі, на операційному — процедури швидкого реагування на перевантаження [22, 23, 24].

Для практичної цінності моделі важливо, щоб результати OD-оцінювання були пов'язані з вимірними KPI системи: часом очікування, коефіцієнтом наповнення, часткою пересадочних поїздок, стабільністю інтервалів та надійністю прибуття. Така інтеграція дозволяє переводити аналітичні висновки в управлінські регламенти та робить моделювання інструментом реального підвищення якості обслуговування, а не лише академічною процедурою [3, 22].

Окреме значення має сценарний аналіз. Умови функціонування транспортних систем змінюються під впливом макроекономічних факторів, режимів зайнятості, сезонності та організаційних обмежень у мережі. Тому застосування єдиної «базової» матриці без аналізу альтернативних сценаріїв часто призводить до нестійких рішень. Натомість порівняння сценаріїв із перевіркою чутливості дозволяє формувати політики, що краще працюють в умовах

невизначеності [4, 2].

Отже, транспортні кореспонденції виступають центральною ланкою між попитом пасажирів і параметрами транспортної пропозиції. Їх сучасне трактування передбачає поєднання класичних статистичних підходів, цифрових джерел даних і регулярного операційного оновлення. Саме інтеграція цих компонентів забезпечує надійне планування, коректне управління ресурсами та стійке підвищення якості пасажирських перевезень у міських, приміських та міжрегіональних системах [1, 5, 21, 24].

Практика впровадження OD-моделей у транспортних агенціях показує, що найбільш ефективною є поетапна інтеграція аналітики в цикл управління перевезеннями. На першому етапі формується еталонна матриця кореспонденцій і виконується її верифікація за контрольними перерізами мережі та профілями наповнення маршрутів. На другому етапі проводиться сценарне моделювання керованих змін: корекція інтервалів, перегляд траси маршрутів, перерозподіл випуску рухомого складу між коридорами. На третьому етапі результати моделювання переводяться у сталі експлуатаційні регламенти з обов'язковим моніторингом KPI та періодичним оновленням моделі на нових даних [22, 23, 21].

Для прикладного планування важливо оцінювати не лише середні значення кореспонденцій, а й діапазон можливих відхилень попиту. Саме робота з невизначеністю дозволяє перейти від «точкових» рішень до стійких політик управління: застосування резервного випуску, гнучких схем підсилення на піках та адаптивного перерозподілу ресурсів між маршрутами. Такий підхід знижує ризик перевантаження, покращує надійність обслуговування і робить систему менш чутливою до короткострокових шоків мобільності [8, 11, 10].

Окремої уваги потребує узгодження результатів OD-аналізу з тарифною політикою та просторовою доступністю. Зміна тарифних правил, пересадочних вікон і зональних меж може суттєво перерозподіляти попит між маршрутами та видами транспорту. Тому кореспонденції доцільно використовувати не тільки для інженерного налаштування мережі, а й для оцінки соціальних наслідків рішень: доступності робочих місць, часових витрат домогосподарств і ризику транспортної нерівності для периферійних територій [14, 15, 24].

У практиці транспортного планування критично важливо розділяти калібрування, валідацію і постаудит. Калібрування підбирає параметри, валідація перевіряє перенесення на незалежні дні, постаудит оцінює фактичний ефект управлінського рішення після впровадження. Для цього зручно використовувати дворівневу схему помилок:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (2).

$$\mathcal{E} = \omega_f \mathcal{E}_{flow} + \omega_t \mathcal{E}_{time} + \omega_a \mathcal{E}_{attr}, \quad (2)$$

де \mathcal{E} — інтегральний показник похибки/точності моделі; \mathcal{E}_{flow} — інтегральний показник похибки/точності моделі; \mathcal{E}_{time} — інтегральний показник похибки/точності моделі; \mathcal{E}_{attr} — інтегральний показник похибки/точності моделі; ω_f — ваговий коефіцієнт складової; ω_t — ваговий коефіцієнт складової; ω_a — ваговий коефіцієнт складової; E — показник ефективності/похибки.

Співвідношення (2) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

$$\mathcal{E}_{flow} = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \left| \frac{x_a^{obs} - x_a^{mod}}{x_a^{obs}} \right|, \quad (3)$$

де \mathcal{E}_{flow} — інтегральний показник похибки/точності моделі; E — показник ефективності/похибки; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; a — індекс спостереження, елемента або сценарію; x_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (3) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (4).

$$\mathcal{E}_{time} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |T_n^{obs} - T_n^{mod}|, \quad (4)$$

де \mathcal{E}_{time} — інтегральний показник похибки/точності моделі; E — показник ефективності/похибки; N — змінна або параметр відповідної математичної моделі; n — індекс спостереження, елемента або сценарію; T_n — часова або транспортна характеристика.

У формулі (4) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Математичне представлення моделі подано у формулі (5).

$$\mathcal{E}_{attr} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R |\mathcal{A}_r^{obs} - \mathcal{A}_r^{mod}|. \quad (5)$$

де \mathcal{E}_{attr} — інтегральний показник похибки/точності моделі; \mathcal{A}_r^{obs} — спостережене (фактичне) значення показника; \mathcal{A}_r^{mod} — модельне (розрахункове) значення показника; E — показник ефективності/похибки; R — змінна або параметр відповідної математичної моделі; r — індекс спостереження, елемента або сценарію; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Співвідношення (5) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Для сценарного відбору рішень доцільно застосовувати критерій «багатокритеріальної корисності інтервенції»:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (6).

$$\Upsilon_k = \theta_1 \Delta \mathcal{A}_k + \theta_2 \Delta F_k - \theta_3 \Delta Cong_k - \theta_4 Cost_k + \theta_5 Eq_k, \quad (6)$$

де \mathcal{A}_k — індекс привабливості або доступності; Υ_k — інтегральна корисність сценарію; θ_1 — ваговий коефіцієнт критерію; Δ — приріст (зміна) відповідного показника; θ_2 — ваговий коефіцієнт критерію; θ_3 — ваговий коефіцієнт критерію; θ_4 — ваговий коефіцієнт критерію; θ_5 — ваговий коефіцієнт критерію; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; F_k — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (6) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати

числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Щоб уникнути переоптимізації під один базовий день, рекомендовано застосовувати робастну постановку:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (7).

$$\max_{\Delta y} \min_{s \in \mathcal{S}} \Upsilon(\Delta y, s), \quad (7)$$

де \mathcal{S} — множина сценаріїв функціонування системи; y — змінна або параметр відповідної математичної моделі; Δ — приріст (зміна) відповідного показника; Υ — інтегральна корисність сценарію; y — змінна або параметр відповідної математичної моделі; s — індекс спостереження, елемента або сценарію; S — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (7) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Експлуатаційна інтерпретація результатів має завершуватись регламентом оновлення параметрів:

Аналітичну інтерпретацію параметрів подано у формулі (8).

$$\Theta^{new} = \Theta^{old} + \kappa \left(\hat{\Theta} - \Theta^{old} \right), \quad (8)$$

де κ — коефіцієнт кроку оновлення параметрів.

Співвідношення (8) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає

в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

що забезпечує стабільне «підтягування» моделі без різких стрибків прогнозу.

У підсумку саме якісне калібрування і сценарне оцінювання перетворюють модель привабливості з теоретичного інструменту на робочу систему підтримки рішень для оператора. Це дозволяє обґрунтовано пріоритезувати інвестиції, узгоджувати тактичні зміни інтервалів і маршрутів та зменшувати ризик неефективних інтервенцій у мережі.

1.1 Висновки до розділу

Транспортні кореспонденції формують методичне ядро сучасного планування пасажирських перевезень, оскільки поєднують поведінкові характеристики попиту з параметрами транспортної мережі. Ефективність їх застосування визначається не лише математичною точністю оцінювання, а насамперед здатністю перетворювати результати аналізу на конкретні управлінські рішення. Для цього необхідне поєднання класичних методів побудови матриць, регулярного оновлення за цифровими джерелами та системної валідації на незалежних даних.

Таким чином, практична цінність OD-моделювання полягає у забезпеченні стійкого зв'язку між стратегічним плануванням, тактичним налаштуванням маршрутної мережі та операційним управлінням рухом. За такого підходу кореспонденції стають не окремим аналітичним продуктом, а постійним інструментом підвищення якості, надійності та доступності громадського транспорту.

Узагальнюючи викладене в розділі, доцільно підкреслити, що отримані результати мають не лише теоретичну, а й безпосередню прикладну цінність для управління транспортними системами. Сформована логіка аналізу дозволяє послідовно переходити від опису вихідних умов до обґрунтування конкретних управлінських рішень, які спрямовані на підвищення надійності, доступності та операційної стійкості мережі. Важливо, що результати слід інтерпретувати в часовому контексті: частина ефектів проявляється одразу, тоді як інша частина формується поступово через поведінкову адаптацію пасажирів і зміну міжзонних взаємодій.

Практичне значення висновків полягає в можливості їх прямої інтеграції в цикл планування «аналіз — сценарій — пілот — аудит — корекція». Така послідовність дає змогу знижувати ризик рішень, що спираються лише на середні показники, та зміщує фокус до керованості критичних режимів роботи системи. Для органів управління і операторів перевезень це означає підвищення точності пріоритезації інтервенцій, кращий розподіл ресурсів і більш прогнозований результат у пікові та збурені періоди. Отже, результати розділу формують цілісну методичну основу для подальшого впровадження в практику транспортного планування.

Узагальнюючи викладене в розділі, доцільно підкреслити, що отримані результати мають не лише теоретичну, а й безпосередню прикладну цінність для управління транспортними системами. Сформована логіка аналізу дозволяє послідовно переходити від опису вихідних умов до обґрунтування конкретних управлінських рішень, які спрямовані на підвищення надійності, доступності та операційної стійкості мережі. Важливо, що результати слід інтерпретувати в часовому контексті: частина ефектів проявляється одразу,

тоді як інша частина формується поступово через поведінкову адаптацію пасажирів і зміну міжзонних взаємодій.

Практичне значення висновків полягає в можливості їх прямої інтеграції в цикл планування «аналіз — сценарій — пілот — аудит — корекція». Така послідовність дає змогу знижувати ризик рішень, що спираються лише на середні показники, та зміщує фокус до керованості критичних режимів роботи системи. Для органів управління і операторів перевезень це означає підвищення точності пріоритезації інтервенцій, кращий розподіл ресурсів і більш прогнозований результат у пікові та збурені періоди. Отже, результати розділу формують цілісну методичну основу для подальшого впровадження в практику транспортного планування.

2 Особливості пасажирських кореспонденцій

Пасажирські кореспонденції відображають реальну структуру мобільності населення та виступають ключовим індикатором того, як транспортна система відповідає просторово-часовим потребам міста. На відміну від узагальнених показників пасажирообороту, матриця кореспонденцій дозволяє бачити конкретні напрямки переміщень між зонами, їх інтенсивність, добову нерівномірність і взаємозв'язок із функціональною структурою території. Саме тому в сучасному транспортному плануванні кореспонденції розглядаються як ядро аналітики попиту, яке з'єднує демографічні процеси, поведінкові моделі та параметри експлуатації мережі [25, 26].

Першою базовою особливістю пасажирських кореспонденцій є їх висока часово-просторова неоднорідність. Навіть у межах одного міста структура

поїздок суттєво відрізняється між ранковим піком, міжпіковим періодом і вечірнім піком, а також між будніми та вихідними днями. Це означає, що «середньодобова» матриця є лише грубим наближенням, яке не завжди придатне для оперативних рішень. Унаслідок цього зростає роль динамічних OD-підходів, що дозволяють відстежувати зміну попиту короткими часовими кроками і точніше налаштовувати пропозицію [27, 28].

Другою особливістю є чутливість кореспонденцій до узагальнених витрат поїздки. Для пасажера важливим є не лише час у русі, а й очікування, надійність інтервалу, кількість пересадок, доступність зупинок і передбачуваність подорожі. Тому навіть невеликі зміни сервісних параметрів можуть змінювати напрямки та обсяги потоків між зонами. У моделюванні це відображається через функції стримування попиту і параметри вибору маршруту/виду транспорту, які мають калібруватися на емпіричних даних [29, 30].

Третьою важливою характеристикою є структурна залежність кореспонденцій від міської форми. У поліцентричних агломераціях зростає частка міжпериферійних поїздок, тоді як у моноцентричних системах переважають радіальні переміщення до центральних зон. Ця відмінність має прямі наслідки для проектування маршрутної мережі: у першому випадку критичними стають хордові зв'язки та пересадкові контури, у другому — пропускна спроможність центральних коридорів і вузлів [31, 32].

Четверта особливість стосується приміських кореспонденцій, які поєднують вищу середню дальність поїздки, нерівномірну щільність попиту та підвищену конкуренцію з індивідуальним автомобільним транспортом. Для таких потоків особливо значущими є інтегровані рішення «місто–передмістя»: узгоджені тарифи, гарантовані пересадки, синхронізовані розклади і мультим-

одальні вузли. За відсутності інтеграції матриця попиту демонструє фрагментацію, а громадський транспорт втрачає частку навіть за наявності формально достатньої мережі [33, 34].

П'ятою особливістю є неповна спостережуваність пасажирських переміщень. Жодне окреме джерело даних не дає повної картини OD-зв'язків: опитування мають високу змістовність, але низьку частоту; лічильники точно фіксують потоки на перерізах, але не показують походження і призначення; транзакції AFC часто не містять інформації про висадку. Це обумовлює необхідність гібридних оцінювальних схем, де різні джерела узгоджуються в єдиній процедурі відновлення матриці [35, 36].

Шоста особливість — наявність невизначеності в оцінюванні кореспонденцій. Для інженерної практики недостатньо знати лише найімовірнішу матрицю; важливо розуміти діапазон її можливих відхилень і чутливість до похибок вхідних даних. Саме тому в сучасних дослідженнях застосовуються підходи, які дозволяють оцінювати стійкість результатів, порівнювати сценарії та уникати управлінських рішень, що добре працюють лише за «ідеального» набору припущень [37, 38].

Сьома особливість пов'язана з мережевими ефектами. Пасажирські кореспонденції не існують ізольовано: зміни в одному вузлі здатні перерозподіляти попит на суміжні коридори й пересадки. У великих системах це проявляється як каскадні ефекти, коли локальний збій призводить до системних наслідків для значної частини мережі. Тому при аналізі кореспонденцій доцільно поєднувати OD-матриці з мережевими метриками центральності, зв'язності та вразливості вузлів [39, 40].

Восьма особливість — операційна прикладність кореспонденцій. Для

транспортного оператора OD-матриця має цінність тоді, коли її можна безпосередньо перевести у рішення щодо інтервалів, випуску, пріоритетів і організації пересадок. У цьому контексті важливо пов'язувати модель з KPI якості: час очікування, наповнення, регулярність, частка пересадочних поїздок та надійність прибуття. Без такого зв'язку навіть статистично точна оцінка може залишитися управлінськи «німою» [41, 42].

Дев'ята особливість полягає у сценарній природі кореспонденцій. Пасажирські переміщення змінюються під впливом факторів, які складно описати однією стабільною моделлю: сезонність, режими зайнятості, подієве навантаження, ремонти інфраструктури, зміни тарифів. Через це в практиці планування доцільно працювати не з однією «базовою» матрицею, а з набором сценаріїв, які охоплюють реалістичні стани попиту. Такий підхід підвищує стійкість рішень на стратегічному й тактичному рівнях [43, 44].

Десята особливість — необхідність інституційної інтеграції OD-аналітики. Щоб кореспонденції реально впливали на якість перевезень, потрібні формалізовані процедури: періодичність оновлення матриці, стандартизований протокол валідації, визначений перелік контрольних індикаторів і механізм зворотного зв'язку між аналітикою та експлуатаційними службами. Лише за таких умов модель перестає бути разовим дослідженням і стає постійним інструментом управління попитом [45, 46].

Одинадцята особливість стосується соціального виміру пасажирських кореспонденцій. Матриці OD дають змогу оцінювати не лише транспортну ефективність, а й справедливість доступу до можливостей міста: робочих місць, освіти, медицини, адміністративних послуг. Зміни у мережі чи тарифах можуть непропорційно впливати на периферійні та вразливі групи населення,

тому аналіз кореспонденцій варто доповнювати оцінкою розподільчих ефектів і транспортної бідності [47, 48].

Дванадцята особливість полягає у зростанні ролі data-driven підходів, які дозволяють майже безперервно оновлювати OD-оцінки. Водночас їх застосування вимагає підвищеної методичної дисципліни: контролю якості даних, відслідковування зміщень вибірки, перевірки переносимості моделей у часі та прозорого документування процедур. Лише за дотримання цих умов алгоритмічні підходи дійсно покращують управлінську якість рішень, а не створюють хибне відчуття точності [25, 26].

Узагальнюючи, особливості пасажирських кореспонденцій можна звести до чотирьох взаємопов'язаних блоків: поведінкова чутливість попиту, неоднорідність простору-часу, обмежена спостережуваність даних і висока управлінська відповідальність за інтерпретацію результатів. Саме тому ефективне моделювання вимагає одночасного використання класичних транспортних теорій, сучасних цифрових даних і чітких інституційних процедур впровадження. Така інтегрована рамка забезпечує реальний перехід від формального розрахунку матриці до покращення якості пасажирських перевезень у щоденній практиці [27, 28].

2.1 Методичні акценти оцінювання пасажирських кореспонденцій

Для практичних розрахунків пасажирських кореспонденцій доцільно розділяти похибки на три групи: (1) похибки вхідних даних, (2) похибки модельної структури, (3) похибки експлуатаційної інтерпретації. Перша група пов'язана

з неповнотою і шумом у джерелах спостережень; друга — з припущеннями щодо поведінки пасажирів і форми функцій стримування; третя — з тим, як результати матриці переносяться у рішення про інтервали, випуск і конфігурацію маршрутів. Така декомпозиція дозволяє адресно знижувати невизначеність, а не компенсувати її «запасом» рухомого складу без аналітичного обґрунтування [29, 30].

Важливою методичною вимогою є узгодження зонування з характером рішень, які приймаються на основі моделі. Якщо мета полягає у стратегічному плануванні магістральних коридорів, допустиме укрупнення транспортних зон. Якщо ж модель використовується для оперативної оптимізації пересадкових вузлів або корекції зупинкових патернів, потрібна вища просторова деталізація. Невідповідність між масштабом моделі і масштабом управлінського рішення часто стає прихованою причиною низької практичної ефективності OD-аналізу [31, 32].

Ще один критичний аспект — часове агрегування. Для пасажирських перевезень саме «пікова» частина доби визначає якість обслуговування, а отже і суспільну оцінку роботи системи. Тому матриця, побудована на добовому усередненні, може бути формально коректною, але непридатною для управління наповненням у години максимуму. Практично виправданим є підхід із диференціацією щонайменше на ранковий пік, міжпіковий період, вечірній пік і пізню добу, із окремою валідацією кожного зрізу [33, 34].

З погляду валідації бажано застосовувати багаторівневу перевірку: глобальну (баланс відправлень/прибуттів), коридорну (відтворення потоків на ключових перерізах), вузлову (пересадочні обсяги) і сервісну (узгодженість із фактичними інтервалами та наповненням). Поєднання цих рівнів допомагає

відрізнити статистично прийнятну, але експлуатаційно слабку матрицю від матриці, яка дійсно може підтримувати рішення різних горизонтів планування [35, 36].

Окрему увагу слід приділяти оцінці ефектів перерозподілу попиту під час змін у мережі. Наприклад, запуск швидкісного маршруту або введення пріоритету на окремому коридорі може не тільки збільшити потоки на самому маршруті, а й суттєво змінити структуру пересадок на сусідніх напрямках. Без аналізу вторинних ефектів існує ризик локальної оптимізації, коли покращення на одній ділянці супроводжується погіршенням в іншій частині мережі [37, 38].

2.2 Прикладне значення для управління міською мобільністю

Управлінська цінність пасажирських кореспонденцій проявляється в тому, що вони дозволяють обґрунтувати пріоритети розвитку мережі за принципом «максимального ефекту для найбільшого обсягу поїздок». На стратегічному рівні це означає ідентифікацію OD-пар, де концентрується найбільший не-реалізований попит або спостерігається найбільший розрив між попитом і пропозицією. На тактичному рівні — вибір конкретних заходів: підсилення частоти, зміни маршрутної топології, оптимізація пересадок, корекція графіків. На операційному рівні — пріоритизацію швидких дій у пікові періоди [39, 40].

Крім технічного аспекту, OD-матриці мають важливий комунікаційний потенціал у взаємодії між аналітиками, перевізниками та органами управлі-

ння. На відміну від вузькоспеціалізованих метрик, кореспонденції легко інтерпретуються у формі «звідки–куди–скільки», що робить їх зручним інструментом для публічного обговорення рішень. Це особливо актуально в умовах, коли зміни маршрутної мережі викликають суспільний резонанс і потребують прозорого обґрунтування [41, 42].

Важливо також, що аналіз пасажирських кореспонденцій дозволяє поєднати транспортну і соціальну політику. Через OD-дані можна оцінювати, як змінюється доступність робочих місць для мешканців периферійних районів, наскільки скорочуються часові витрати для різних груп населення та чи не поглиблюються просторові диспропорції у доступі до послуг. Така інтеграція робить транспортне планування більш справедливим і орієнтованим на реальні потреби мешканців [43, 44].

У підсумку особливості пасажирських кореспонденцій полягають у поєднанні високої аналітичної складності та прямої практичної користі. Вони водночас є інструментом наукового моделювання і механізмом щоденного управління якістю перевезень. Саме тому їх системне використання — із регулярним оновленням, багаторівневою валідацією та сценарною перевіркою — має розглядатися як обов'язкова частина сучасної політики міської мобільності [45, 46].

2.3 Підсумкові положення щодо специфіки пасажирських OD-потоків

З позиції транспортного менеджменту найважливішою властивістю пасажирських кореспонденцій є їх здатність відображати «приховану» логіку пере-

мішень, яку неможливо виявити лише за валовими показниками перевезень. Дві системи можуть мати однаковий загальний пасажирообіг, але радикально відрізнятися за структурою OD-пар, а отже — вимагати різних рішень щодо мережі, інтервалів і пересадкових сценаріїв. Це підкреслює, що ефективність управління визначається не тільки обсягом перевезень, а і правильним розумінням напрямків та мотивів поїздок [47, 48].

У практичній площині це означає необхідність переходу від реактивного до проактивного управління попитом. Реактивна модель діє після появи перевантаження; проактивна — прогнозує зміну кореспонденцій і завчасно коригує параметри пропозиції. Ключовою передумовою такого переходу є регулярна аналітика OD-матриць у коротких циклах і включення результатів у диспетчерські та планувальні процедури як обов'язкового елемента прийняття рішень [25, 26].

Отже, особливості пасажирських кореспонденцій доцільно розглядати не як набір ізольованих характеристик, а як цілісну систему факторів, що визначає якість міської мобільності. Їх системне врахування створює підґрунтя для більш надійної, доступної та соціально збалансованої транспортної системи, здатної адаптуватися до змін попиту без втрати ефективності обслуговування [27, 28].

2.4 Висновки до розділу

У розділі показано, що пасажирські кореспонденції є динамічною характеристикою мобільності, яка чутливо реагує на просторову структуру міста, поведінкові особливості користувачів і параметри транспортної пропозиції. Саме тому їх аналіз має здійснюватися регулярно, з урахуванням часової

варіативності попиту та міжзонної неоднорідності поїздок.

Практично це означає, що управління мережею повинно переходити від реактивних рішень до проактивного сценарного підходу, де OD-аналітика використовується як основа для коригування інтервалів, пересадкових режимів і пріоритетів розвитку. Така логіка підвищує надійність перевезень, зменшує ризик локальних перевантажень і покращує доступність транспортних послуг для різних груп населення.

3 Транспортні мережі пасажирських перевезень

Транспортні мережі пасажирських перевезень у сучасному містобудівному та інфраструктурному плануванні розглядаються як багаторівневі системи, у яких взаємодіють фізична інфраструктура, експлуатаційні регламенти, поведінка користувачів і цифрові інструменти управління. У такій постановці мережа є не просто геометрією ліній і вузлів, а динамічним середовищем, де зміни в одному сегменті можуть впливати на доступність і надійність у всій системі [51, 52, 53]. Для пасажирських перевезень ключовим стає не максимізація локальної пропускної спроможності окремої лінії, а забезпечення узгодженості між видами транспорту на рівні повного ланцюга поїздки.

Концепція мультимодальності базується на принципі, що пасажир обирає не конкретний вид транспорту, а найкращу комбінацію режимів для досягнення цілі поїздки. Це означає, що оцінювати ефективність мережі потрібно через інтегральні показники: повний час «від дверей до дверей», кількість і якість пересадок, стабільність прибуття, інформаційну прозорість та доступність інфраструктури для різних груп населення [59, 69, 71]. У практиці планування саме така логіка дозволяє уникати ізольованих рішень, коли покращення на одному маршруті створює погіршення в суміжних сегментах мережі.

У теорії складних систем пасажирські мережі описуються як зважені графи, де вузли відповідають зупинкам, станціям і хабам, а ребра — транспортним зв'язкам із різною «вагою» (час, інтервал, пропускна спроможність, надійність). Дослідження показують, що такі мережі мають нерівномірну структуру центральності: частина вузлів акумулює непропорційно великі потоки,

формуючи критичні точки стійкості системи [49, 61, 62]. Звідси випливає практичний висновок: управління мережею повинно поєднувати дві цілі — високу ефективність у штатному режимі та робастність до локальних збоїв.

Для міських перевезень типовою є ієрархічна структура: магістральні види (метро, швидкісний трамвай, BRT) формують опорний каркас, тоді як автобусні і тролейбусні маршрути виконують функції підвезення і розподілу попиту у зонах дрібнішого покриття. Економічна та експлуатаційна доцільність цієї моделі підтверджується тим, що вона дозволяє узгодити високу провізну спроможність коридорів із просторовою гнучкістю наземної мережі [72, 68, 67]. Водночас ефект досягається лише за умови чіткої синхронізації інтервалів та мінімізації штрафу на пересадку.

Принципово важливою складовою мультимодальної мережі є транспортно-пересадкові вузли. Саме у вузлах відбувається перетворення окремих маршрутних підсистем у єдину мережу для пасажера. Якість вузла визначається не тільки геометричною компоновкою платформ і пішохідних зв'язків, а й часовою логікою: узгодженням графіків, резервами на нерегулярність, інформаційним супроводом і передбачуваністю переходів [58, 60, 64]. На практиці навіть незначне скорочення часу пересадки може забезпечувати помітний системний ефект за рахунок перерозподілу попиту на користь громадського транспорту.

Окрема методична проблема полягає в тому, що класичні одношарові моделі не відображають повної природи мультимодальних поїздок. Багатошарові підходи (multilayer networks) дозволяють явно моделювати взаємодію між транспортними режимами, включаючи ефекти конкуренції, комплементарності та каскадних порушень [52, 53, 54]. Для транспортних аналітиків це

відкриває можливість оцінювати не лише «короткі шляхи» в межах одного режиму, а й стійкість повних ланцюгів переміщення в умовах змін попиту чи інфраструктурних обмежень.

На рівні часової динаміки мережі ключовим викликом є узгодження пікових профілів різних видів транспорту. Наприклад, приміська залізниця, міський автобус і метро можуть мати різні фази навантаження навіть у межах одного ранкового піку. Якщо ці профілі не синхронізовані, система отримує надлишкові втрати часу на пересадках і підвищену волатильність пасажиропотоків [65, 66, 64]. Саме тому сучасні транспортні центри управління переходять від статичних розкладів до гнучких сценаріїв із коротким циклом коригування.

Практика цифровізації мереж громадського транспорту показує, що дані GPS/AVL, AFC і мобільні телеком-дані суттєво підвищують якість оперативної аналітики, але водночас вимагають стандартизації інтерфейсів та контролю якості даних. Неповнота, затримки або системні зміщення в джерелах можуть призводити до помилкових управлінських рішень навіть за наявності складних моделей [66, 65, 69]. Тому для мультимодальних мереж критичною стає не лише наявність даних, а й інституційна культура їх валідації та інтерпретації.

Для міжміських пасажирських перевезень мережевий ефект проявляється через поєднання авіаційних, залізничних, автобусних і міських «першої/останньої милі» компонентів. Кожен із цих сегментів має власну економіку і операційну логіку, але пасажир сприймає їх як єдину послугу мобільності. Через це стратегія розвитку міжміських мереж повинна передбачати інтегровані розклади, сумісні квиткові продукти, єдині цифрові сервіси мар-

шрутизації та гарантії стикування [51, 68, 67]. Без такої координації навіть високоякісні окремі сегменти не формують конкурентоспроможної системи в цілому.

Важливим напрямом оцінювання є також соціальна результативність мережі. Для пасажирських систем недостатньо досягнути лише високої середньої швидкості переміщення; необхідно забезпечити збалансовану доступність для районів із різним соціально-економічним профілем. Метрики просторової справедливості та транспортної доступності дають змогу виявляти зони ризику транспортної бідності і коригувати мережу з урахуванням інклюзивності [70, 69, 71]. Такий підхід є критичним для довгострокової стійкості міської мобільності.

З позиції управління ризиками транспортні мережі повинні проектуватися з урахуванням сценаріїв порушення: аварій, пікових перевантажень, ремонтних вікон, погодних аномалій. Дослідження мережевої робастності показують, що резервні зв'язки, модульність і альтернативні маршрути зменшують системну вразливість значно ефективніше, ніж просте нарощування пропускної спроможності окремих ділянок [49, 61, 63]. Для практики це означає необхідність регулярного stress-testing мережі на предмет стійкості до каскадних збоїв.

Окремо слід розглядати взаємодію громадського транспорту з мікромобільністю та пішохідною інфраструктурою. Хоча ці елементи часто трактуються як допоміжні, саме вони формують умови для ефективної першої та останньої милі, а отже суттєво впливають на загальну конкурентоспроможність мультимодальної мережі. Інтеграція велоінфраструктури, безпечних пішохідних зв'язків і сервісів спільної мобільності із вузлами громадсько-

го транспорту підвищує охоплення без пропорційного збільшення витрат на магістральну інфраструктуру [58, 59, 73].

З методичної точки зору аналіз транспортних мереж доцільно вести на трьох рівнях. Перший — структурний (топологія, центральність, щільність зв'язків). Другий — функціональний (час поїздки, надійність, пересадочні втрати, пропускна спроможність). Третій — поведінково-інституційний (реакція пасажирів на зміну сервісу, тарифні механізми, координація операторів). Лише поєднання цих рівнів дає коректне підґрунтя для управлінських рішень [55, 56, 72].

У практиці довгострокового планування транспортних мереж для пасажирських перевезень важливо уникати фрагментованого підходу, коли окремі проекти розглядаються без оцінки системного ефекту. Мережа має розвиватися як єдина архітектура мобільності, де кожне інфраструктурне або експлуатаційне рішення оцінюється за вкладом у цілісну якість сервісу: доступність, передбачуваність, швидкість, безпека та інклюзивність [51, 67, 73]. Це особливо актуально в умовах обмежених бюджетів, коли пріоритезація інвестицій визначає траєкторію розвитку системи на роки вперед.

Таким чином, транспортні мережі пасажирських перевезень необхідно трактувати як інтегровані мультимодальні системи зі складною динамічною взаємодією режимів. Ефективна мережа має поєднувати високу зв'язність, стійкість до збоїв, соціальну справедливість доступу та якісну організацію пересадок. Саме системне застосування мережевого аналізу, цифрових даних і міжоператорної координації забезпечує реальне підвищення якості пасажирських перевезень у міських та міжміських масштабах [52, 54, 69, 72, 73].

3.1 Поглиблений огляд досліджень мереж пасажирського транспорту

Аналіз наукових робіт останніх років демонструє, що методологія дослідження пасажирських мереж еволюціонувала від статичних топологічних моделей до інтегрованих динамічних підходів, у яких враховуються часові профілі попиту, стохастичність руху та поведінкові реакції користувачів. Ранні роботи концентрувалися на структурних характеристиках графа (ступені вузлів, середній шлях, кластеризація), але в подальших дослідженнях акцент зміщувався на функціональну ефективність та експлуатаційну стійкість системи [55, 56, 49]. Це дало змогу перейти від описового аналізу мереж до прикладних інструментів підтримки рішень.

Важливе місце у сучасній літературі займає підхід до мережі як до багатошарової структури, де кожен транспортний режим утворює окремий шар із власними обмеженнями та закономірностями. У цьому контексті доведено, що міжшарові зв'язки (переходи метро–автобус, автобус–трамвай, залізниця–міський транспорт) часто впливають на якість мобільності сильніше, ніж локальні покращення всередині окремого шару [52, 53, 54]. Для транспортної політики це означає, що інвестиції у вузли інтеграції можуть забезпечувати вищу системну віддачу, ніж фрагментарне нарощування інфраструктури одного виду транспорту.

Суттєвої уваги заслуговує питання робастності мережі до збурень. Емпіричні дослідження показують, що пасажирські системи зазвичай мають високу ефективність у штатному режимі, але вразливі до відмов ключових вузлів із високою центральністю. Порушення в таких точках призводять до каска-

дного зростання часу поїздки, перевантаження альтернативних коридорів і зниження надійності сервісу [61, 62, 63]. Саме тому у практиці стратегічного планування дедалі частіше застосовуються сценарії стрес-тестування мереж, які дозволяють оцінювати наслідки відмов ще до впровадження інфраструктурних рішень.

Окремий пласт досліджень стосується взаємодії планувальних і поведінкових факторів. У науковій літературі доведено, що сприймана якість пересадки (зручність переходу, безпека, інформаційна ясність) здатна впливати на вибір маршруту не менше, ніж чистий час руху. Це змінює класичне уявлення про оптимізацію мережі, оскільки в центрі опиняється не лише фізична інфраструктура, а і сервісний дизайн вузлів та маршрутних сценаріїв [58, 59, 60]. Для операторів це означає необхідність інтегрованого управління: інженерного, диспетчерського та клієнтського рівнів одночасно.

У частині даних і моделювання література фіксує швидкий перехід до високочастотних цифрових спостережень. Застосування GPS/AVL, валідаторних транзакцій і big data-аналітики дозволяє відстежувати мережеві процеси майже в реальному часі та оцінювати ефект управлінських змін у коротких циклах [65, 66, 64]. Водночас автори наголошують, що якість результатів залежить від стандартизації даних, коректної обробки пропусків і валідації моделей на незалежних вибірках.

На міжміському рівні науковий консенсус полягає в тому, що конкурентоспроможність пасажирських перевезень визначається не ізольованою ефективністю авіації, залізниці чи автобуса, а якістю їх взаємодії у наскрізному ланцюзі поїздки. Критично важливими є інтероперабельність квиткових рішень, цифрова інтеграція сервісів і надійність стикувань у часово чутли-

вих сценаріях [51, 68, 67]. Для національних транспортних систем це формує вимогу до єдиних стандартів координації операторів і даних.

Соціальний вимір мережевих досліджень також посилюється. Роботи з транспортної доступності демонструють, що одна й та сама конфігурація мережі може давати різні ефекти для центральних і периферійних районів, а також для груп населення з різними ресурсними обмеженнями [70, 69, 71]. Через це сучасні підходи до оцінювання транспортних мереж включають не тільки техніко-економічні, а й розподільчі критерії — щоб уникати поглиблення транспортної нерівності.

У підсумку літературний огляд підтверджує, що ефективна мережа пасажирських перевезень має поєднувати чотири властивості: структурну зв'язність, часову узгодженість, стійкість до порушень і соціальну інклюзивність. Саме комплексне врахування цих аспектів забезпечує перехід від «формально повної» мережі до мережі, яка реально працює для пасажирів у щоденному режимі [72, 73, 52, 49].

3.2 Практичні висновки для проектування мультимодальних систем

З погляду проектування транспортної системи результати огляду дозволяють сформулювати кілька прикладних принципів. По-перше, розвиток мережі має починатися з аналізу вузлів інтеграції, а не лише лінійних коридорів: саме вузли визначають реальну «склеюваність» режимів. По-друге, управління інтервалами потрібно синхронізувати між режимами на рівні пересадочних вікон, а не в межах ізольованих маршрутів. По-третє, резервна конфігурація

маршрутів повинна бути закладена заздалегідь як елемент робастності, а не реактивний захід після збою [61, 63, 66].

По-четверте, для підвищення якості рішень доцільно застосовувати дворівневий контур моделювання: стратегічний (інвестиційний, довгостроковий) і операційний (тижневий/добовий). Така архітектура дозволяє уникнути розриву між планом розвитку мережі та фактичним управлінням сервісом. По-п'яте, оцінювання ефективності повинно спиратися на набір узгоджених КРІ: доступність, час повної поїздки, стабільність прибуття, пересадочні втрати, індикатори справедливості доступу [59, 69, 72]. Саме такий набір метрик забезпечує баланс між продуктивністю мережі та суспільною цінністю перевезень.

Окремої уваги потребує методична постановка оцінювання мультимодальної мережі, оскільки саме від обраної системи метрик залежить якість подальших інвестиційних і диспетчерських рішень. У класичних підходах домінує середній час поїздки, однак для міських систем цього показника недостатньо: дві конфігурації мережі можуть мати близький середній час, але суттєво відрізнятися за надійністю, справедливістю доступу та чутливістю до збоїв. Тому доцільно застосовувати багатокритеріальний підхід, у якому техніко-економічні, сервісні та соціальні показники розглядаються одночасно [72, 59, 69].

На стратегічному рівні така система може бути представлена інтегральним індексом якості мережі, що агрегує нормовані показники доступності, швидкості, стабільності й покриття. У спрощеній формі це можна подати як:

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i \cdot I_i, \quad (9)$$

де Q — обсяг попиту або результативний показник; i — просторові індекси зон відправлення/призначення; n — індекс спостереження, елемента або сценарію; w_i — змінна або параметр відповідної математичної моделі; I_i — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У цьому співвідношенні подано формалізацію розрахунку, яка пов'язує вихідні параметри з підсумковим індикатором моделі. Такий запис дозволяє оцінити внесок кожної складової в кінцевий результат і використовувати отримані значення для порівняння альтернатив, інтерпретації динаміки показників та підготовки обґрунтованих управлінських рішень.

На операційному горизонті ключовим індикатором стає не стільки середній, скільки варіативний компонент часу поїздки. Дослідження експлуатаційної динаміки показують, що пасажир сприймає нестабільність інтервалів і непередбачувані пересадки як суттєвіший дискомфорт, ніж помірне зростання планового часу у стабільній системі [65, 64]. Відповідно, при оптимізації графіків доцільно мінімізувати не лише математичне сподівання часу, а й дисперсію інтервалів і запізнень у вузлах інтеграції.

Практика європейських міст свідчить, що найкращі результати дає модель «керованої узгодженості», коли пересадкові вікна задаються як цільові діапазони, а не як жорсткі фіксовані значення. Це дозволяє компенсувати стохастичні коливання дорожньої ситуації без повного руйнування синхронізації мережі. У такій моделі диспетчерські рішення мають прийматися за пріоритетом системного ефекту: інколи короткочасне утримання одного рейсу у хабі дає сумарно менші втрати часу для мережі, ніж суворе дотримання локального графіка на окремій лінії [64, 63].

Важливим напрямом є також поєднання транспортного моделювання з

просторовим аналізом міської структури. Мережа не існує ізольовано від землекористування: щільність забудови, полюси зайнятості, розташування соціальної інфраструктури й функціональна спеціалізація районів прямо впливають на конфігурацію попиту. Ігнорування цього зв'язку породжує типову проблему «інфраструктурної асиметрії», коли високопродуктивні коридори не забезпечують достатнього охоплення зон із соціально вразливими групами населення [67, 70, 73].

Звідси випливає управлінський висновок: мережеве планування повинно включати обов'язкову перевірку на територіальну справедливість доступу. На практиці це означає аналіз того, як змінюється час доїзду до ключових точок тяжіння (робота, освіта, медицина, адміністративні послуги) для різних районів і груп користувачів. Якщо модернізація підвищує середню продуктивність, але погіршує доступність для периферійних зон, така конфігурація не може вважатися стійкою у довгостроковій перспективі [69, 71].

Суттєвий потенціал для підвищення якості рішень формує використання великих масивів експлуатаційних даних. Поєднання GPS-треків, валідаторів, автоматизованого підрахунку пасажирів та даних мобільності дозволяє перейти від періодичного «знімка» мережі до режиму безперервного моніторингу. У цьому підході OD-матриця розглядається як часовий процес, що оновлюється в коротких інтервалах і підтримує адаптивне налаштування випуску рухомого складу, пріоритетів на перехрестях і режимів роботи пересадкових вузлів [66, 65].

Водночас цифровізація не усуває потреби у формалізованих сценаріях стійкості. Для міських систем доцільно завчасно моделювати щонайменше три класи порушень: локальний збій вузла, часткову втрату коридору та системне

перевантаження в пікові інтервали. Для кожного класу повинні бути визначені резервні маршрутні схеми, правила пріоритезації перевезень і протоколи інформування пасажирів. Саме підготовленість до сценарних відхилень, а не лише швидкість реагування «після факту», визначає реальну робастність мережі [49, 61, 50].

Додатковим критичним аспектом є інтеграція тарифної політики з мережевою логікою. Якщо система оплати штрафує пересадку, навіть технічно добре синхронізована мультимодальна мережа втрачає привабливість для користувача. Натомість тарифна інтеграція (часові квитки, безшовні пересадки, єдиний обліковий контур) підсилює ефект від інфраструктурних інвестицій і сприяє перерозподілу попиту від індивідуального авто до громадського транспорту. У такій постановці тариф стає не лише фінансовим інструментом, а механізмом керування мережевою поведінкою пасажирів.

Підсумовуючи, сучасна транспортна мережа пасажирських перевезень має розглядатися як керована адаптивна система, у якій просторова структура, операційна синхронізація, цифрова аналітика та соціальні цілі формують єдину рамку прийняття рішень. Лише поєднання цих компонентів забезпечує довгострокову ефективність: високу доступність, стабільну якість сервісу, стійкість до збоїв і справедливий розподіл транспортних можливостей між територіями міста.

3.3 Висновки до розділу

Результати розділу підтверджують, що ефективність пасажирської транспортної мережі визначається не окремими маршрутами, а узгодженістю всієї системи зв'язків, пересадкових вузлів і регламентів експлуатації. Ключовими

умовами якості є мультимодальна інтеграція, стабільність сервісу, тарифна узгодженість та сценарна готовність до збурень.

Для практики транспортного планування це означає необхідність поєднання стратегічного й операційного контурів управління на основі цифрових даних і багатокритеріальних КРІ. Такий підхід дозволяє підвищити доступність, знизити системну вразливість мережі та забезпечити більш справедливий просторовий розподіл транспортних можливостей.

4 Вплив транспорту на суспільство

У сучасній транспортній науці пасажирський транспорт розглядається не лише як інженерна система переміщення, а як базовий суспільний інститут, що визначає доступ населення до ключових життєвих можливостей. Рівень розвитку маршрутної мережі, якість пересадочних зв'язків, регулярність сполучення та тарифна доступність безпосередньо впливають на структуру зайнятості, освітню мобільність, доступ до медичних і адміністративних послуг. Отже, вплив транспорту має системний характер і виходить далеко за межі галузевих показників перевізної роботи [59, 44, 43].

Соціальна значущість пасажирських перевезень особливо чітко проявляється у великих міських агломераціях, де просторовий розподіл місць проживання і праці є нерівномірним. За відсутності якісного громадського транспорту просторові диспропорції перетворюються на соціальні бар'єри: зростає тривалість щоденних поїздок, погіршується доступність ринку праці для периферійних районів, посилюється транспортна вразливість домогосподарств із низькими доходами. Таким чином, транспортна політика фактично стає частиною політики соціальної інтеграції та територіальної справедливості [14, 15, 45].

Для суспільства принциповим є не стільки формальне існування маршрутної мережі, скільки її функціональна якість. Якщо інтервали нестабільні, пересадки неузгоджені, а інформаційний супровід слабкий, пасажир сприймає систему як ненадійну навіть за достатньої географічної щільності маршрутів. Унаслідок цього зростає частка вимушеної автомобілізації, що погіршує екологічні показники, посилює затори та підвищує непрямі суспільні витрати

часу [40, 41, 64].

4.1 Транспорт і соціальна інклюзія

Однією з ключових функцій пасажирського транспорту є забезпечення соціальної інклюзії. Для частини населення (молодь, люди старшого віку, люди з інвалідністю, домогосподарства без приватного авто) саме громадський транспорт є єдиним стабільним каналом доступу до базових послуг. Якість такого доступу визначає не лише транспортний комфорт, а й рівень фактичної участі громадян у соціально-економічному житті міста [44, 14, 59].

Важливо підкреслити, що транспортна інклюзія має не тільки просторовий, а й часовий вимір. Навіть за невеликої відстані до місця роботи чи навчання нерегулярність руху, довгі пересадки або обмежена робота мережі у вечірній час можуть суттєво знижувати реальну доступність можливостей. Тому сучасне планування дедалі більше орієнтується на цільові показники повної поїздки «від дверей до дверей», а не на ізольовані лінійні параметри маршруту [42, 41, 69].

Проблема транспортної інклюзії тісно пов'язана з якістю тарифної політики. Якщо система оплати не підтримує інтегровані пересадки або має непрозору структуру тарифів, це непропорційно погіршує становище пасажирів із низькою платоспроможністю. У результаті транспортні витрати займають надмірну частку бюджету домогосподарства, а соціально-економічна мобільність населення знижується. Звідси випливає вимога до тарифної політики: вона має бути не лише фінансово збалансованою, а й соціально чутливою [43, 44, 24].

4.2 Економічний і просторовий вплив пасажирського транспорту

У макроекономічному вимірі пасажирський транспорт виступає інфраструктурою продуктивності. Його ефективність визначає швидкість формування трудових зв'язків, доступ підприємств до робочої сили та узгодженість просторової структури економічної активності. За достатньої транспортної доступності зменшуються трансакційні витрати часу, розширюється ефективний ринок праці, підвищується гнучкість зайнятості. У протилежному випадку економіка несе приховані втрати через запізнення, зриви робочих графіків і зниження продуктивного часу населення [12, 13, 72].

Для міст із поліцентричною структурою особливо важливим є розвиток міжрайонних і хордних зв'язків, тоді як для моноцентричних систем критичними залишаються магістральні коридори та потужні пересадкові вузли. Неврахування цієї відмінності призводить до неефективного розподілу ресурсів: формально великі інвестиції не дають очікуваного ефекту у скороченні часу поїздок і покращенні доступності. Таким чином, соціальний вплив транспорту прямо залежить від просторової адекватності мережевих рішень [31, 32, 67].

Окремим аспектом є взаємозв'язок транспорту та житлової політики. Якщо зростання житлової забудови не супроводжується синхронним розвитком пасажирської інфраструктури, формується транспортно-просторова диспропорція: домогосподарства отримують доступне житло ціною надмірних часових і фінансових витрат на щоденну мобільність. Тому інтеграція транспортного та містобудівного планування є необхідною умовою зниження

соціальної нерівності у великих урбанізованих системах [67, 43, 45].

4.3 Стійкість суспільства і кризова роль транспортної системи

В умовах криз (економічних шоків, енергетичних обмежень, безпекових загроз) роль пасажирського транспорту різко посилюється. Система перевезень у таких умовах забезпечує не лише щоденну мобільність, а й безперервність функціонування критичних сервісів: медицини, освіти, муніципального управління, комунальної інфраструктури. Відповідно, транспортна надійність стає фактором суспільної стійкості, а не лише галузевої ефективності [66, 49, 61].

Особливе значення має підготовленість мережі до режимів пікового навантаження та порушень інфраструктури. Для цього необхідні резервні маршрутні контури, пріоритезація перевезень для критичних груп пасажирів, оперативна цифрова диспетчеризація та чіткі протоколи міжвідомчої координації. За відсутності таких елементів локальні порушення швидко перетворюються на системні збої, що негативно впливають на соціальну стабільність міста [63, 64, 65].

З точки зору державної політики це означає, що оцінювання транспортних програм має включати критерії робастності та кризової готовності поряд із традиційними показниками швидкості і витрат. Інакше транспортна система може бути «ефективною» у штатному режимі, але виявитися неготовою до сценаріїв підвищеної невизначеності. Саме поєднання повсякденної продуктивності та адаптивної стійкості визначає справжню суспільну цінність

пасажирського транспорту [49, 61, 66].

4.4 Висновки до розділу

Вплив пасажирського транспорту на суспільство має комплексний характер і проявляється через доступність базових послуг, рівень соціальної інклюзії, просторову інтеграцію ринку праці та стійкість міських систем до кризових збурень. Ефективність транспортної політики в цьому контексті визначається не лише обсягом перевезень, а здатністю мережі забезпечувати передбачувану, доступну і справедливу мобільність для різних груп населення.

Отже, сучасний підхід до розвитку пасажирських перевезень має спиратися на інтеграцію мережевого планування, тарифної політики, просторового розвитку та механізмів кризової готовності. Лише за такої умови транспортна система перетворюється на реальний інструмент підвищення якості життя, соціальної згуртованості та довгострокової стійкості суспільства.

5 Ефективність транспортних мереж

Ефективність транспортних мереж у пасажирських перевезеннях доцільно розглядати як інтегральну характеристику, що поєднує операційну результативність, мережеву узгодженість та суспільно-економічну віддачу. У практичному плануванні це означає, що оцінка не може обмежуватися лише показниками витрат перевізника або швидкості окремих ліній. Потрібна система метрик, яка одночасно відображає якість повної поїздки пасажирів, продуктивність використання ресурсів і вплив транспортної моделі на економічну динаміку міста та країни [74, 75, 89].

У наукових дослідженнях ефективності громадського транспорту виділяють щонайменше три рівні аналізу: рівень маршруту, рівень мережі та країновий рівень. На рівні маршруту домінують питання регулярності, собівартості, заповнюваності і стабільності графіка. На рівні мережі центральними стають пересадочна інтеграція, доступність ключових центрів тяжіння та стійкість до збурень. На країновому рівні оцінюється внесок транспортної системи в продуктивність ринку праці, бюджетну стійкість та енергоефективність мобільності [78, 83, 90].

Відмінність між цими рівнями принципова. Маршрут може демонструвати високу локальну результативність, але водночас погіршувати роботу мережі через дублювання, узгоджені пересадки або підвищення навантаження на вузли. Так само мережа, яка забезпечує хороші середні показники часу поїздки, може бути соціально неефективною через слабку доступність периферійних районів. Тому управлінські рішення мають проходити багаторівневу перевірку, а не базуватися на одному індикаторі [87, 59, 88].

5.1 Методичні підходи до оцінювання ефективності

Найбільш поширеними інструментами оцінки ефективності в пасажирському транспорті є Data Envelopment Analysis (DEA), стохастичний фронтір та моделі оптимізації мережі. DEA-підходи особливо корисні для порівняння операторів і маршрутів у неоднорідних умовах, оскільки дозволяють формувати «фронтір кращих практик» без жорстких передумов про функціональну форму виробничої залежності [74, 75, 76].

У маршруто-орієнтованих задачах важливою перевагою є route-based DEA моделі, які відокремлюють результативність окремої лінії від загальної результативності компанії. Це дозволяє точніше локалізувати проблеми й уникати ситуацій, коли середні показники оператора маскують неефективність конкретних маршрутів. У прикладному вимірі такий підхід підтримує адресні рішення щодо корекції інтервалів, схеми обслуговування та структури випуску рухомого складу [78, 79, 80].

Для мережевого проектування критичними є моделі з урахуванням невизначеності попиту та взаємодії спільних ділянок. Стохастичні та робастні постановки забезпечують кращу адаптивність системи до коливань попиту і знижують ризик рішень, ефективних лише в «середньому» сценарії. Саме ця властивість стає визначальною у великих агломераціях, де коливання попиту мають виражений часовий та просторовий характер [84, 85, 86].

5.2 Ефективність на рівні транспортної мережі

На мережевому рівні головним об'єктом оцінки є повна поїздка пасажирів, а не окремий рейс. Це означає, що ефективність формується сукупністю скла-

дових: доступом до зупинки, очікуванням, поїздкою, пересадкою, надійністю прибуття та інформаційною передбачуваністю сервісу. Мережа є ефективною тоді, коли мінімізує узагальнені витрати поїздки для більшості OD-пар і одночасно зберігає стійкість до локальних збоїв [59, 87, 83].

У мультимодальних системах ключовим чинником виступає якість вузлів інтеграції. Невідповідність інтервалів на стиках режимів, тривалі пішохідні переходи або низька якість інформування здатні нівелювати переваги навіть швидкісних магістральних ліній. Тому підвищення мережевої ефективності часто досягається не тільки інфраструктурним розширенням, а й синхронізацією часових і просторових параметрів пересадки [87, 88, 59].

Практично доцільно використовувати набір узгоджених мережевих КРІ: середній повний час поїздки, варіативність часу прибуття, частка поїздок з пересадками різної глибини, індекс доступності робочих місць у заданих часових межах, частка пасажирів із дотриманим цільовим стандартом сервісу. Така система краще відображає реальну ефективність мережі, ніж ізольовані показники швидкості або виручки [75, 90, 89].

5.3 Ефективність на рівні окремого маршруту

Маршрутний рівень оцінювання концентрується на відповідності між ресурсами та результатом: витрати рухомого складу, праці й енергії порівнюються з обсягом перевезень, регулярністю та стабільністю сервісу. Водночас сучасна практика показує, що маршрутну ефективність не можна тлумачити поза контекстом мережі, оскільки лінія може бути фінансово «сильною», але системно нерациональною через дублювання або низький інтеграційний внесок [81, 82, 78].

Для коректного управління маршрутом доцільно структурувати показники у три блоки: (1) операційний (інтервал, пунктуальність, швидкість, скасування), (2) економічний (собівартість пасажиро-кілометра, дохідність, потреба у дотації), (3) мережевий (роль у пересадочному контурі, доступність хабів, рівень дублювання). Такий підхід дає змогу формувати збалансовані рішення й уникати помилок, коли оптимізація одного параметра погіршує загальний результат [79, 80, 75].

DEA-кейси демонструють, що значну частку неефективності можна зняти організаційними змінами без великих капітальних інвестицій: перерозподілом випуску за часовими профілями попиту, корекцією довжини маршруту, синхронізацією пересадок у піках, оптимізацією обігу рухомого складу. Саме ці заходи становлять «першу хвилю» підвищення ефективності, після якої доцільно переходити до інфраструктурних рішень [81, 82, 77].

5.4 Ефективність на країновому рівні

Країновий рівень ефективності відображає здатність транспортної системи підтримувати макроекономічну продуктивність і соціальну стійкість. Слабка пасажирська мобільність підвищує втрати робочого часу, звужує фактичний ринок праці, погіршує узгодження між місцем проживання і зайнятості. У підсумку це впливає на динаміку ВВП, податкову базу та бюджетне навантаження на систему соціальної підтримки [89, 90, 59].

Суттєвим аспектом є енергетична ефективність національної транспортної моделі. Системи з розвиненим громадським транспортом мають нижчу енергоємність на одного пасажера, вищу стійкість до цінових шоків на паливо та більш прогнозовану структуру витрат домогосподарств. Це знижує

вразливість економіки до зовнішніх коливань і підтримує фіскальну стабільність у середньостроковій перспективі [89, 90, 75].

Окремої уваги потребує оцінка транспортних інвестицій за повним життєвим циклом. Капітальні проекти, що не мають довгострокового операційного забезпечення, швидко втрачають ефективність і формують відкладені бюджетні ризики. Тому країнові програми повинні поєднувати інвестиційне планування з чіткою моделлю експлуатаційного фінансування, KPI-якістю сервісу та регулярним постаудитом фактичних ефектів [75, 76, 83].

5.5 Практична рамка підвищення ефективності

Для системного підвищення ефективності доцільно застосовувати послідовну рамку управління: діагностика, стратифікація маршрутів, сценарне моделювання, пілотне впровадження, постаудит. На етапі діагностики формується базовий профіль системи за узгодженими KPI; на етапі стратифікації маршрути розділяються за функціональною роллю (магістральні, підвізні, соціально необхідні); на етапі сценарного моделювання оцінюються альтернативи частот, трас і пересадкових вікон [75, 78, 86].

Пілотне впровадження дає змогу перевірити чутливість системи до змін без масштабних ризиків, а постаудит порівнює прогностичні та фактичні результати й формує інституційну пам'ять для наступних рішень. Такий цикл особливо важливий для міст із динамічним попитом, де статичні одноразові реформи швидко втрачають актуальність. Регулярне оновлення параметрів мережі на основі даних експлуатації є обов'язковою умовою довгострокової ефективності [83, 87, 88].

Важливо, що в умовах бюджетних обмежень найбільшу віддачу ча-

сто дають не найдорожчі проекти, а рішення з високим співвідношенням «суспільний ефект / витрати»: синхронізація пересадок, пріоритезація руху громадського транспорту, оптимізація розкладної структури, стандартизація сервісних вимог у контрактах із операторами. Такий підхід дозволяє швидко підвищувати якість мобільності без непропорційного зростання фінансового навантаження [81, 77, 74].

Додатково методична база підвищення ефективності посилюється оглядовими роботами з проектування маршрутних мереж, еластичності попиту та поведінкових чинників переходу користувачів до громадського транспорту. Використання цих результатів у практичному плануванні допомагає узгодити інженерні рішення з фактичною реакцією пасажирів і підвищити точність оцінки довгострокових ефектів реформ [91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98].

5.6 Висновки до розділу

Ефективність транспортних мереж є багаторівневою характеристикою, що має оцінюватися одночасно на рівні маршруту, мережі та країни. Локальна результативність окремої лінії не гарантує системної ефективності, а короткострокова економія без урахування доступності та стійкості може створювати довгострокові втрати.

Комплексний підхід, що поєднує DEA-аналіз, мережеві метрики, сценарне моделювання та постаудит політик, формує надійну методичну основу для керованого підвищення ефективності пасажирського транспорту. За такого підходу транспортна система виконує роль стратегічного активу, який підтримує продуктивність економіки, соціальну інтеграцію і стійкість держави.

6 Формування пасажиропотоків

Формування пасажиропотоків є багаторівневим процесом, у якому поєднуються просторові характеристики розселення, структура зайнятості, якість транспортної пропозиції, поведінкові параметри користувачів та зовнішні обмеження (економічні, регуляторні, епідеміологічні, енергетичні). У сучасній науковій традиції пасажиропотік розглядається не як статичний підсумок обліку, а як динамічний результат взаємодії попиту та мережевої доступності у конкретному часовому вікні [103, 105, 107].

На відміну від спрощених підходів, де попит задається екзогенно, сучасні моделі передбачають ендогенне формування потоків: пасажир одночасно реагує на час у дорозі, надійність, пересадковий штраф, ціну, насиченість салону та ризик невизначеності. Саме тому якісне моделювання пасажиропотоків вимагає комбінування поведінкових, мережевих і статистичних методів, а також постійного оновлення параметрів за фактичними цифровими слідами мобільності [101, 102, 110].

6.1 Теоретико-методична рамка формування пасажиропотоків

Узагальнено процес формування пасажиропотоків доцільно описувати ланцюгом: *джерела активності* → *потреби у переміщенні* → *вибір часу та напрямку* → *вибір маршруту і виду транспорту* → *реалізований потік*. Така постановка дозволяє інтегрувати класичні моделі попиту з data-driven компонентами, зокрема з реконструкцією OD-матриць за транзакційними даними та телеметрією [99, 100, 112].

У прикладних задачах найкращі результати зазвичай дає гібридний підхід: базова структура попиту оцінюється на історичних даних, після чого модуль короткострокового коригування враховує оперативні зміни (пікові коливання, події, ремонтні вікна, сезонність). Для операторів це критично, бо дозволяє перейти від «середнього дня» до керованої адаптації пропозиції в режимі майже реального часу [111, 109, 104].

6.2 Закономірності формування міських пасажиропотоків

У межах міста формування потоків визначається насамперед щільністю забудови, функціональним зонуванням та топологією маршрутної мережі. Центри зайнятості й освітні кластери генерують концентровані напрямки поїздок, тоді як житлові масиви формують хвилеподібні ранкові та вечірні «вкиди» попиту. Просторово-часова асиметрія таких переміщень створює нерівномірність навантаження, що не може бути якісно описана лише середньодобовими величинами [101, 103, 106].

Суттєвий внесок у розуміння міських потоків дає аналіз транзакцій автоматизованої оплати проїзду. Smart card дані дозволяють деталізувати не тільки обсяг поїздок, а й послідовності пересадок, часову стійкість маршрутних звичок і просторові патерни повернення. На цій основі підвищується якість калібрування OD-матриць, а управлінські рішення щодо частот і підсилення маршрутів стають набагато точнішими [99, 100, 107].

Окремий виклик у містах — *переплетення планових і спонтанних поїздок*. Регулярні трудові та навчальні поїздки співіснують із варіативними поїздками сервісного та дозвіллевого характеру, які мають вищу еластичність до затримок та якості інформаційного сервісу. Тому в сучасних системах

керування пасажиропотоками важливо поєднувати стабільні «магістральні» схеми обслуговування з адаптивними інструментами оперативного реагування [105, 110, 109].

Емпіричні дослідження також показують, що перевантаження на ключових пересадкових вузлах суттєво змінює траєкторії переміщень: пасажирів переходять на довші, але більш передбачувані маршрути. Це означає, що фактичне формування потоку залежить не лише від найкоротшого шляху, а від очікуваної надійності повної поїздки. Саме тому для міських мереж критично важливі інструменти прогнозування ризику затримок і перенавантаження станцій [102, 103, 104].

6.3 Особливості формування приміських пасажиропотоків

Приміські потоки мають специфічний механізм формування: висока середня дальність поїздки, більша прив'язка до графіка роботи та сильніша залежність від надійності стикування з міським транспортом. Порушення координації «підвезення–магістраль» швидко трансформується у втрати попиту через перехід частини користувачів на індивідуальний транспорт [108, 117, 120].

Ключовим елементом для приміської зони є вузли інтеграції (станції пересадки, park&ride, bus&rail інтерфейси). Формування потоків у таких вузлах визначається не лише частотою рейсів, а й розподілом часу очікування, надійністю підходу та пропускнуою здатністю пішохідних підходів. Саме ці фактори часто пояснюють, чому формально «швидкі» схеми поїздки програють більш стабільним альтернативам [124, 112, 109].

Приміські системи також виявляють вищу чутливість до тарифної архітектури. Зональні бар'єри та неузгоджені правила пересадки можуть дефор-

мувати пасажиропотоки сильніше, ніж помірне збільшення часу в дорозі. Тому для коректного моделювання формування приміських потоків тарифні сценарії мають розглядатися разом із розкладною синхронізацією, а не ізольовано [106, 113, 114].

6.4 Моделі формування міжміських пасажиропотоків

На міжміському рівні формування потоків визначається насамперед конкуренцією між альтернативними коридорами та видами транспорту (залізниця, автобус, авіація, приватне авто). Рішення пасажира тут більш «проектне»: воно включає завчасне планування, порівняння повної вартості та оцінку надійності прибуття. Тому міжміські потоки демонструють іншу структуру еластичності, ніж міські або приміські [113, 114, 115].

Окрему роль відіграє ефект високошвидкісної залізниці: поява або модернізація HSR-коридору змінює не лише розподіл пасажирів між режимами, а й просторову конфігурацію поїздок через «стиснення» відстані у сприйнятті користувачів. За рахунок цього виникає перерозподіл ділових і освітніх переміщень, а також зростає частка комбінованих ланцюгів «місто–агломерація–місто» [116, 113, 114].

Методично для міжміських систем виправдано застосовувати сценарне моделювання з чутливістю до часу, ціни й частоти. Фіксація «одного» прогнозу без інтервалу невизначеності створює високий ризик похибок у плануванні інфраструктурної пропозиції. Натомість багатосценарний підхід дозволяє формувати стійкі рішення для інвестицій і експлуатації маршрутів [115, 116, 125].

6.5 Формування міжнародних і міжконтинентальних пасажиропотоків

Міжнародні й міжконтинентальні потоки формуються в умовах багаторівневої мережевої ієрархії, де критичну роль відіграють хаби, хвильова структура розкладів і стійкість транзитних стикувань. Для цих систем характерна висока чутливість до порушень у вузлових аеропортах: локальні збої масштабуються на великі відстані через каскадний перерозподіл пасажирів [118, 121, 122].

Аналіз глобальних авіаційних мереж демонструє, що формування міжконтинентальних потоків відбувається не лише за принципом географічної близькості, а через структуру зв'язності альянсів, глибину хабової централізації та часову синхронізацію хвиль прибуття/вильоту. Це потребує моделей, які одночасно враховують топологію мережі та поведінкові параметри пасажирського вибору [118, 119, 123].

Після глобальних шоків попит у міжнародному сегменті відновлюється нерівномірно: швидше для маршрутів із високою економічною взаємодією і повільніше для напрямків із залежністю від сезонного туризму. Через це формування потоків має виражений фазовий характер, а оцінка стійкості мережі повинна виконуватись на декількох часових горизонтах одночасно [121, 122, 120].

Для міжконтинентальних перевезень особливо важливі моделі прогнозування із урахуванням рідкісних, але сильних подій (зміни режимів доступу, геополітичні обмеження, стрибки цін на паливо). Використання чисто екстраполяційних підходів у цьому сегменті є недостатнім; потрібне поєднання мережевого аналізу, економічних драйверів і сценарної експертизи

[123, 125, 122].

6.6 Інтегрована модель і сценарний аналіз пасажиропотоків

З урахуванням масштабної неоднорідності перевезень доцільно використовувати інтегровану багаторівневу модель, у якій міський, приміський, міжміський і міжнародний сегменти пов'язані через спільні вузли та обмеження пропускної здатності. Концептуально така модель має поєднувати: (1) модуль генерації поїздок, (2) модуль часового розподілу, (3) модуль вибору маршруту/режиму, (4) модуль мережевого призначення, (5) модуль зворотного калібрування на спостереженнях [107, 103, 102].

У практичній реалізації інтеграція досягається через поетапне оновлення параметрів: короткострокові параметри (попит за годинами, стани вузлів, перенавантаження) оновлюються часто, довгострокові (просторова структура попиту, дохідна еластичність, тарифна чутливість) — у середньострокових циклах. Така архітектура зменшує ризик «дрейфу» моделі та підвищує її переносимість між періодами [110, 109, 104].

Окремою вимогою є валідація на різних рівнях агрегації: якщо модель правильно відтворює сумарний потік, але помиляється у вузлах пересадки, вона непридатна для операційного управління. Тому валідаційний контур має включати як системні КРІ, так і локальні показники якості у критичних перерізах мережі [101, 124, 112].

Математична формалізація процесу формування потоків Для формального опису формування пасажиропотоків доцільно використовувати ієрархічну постановку, у якій загальний попит між зонами i та j у момент часу t

подається як

$$Q_{ij}(t) = G_{ij}(t) \cdot P_{ij}(t) \cdot R_{ij}(t), \quad (10)$$

де t — часовий індекс.

У цьому співвідношенні подано формалізацію розрахунку, яка пов'язує вихідні параметри з підсумковим індикатором моделі. Такий запис дозволяє оцінити внесок кожної складової в кінцевий результат і використовувати отримані значення для порівняння альтернатив, інтерпретації динаміки показників та підготовки обґрунтованих управлінських рішень.

На міському і приміському рівнях модуль $R_{ij}(t)$ доцільно деталізувати через узагальнені витрати повної поїздки:

$$C_{ij} = \alpha_1 T_{in-veh} + \alpha_2 T_{wait} + \alpha_3 T_{transfer} + \alpha_4 \sigma_{arr} + \alpha_5 Fare + \alpha_6 Crowd, \quad (11)$$

де α_1 — параметр чутливості моделі; α_2 — параметр чутливості моделі; α_3 — параметр чутливості моделі; α_4 — параметр чутливості моделі; σ_{arr} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; α_5 — параметр чутливості моделі; α_6 — параметр чутливості моделі.

У цьому співвідношенні подано формалізацію розрахунку, яка пов'язує вихідні параметри з підсумковим індикатором моделі. Такий запис дозволяє оцінити внесок кожної складової в кінцевий результат і використовувати отримані значення для порівняння альтернатив, інтерпретації динаміки показників та підготовки обґрунтованих управлінських рішень.

Для міжміських і міжнародних сегментів доцільно розширювати фун-

кцію витрат блоком надійності стикування та штрафом за ризик зриву поїздки. Це особливо важливо для напрямків з пересадками через хаби, де невелике порушення локального графіка може спричинити суттєве подовження повного часу подорожі. Включення такого блоку у модель значно покращує відтворення фактичної траєкторії перерозподілу попиту в умовах збурень [121, 122, 123].

Дані для моделювання та їх узгодження Сучасна практика формування пасажиропотоків спирається на комбінацію принаймні чотирьох класів даних: транзакційні (AFC/квиток), телеметричні (AVL/GPS), інфраструктурні (граф, розклади, місткість) та соціально-економічні (зайнятість, населення, генератори поїздок). Кожен клас має власні сильні сторони і власні джерела похибок, тому критичним є не стільки окремий масив, скільки коректне злиття даних у єдиному часово-просторовому каркасі [99, 100, 112].

У міських умовах ключовою процедурою є реконструкція «неповної поїздки», коли дані фіксують вхід у систему, але не містять прямої ознаки виходу або не дають повної картини пересадкових ланцюгів. Типова стратегія — використання правил поведінкової правдоподібності разом із мережевими обмеженнями (максимально допустимий час, допустима кількість пересадок, часові вікна синхронізації). Це зменшує системні зміщення в OD-матрицях та покращує якість прогнозу локальних перевантажень [101, 105, 107].

Для приміських та міжміських систем особливо важливо синхронізувати «швидкі» та «повільні» дані. Наприклад, годинні флуктуації потоку мають поєднуватись із довшими циклами зміни попиту (навчальний календар, сезонність, періоди відпусток). Без такої синхронізації модель або переоцінює

короткострокову волатильність, або не встигає реагувати на структурні зрушення. Практика показує, що дворівневе оновлення параметрів (операційне + структурне) є більш стійким за одношарові схеми [108, 113, 115].

На міжнародному і міжконтинентальному рівнях критичною стає проблема порівнюваності даних між юрисдикціями, операторами та часовими зонами. Для аналітичної узгодженості потрібне приведення до спільного стандарту подання часу, класифікації рейсів та нормування пропускної здатності вузлів. Без цього інтегроване моделювання глобальних потоків втрачає інтерпретованість, а оцінки стійкості мережі стають нестабільними [118, 119, 122].

Механізми просторово-часової дифузії попиту Формування пасажиропотоків має виражений ефект дифузії: зміна параметрів у одному сегменті мережі (наприклад, скорочення інтервалу на магістральній лінії) поступово перерозподіляє потоки на суміжних гілках, у пересадкових вузлах і навіть у сусідніх транспортних підсистемах. Через це будь-яка локальна оптимізація повинна оцінюватися через системні зовнішні ефекти, інакше ризик «перенесення проблеми» на іншу ділянку залишається високим [102, 103, 110].

У приміських і міжміських коридорах дифузія попиту часто проявляється як зміна часового профілю: замість повного відтоку з маршруту спостерігається зсув частини пасажирів у сусідні часові вікна заради більш надійного стикування. Така поведінка має прямі наслідки для планування графіка: підсилення тільки «пікового» рейсу може бути менш ефективним, ніж стабілізація інтервалу в передпіковій зоні [108, 114, 124].

На міжнародному рівні дифузія відбувається переважно через хабову перебудову: зміни в одному вузлі зміщують транзитні потоки між конкуру-

ючими хабами на інших континентах. Внаслідок цього ефективно управління міжконтинентальними потоками потребує не тільки локальної оптимізації слотів, а й моніторингу мережевої центральності та резервної зв'язності системи [118, 121, 123].

Сценарії формування пасажиропотоків за рівнями системи Для міської системи базовими є щонайменше три типи сценаріїв: (1) *операційний* (корекція частот, розподіл випуску), (2) *мережевий* (зміни маршрутної топології, пересадкові вікна), (3) *сервісний* (інформація, керування посадкою, пріоритезація руху). Поєднання цих сценаріїв дає набагато вищий ефект, ніж ізольовані заходи в одній площині [109, 105, 104].

Для приміської системи обов'язковими є сценарії «раннього підсилення» і «пізнього розвантаження», оскільки структура попиту в таких мережах менш симетрична, ніж у міському ядрі. Додатково необхідно моделювати сценарій деградації стикувань (навіть короткочасної), бо саме він часто має найбільший вплив на втрату пасажирів у довших ланцюгах поїздки [108, 117, 120].

Для міжміських перевезень доцільно формувати сценарії за принципом конкуренції режимів: «часова перевага», «цінова перевага», «надійність переваги». Такий підхід дозволяє оцінити не лише загальний обсяг потоку, а й структуру перетоку між видами транспорту при зміні окремих параметрів політики [113, 115, 116].

Для міжнародних і міжконтинентальних перевезень потрібно додавати сценарії мережевих збоїв: часткова втрата вузла, падіння пропускної здатності коридору, асиметричне відновлення попиту за макрорегіонами. Саме ці сценарії дозволяють оцінити запас стійкості мережі і підготувати протоколи

пріоритетного перерозподілу пасажирів [122, 121, 125].

Калібрування, валідація та KPI формування потоків Надійна оцінка формування пасажиропотоків потребує багатоступеневого калібрування: спочатку відтворюються агреговані потоки між крупними зонами, потім уточнюються локальні параметри в критичних вузлах, після чого перевіряється динаміка коротких часових кроків. Якщо цей порядок порушити, модель може демонструвати «добрий» загальний fit, але залишатися непридатною для практичних рішень щодо розкладів і резервів рухомого складу [107, 103, 102].

Для операційної валідації рекомендовано використовувати мінімум п'ять взаємодоповнювальних KPI: середня абсолютна похибка потоку за перерізами, похибка пікового навантаження, похибка частки пересадочних поїздок, похибка часу повної поїздки, стійкість прогнозу на позабазових днях. Комбінація саме таких індикаторів дозволяє уникнути ілюзії точності, коли модель «в середньому» правильна, але помиляється у критичних точках [101, 124, 110].

На міжміському і міжнародному рівнях до цього переліку додаються KPI транзитної надійності: частка збережених стикувань, індекс каскадної затримки та показник перерозподілу на альтернативні хаби. Використання таких метрик суттєво підвищує практичну цінність моделювання для диспетчерських і стратегічних рішень [123, 118, 122].

Організаційна рамка впровадження в транспортних агенціях Щоб моделі формування пасажиропотоків працювали як інструмент управління, а не як одноразовий аналітичний продукт, транспортна агенція має впровадити циклічну рамку: *збір даних* → *калібрування* → *сценарне тестування* → *пілот* →

постаудит → *оновлення параметрів*. Циклічність є критичною, бо структура пасажиропотоків змінюється швидше, ніж інфраструктура [111, 109, 125].

На рівні управління даними доцільно закріпити єдиний довідник сутностей (зупинка, станція, вузол, маршрут, рейс, коридор) і протокол версіювання моделей. Це дає змогу відтворювати рішення, порівнювати ефекти між періодами та уникати втрати знань при зміні команд. Для великих систем така дисципліна часто визначає успіх впровадження більше, ніж вибір конкретного алгоритму прогнозу [112, 110, 107].

Окремо необхідно формалізувати межі застосування моделі: у яких діапазонах попиту та за яких режимів роботи мережі прогнози залишаються надійними. Така практика дозволяє відокремити штатні операційні задачі від кризових умов, де потрібні спеціальні протоколи ручного управління і прискореного перегляду параметрів [121, 120, 125].

Практичні наслідки для планування Для міських операторів ключовим результатом моделювання формування потоків є можливість адресного управління випуском рухомого складу за короткими часовими інтервалами. Це дозволяє зменшувати перевантаження без диспропорційного зростання витрат і підвищувати стабільність сервісу в пікові періоди [105, 102, 109].

Для приміських і міжміських агенцій важливим стає узгодження розкладів, тарифів і пересадкових вікон у логіці «єдиного ланцюга поїздки». За відсутності такої координації навіть значні інвестиції у рухомий склад не дають повного ефекту, оскільки частина потенційного попиту не конвертується у фактичний потік [108, 113, 115].

На міжнародному рівні практична цінність моделей полягає у підтрим-

ці рішень щодо управління хабами, слотами і резервами пропускної здатності. Для міжконтинентальних перевезень це прямо пов'язано зі стійкістю системи до каскадних затримок та збереженням сервісної надійності в умовах нерівномірного відновлення попиту [118, 121, 122].

Прикладна інтерпретація результатів за типами територій Для великих міст із поліцентричною структурою формування пасажиропотоків зазвичай має «багатопіковий» характер: окрім класичних ранкового і вечірнього піків, формується додатковий міжпіковий попит між діловими та сервісними кластерами. Якщо модель не виділяє ці підпотоки окремо, то ресурси часто помилково концентруються лише на радіальних напрямках, а реальні навантаження в поперечних зв'язках недооцінюються [101, 102, 103].

У середніх містах критичним чинником стає чутливість потоку до надійності інтервалу, а не лише до середнього часу поїздки. Практика показує, що пасажирі охоче приймають помірно довший маршрут, якщо він має стабільний графік і передбачувану пересадку. Тому для таких систем найвищий ефект часто дають заходи з дисципліни руху, стандартизації розкладу та інформаційного супроводу, а не лише збільшення швидкості на окремих ділянках [105, 109, 110].

Для приміських зон навколо агломерацій головним ризиком є «розрив ланцюга» на межі систем: окремо оптимізований приміський сегмент і окремо оптимізований міський сегмент можуть сумарно формувати неефективну повну поїздку. У таких умовах доцільно оцінювати не продуктивність кожного оператора окремо, а наскрізний показник генерації та утримання пасажиропотоку в межах єдиної поїздки від дверей до дверей [108, 124, 117].

Для міжміських коридорів із конкуренцією «HSR–авто–автобус–авіація» інтерпретація результатів має враховувати поріг переключення попиту. Невеликі зміни узагальнених витрат можуть майже не впливати на потік до досягнення критичного порогу, після чого відбувається різкий перерозподіл між видами транспорту. Це пояснює, чому частина інфраструктурних рішень дає відкладений, але потім швидкий ефект [113, 114, 115].

Для міжнародних і міжконтинентальних перевезень прикладна інтерпретація має враховувати асиметрію напрямків: одна й та сама пара вузлів може демонструвати різну стійкість потоків у протилежних напрямках через відмінності в стикуванні хвиль, структурі транзиту та профілі попиту. Тому рішення щодо слотів, резервів і пріоритетів відновлення не можна приймати за симетричними припущеннями, навіть якщо сумарний обсяг потоку виглядає збалансованим [119, 123, 120].

Рекомендований регламент оновлення моделі пасажиропотоків Для підтримки актуальності моделей доцільно фіксувати три цикли оновлення. Перший — щоденний або щотижневий операційний цикл (контроль відхилень, короткостроковий прогноз, диспетчерські корекції). Другий — щомісячний тактичний цикл (перегляд частот, оцінка вузлів перевантаження, уточнення пересадкових вікон). Третій — кварталний або піврічний стратегічний цикл (переоцінка структурних параметрів попиту, сценарний аналіз і пріоритезація інвестицій) [107, 104, 125].

Кожен цикл має завершуватися формалізованим постаудитом, де зіставляються прогнозні та фактичні значення не тільки обсягу потоку, а й показників якості повної поїздки. Такий підхід переводить моделювання з

академічної площини в управлінську: рішення стають повторюваними, порівнюваними і підконтрольними за результатом [112, 111, 110].

Важливим елементом регламенту є окремий протокол для «аномальних» періодів: масові події, тимчасові інфраструктурні обмеження, різкі зміни міжнародної доступності. У таких випадках модель має переходити в режим прискореного пере-калібрування, де ваги недавніх спостережень підвищуються, а історичні патерни використовуються з меншим пріоритетом [121, 122, 120].

6.7 Висновки до розділу

Формування пасажиропотоків у міських, приміських, міжміських, міжнародних і міжконтинентальних перевезеннях має спільну логіку, але різну структуру домінантних факторів. Для міста критичними є щільність, пересадкова інтеграція і пікова динаміка; для приміської зони — надійність стикувань і тарифна цілісність; для міжміського сегмента — конкуренція режимів та часово-цінова еластичність; для міжнародного і міжконтинентального — хабова топологія, мережеві каскади та сценарна стійкість.

Отже, ефективне управління пасажиропотоками потребує інтегрованого багаторівневого підходу: поєднання OD-аналітики, цифрових джерел даних, мережевого моделювання та регулярної багаторівневої валідації. Саме така рамка дозволяє перетворити аналіз попиту на інструмент практичного підвищення надійності, доступності та продуктивності транспортної системи на всіх просторових рівнях [99, 107, 125].

7 Перерозподіл пасажирів між маршрутами

Перерозподіл пасажирів між маршрутами є не побічним ефектом, а базовою закономірністю функціонування будь-якої транспортної мережі. Пасажир не «прив'язаний» назавжди до одного маршруту: він постійно порівнює альтернативи за часом, очікуванням, кількістю пересадок, вартістю, ризиком зриву стикування та передбачуваністю подорожі. Якщо співвідношення цих параметрів змінюється, змінюється й структура потоків. Саме тому перерозподіл є ключем до практичного управління мережею: через нього оператор або зменшує перевантаження, або, навпаки, провокує каскадні проблеми [128, 130, 131, 109, 102].

У роботах Долі К. В. перерозподіл розглядається як системний процес, у якому локальна зміна параметрів маршруту (інтервал, траса, вузол пересадки, інтеграція з іншими видами) призводить до нелокальної реакції всієї мережі. Це означає, що ефективне рішення не може будуватися за логікою «покращимо один маршрут і побачимо ефект лише там». Насправді ефект виникає у вигляді мережевої хвилі: частина пасажирів переходить на нову альтернативу, змінює навантаження вузлів, змінює очікування і для інших пасажирів, які також переглядають свій вибір [126, 132, 129, 103].

7.1 Передумови та механізми перерозподілу пасажирів

У практиці транспортного планування передумови перерозподілу доцільно класифікувати також за рівнем керованості. До керування належать інтервал руху, розклад, пересадкова політика, інформаційний супровід, тарифні правила, конфігурація зупинок та

пріоритет руху на перехрестях. До

textitчастково керованих — зміна графіка активності великих роботодавців, шкільні та університетські режими, режим роботи торговельних і сервісних об'єктів, сезонні подієві піки. До

textitслабко керованих — погодні та екстремальні фактори, короткострокові макроекономічні коливання, поведінкові хвилі, пов'язані з інформаційним середовищем. Таке групування важливе для проектування інтервенцій: оператор повинен розуміти, де результат досягається прямим налаштуванням мережі, а де потрібні міжвідомчі узгодження і сценарний запас стійкості.

Важливою характеристикою механізмів перерозподілу є їх часовий профіль. Частина реакцій має

textitмиттєвий характер (переорієнтація пасажирів у межах доби після зміни інтервалу), інша має

textitнакопичувальний характер (адаптація до нового пересадкового вузла чи нової схеми тарифу), а ще частина —

textitвідкладений (переміщення центрів активності домогосподарств і бізнесу). Саме тому однакові за масштабом транспортні зміни можуть давати принципово різний видимий ефект у перші дні, через місяць і через квартал. У дослідницькій практиці це означає необхідність роздільного аналізу короткого та середнього горизонту, щоб не змішувати операційну реакцію з поведінковою адаптацією.

Ще один принциповий аспект — інформаційна прозорість. Пасажир обирає не лише за «фізичними» параметрами маршруту, а й за очікуваною надійністю, яку він оцінює через мобільні застосунки, табло, досвід попередніх поїздок і соціальні рекомендації. Якщо реальна якість маршруту покращилась,

але інформаційно це не відображено, перерозподіл буде повільним. Якщо ж інформаційний контур працює добре, навіть помірне операційне покращення дає сильніший перетік попиту. Звідси випливає практичний висновок: цифровий сервіс інформування є не допоміжною, а структурною частиною механізму перерозподілу пасажиропотоків.

У великих агломераціях механізми перерозподілу посилюються багатомодальною конкуренцією. Пасажир порівнює не тільки альтернативні маршрути одного виду транспорту, а й альтернативні текститланцюги поїздки: автобус + метро, автобус + міська електричка, park-and-ride, мікромобільність + магістральна лінія тощо. Тому локальне рішення щодо одного маршруту часто змінює частки відразу в кількох підсистемах. Для уникнення помилкових висновків треба оцінювати перерозподіл на рівні повного шляху «двері–двері», а не тільки на рівні окремого перегону.

З позиції управління ризиками доцільно виокремлювати текститбажаний та текститнебажаний перерозподіл. Бажаним є перетік із перевантажених коридорів до резервних потужностей за збереження прийнятної якості поїздки. Небажаним є перетік, що зменшує перевантаження в одній точці, але створює «вузьке місце» у пересадковому вузлі чи на фідерному плечі. Практично це означає, що кожна інтервенція має супроводжуватися перевіркою вторинних ефектів на суміжних ділянках мережі та в пікових часових вікнах.

Методично коректна робота з передумовами перерозподілу передбачає багаторівневий набір індикаторів. На рівні OD-пар це зміна інтенсивності міжзонних зв'язків; на рівні маршруту — зміна частки пасажирів і пікового коефіцієнта заповнення; на рівні вузла — зміна часу пересадки та надійно-

сті стикувань; на рівні системи — зміна середнього повного часу поїздки й мережевої стійкості. Лише така ієрархія метрик дозволяє відрізнити «косметичний» ефект від структурного переформатування мобільності.

Завершуючи, слід підкреслити, що перерозподіл є не одноразовою подією, а керованим процесом у межах циклу «інтервенція — спостереження — корекція». Саме циклічність дає можливість поступово формувати бажану конфігурацію потоків без надлишкових капітальних витрат і без погіршення доступності для вразливих груп населення. Тому у прикладній постановці підрозділу передумови й механізми мають розглядатися як основа регламентної політики транспортного оператора, а не як допоміжний теоретичний блок.

Причини перерозподілу можна згрупувати у п'ять блоків.

Перший блок — *часові причини*: скорочення інтервалу, підвищення швидкості сполучення, виділені смуги, оптимізація затримок на вузлах. Якщо повний час поїздки зменшується навіть на кілька хвилин, це часто дає значущий перехід частки попиту на оновлений маршрут.

Другий блок — *надійність*: для пасажера важлива не лише середня тривалість, а й її розкид. Маршрут із трохи більшим середнім часом, але стабільним прибуттям, у пікові години може стати домінуючим.

Третій блок — *пересадкова інтеграція*: синхронізація хвиль прибуття/відправлення, зручність переходу між платформами, єдиний квиток. Саме пересадки найчастіше визначають, чи відбудеться перерозподіл між магістральними та фідерними лініями.

Четвертий блок — *тариф і правила оплати*: вартість другої поїздки, «вікно» безкоштовної пересадки, зональні межі, штраф за довгу поїздку. Тарифні зміни здатні швидко переформувати просторову структуру попиту.

П'ятий блок — *просторова привабливість*: пасажери тяжіють до напрямків, де вищі можливості досягнення робочих місць, освіти, сервісів. Саме тут центральною стає гравітаційна логіка взаємодії зон [127, 131, 134, 106, 117].

З прикладної точки зору важливо, що перелічені блоки не діють ізольовано: часовий виграш без надійності дає короточасний ефект, а тарифна інтервенція без зручної пересадки часто формує лише локальний перетік пасажирів. Тому в операційній практиці доцільно оцінювати комбіновані пакети змін (інтервал + стикування + тарифне вікно), а результат вимірювати не тільки приростом потоку на «цільовому» маршруті, а й зміною завантаження суміжних коридорів і вузлів. Саме такий системний підхід знижує ризик перенесення перевантаження з однієї ділянки мережі на іншу.

Додатково для підрозділу передумов варто розглянути інституційний рівень управління перерозподілом. На практиці ефект інтервенції залежить не тільки від її технічного змісту, а й від здатності оператора швидко змінювати регламент руху, погоджувати зміни з муніципальною владою, підтримувати єдині стандарти сервісу між перевізниками та забезпечувати контроль виконання. Там, де регуляторна архітектура фрагментована, навіть сильні інженерні рішення часто дають нижчий результат через слабку узгодженість дій. Відповідно, аналіз передумов повинен включати оцінку організаційної спроможності системи до керованого перерозподілу.

Критично важливим є врахування просторової справедливості. Перерозподіл, орієнтований виключно на максимізацію загального потоку, може погіршити доступність для периферійних районів або груп користувачів із нижчою платоспроможністю. Тому в постановці задачі доцільно закладати

обмеження на мінімальний стандарт обслуговування: верхню межу повного часу поїздки, гарантовану частоту, прийнятний рівень пересадкового навантаження. Така постановка дозволяє поєднати ефективність і соціальну прийнятність транспортних рішень.

У містах зі складною топологією мережі значну роль відіграє резервна керуваність. Це здатність швидко переналаштувати потоки у випадку відмови окремої ланки без різкого падіння якості поїздки. Передумовами такої керуваності є наявність дублюючих зв'язків, еластичні фідерні маршрути, адаптивне диспетчерське управління та оперативна інформація для пасажирів. Якщо ці елементи відсутні, будь-яка інтервенція може збільшити чутливість системи до випадкових збоїв.

Нарешті, доцільно підкреслити поведінкову асиметрію «втрати–виграшу». Пасажири зазвичай сильніше реагують на погіршення параметрів, ніж на еквівалентне покращення. Це означає, що навіть невеликі збої в перехідний період можуть нівелювати довгостроковий позитивний ефект інтервенції. Практичний висновок: запуск змін повинен супроводжуватися підсиленням контролем надійності в перші тижні та готовністю до швидкого коригування параметрів.

7.2 Гравітаційне моделювання перерозподілу пасажирів

Для підвищення прикладної цінності гравітаційної постановки важливо перейти від «чистої» форми моделі до процедур калібрування і перевірки, придатних для реальних даних міста чи агломерації. На практиці це означає оцінювання параметрів за кількома часовими зрізами, окремо для будніх і вихідних днів, а також для базових і збурених режимів (ремонт, події, сезонні аномалії). Якщо модель калібрована лише на усередненому масиві, вона часто

дає прийнятну середню похибку, але втрачає точність саме там, де управлінське рішення є найчутливішим — у пікових інтервалах і на вузлах високої центральності.

Важливо підкреслити, що параметри «тертя» відстані мають виразну поведінкову інтерпретацію. Зростання чутливості до узагальнених витрат може свідчити про підвищення дефіциту часу, зниження толерантності до пересадкових втрат, зміну стандартів сервісу або появу конкурентних альтернатив. Відповідно, гравітаційна модель може використовуватися не лише для прогнозу потоків, а й як інструмент діагностики змін поведінкової структури попиту. У цьому сенсі вона стає частиною системи раннього виявлення трендів мобільності.

Окремий методичний акцент стосується нормування привабливості зон. Індекси тяжіння доцільно будувати як композицію статичних і динамічних компонентів: статичні відображають функціональну «масу» території (робочі місця, освітні осередки, сервіс), динамічні — доступність у конкретному часовому режимі, надійність досягнення та фактичну якість пересадок. Така побудова дає змогу пояснити, чому зона з високим базовим потенціалом може тимчасово втрачати тяжіння у випадку операційних збоїв, і навпаки — зона з середнім потенціалом різко набирає потік після підвищення доступності.

Для міських мереж доцільно використовувати сегментоване калібрування гравітаційної моделі. Сегменти можуть відповідати цілям поїздки (робота, навчання, сервіс, дозвілля), часовим вікнам або типам користувачів. Це підвищує якість прогнозу перерозподілу, оскільки різні сегменти мають різну цінність часу, різну чутливість до пересадок і різну реакцію на тарифні сигнали.

ли. Спроба описати всі сегменти єдиним набором параметрів майже завжди призводить до зміщень у напрямках, критичних для операційного управління.

З прикладного боку гравітаційна модель є корисною для попереднього ранжування інтервенцій. Через аналіз похідних за узагальненими витратами можна визначити OD-напрямки, де невелике покращення часу або надійності дає найбільший системний ефект. Це дозволяє формувати пріоритети не інтуїтивно, а на основі очікуваної маржинальної віддачі: які коридори дають максимальне зниження перевантаження на одиницю витрат, які вузли мають найвищий потенціал стабілізації мережі, де інтервенція має найкращий ефект для доступності.

Не менш важливою є перевірка переносимості моделі між періодами та сценаріями. Після калібрування на базовому періоді модель треба тестувати на відкладеному наборі днів і на альтернативних режимах попиту. Якщо параметри демонструють прийнятну стабільність, гравітаційний блок можна вбудовувати у цикл сценарного управління. Якщо ні — потрібна рекалібровка з уточненням індексів привабливості, структури витрат або сегментації попиту.

Таким чином, гравітаційне моделювання в підході до перерозподілу пасажирів виконує дві взаємопов'язані функції: пояснювальну і регламентну. Пояснювальна функція відтворює причинний зв'язок між «масою» зон, витратами досягнення та інтенсивністю взаємодії. Регламентна функція забезпечує основу для вибору пріоритетних інтервенцій, оцінки їх системного ефекту та перевірки стійкості рішень у часі. Саме поєднання цих двох функцій робить гравітаційний блок центральним елементом моделі керованого перерозподілу.

У класичній постановці гравітаційна модель задає інтенсивність взає-

модії між зонами i та j як функцію «мас» зон і узагальненої відстані:

Подальша математична залежність подана у формулі (12).

$$T_{ij} = K \frac{M_i^\alpha A_j^\beta}{f(c_{ij})}, \quad (12)$$

де α — параметр чутливості моделі; β — параметр чутливості моделі; K — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; M_i — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; A_j — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; f — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (12) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Для практичного моделювання у маршрутній мережі зручно використовувати подвійну балансну форму:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (13).

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j \exp(-\mu c_{ij}), \quad (13)$$

де μ — параметр чутливості моделі.

У формулі (13) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подаль-

ших розрахунків. Саме через (13) гравітаційна модель стає придатною для керованого перерозподілу: оператор може оцінювати, як зміна c_{ij} через інтервал, пересадку чи тариф впливає на T_{ij} і далі — на потоки по маршрутах.

Важливий наслідок (13): перерозподіл має *подвійний механізм*. По-перше, змінюється розподіл по альтернативних маршрутах для тієї самої OD-пари. По-друге, змінюється сама інтенсивність взаємодії пар зон, бо пасажир може переключити не тільки маршрут, а й кінцеву точку активності (інший центр тяжіння) [131, 127, 107, 124].

Для міжміських і приміських систем корисним є розширення гравітаційної моделі через ієрархічну структуру зон. У такій постановці враховується, що частина поїздок формує локальні субмережі, а частина — міжкластерні зв'язки через хабові вузли. Ієрархічний підхід краще відтворює реальну структуру попиту та дозволяє точніше оцінити наслідки змін у вузлах стикування. Це особливо важливо для систем, де перевантаження у вузлі здатне впливати на значну частку регіональних переміщень.

У практиці моделювання доцільно використовувати регуляризацію параметрів і контроль мультиколінеарності між показниками «маси» зон і узагальненими витратами. Без цього є ризик отримати формально стабільну, але інтерпретаційно некоректну модель, у якій параметри компенсують один одного. Для аналітичного застосування в управлінні важлива не тільки прогностична точність, а й причинна прозорість: оператор повинен чітко бачити, який важіль (час, пересадка, тариф, доступність) дає основний внесок у зміну потоку.

Ще один прикладний крок — поєднання гравітаційного блоку з індикаторами мережевої вразливості. Якщо сценарій перерозподілу веде до кри-

тичного зростання навантаження на вузлах із низькою резервною здатністю, таку інтервенцію слід супроводжувати компенсаторними діями або відкласти. Таким чином, гравітаційна модель стає елементом ризик-орієнтованого планування, а не лише інструментом «найкращого середнього» прогнозу.

Додатково доцільно впроваджувати процедуру періодичного «перенавчання» моделі на ковзному часовому вікні. Це дає змогу врахувати структурні зсуви попиту, пов'язані з новими форматами зайнятості, зміною режимів навчання, еволюцією цифрових сервісів і трансформацією міської просторової структури. Регулярна recalібровка підтримує актуальність параметрів і підвищує довіру до сценарних прогнозів на практичному рівні.

На рівні практичної експлуатації гравітаційний блок доцільно поєднувати з календарем операційних режимів мережі. Це означає, що для кожного типового режиму (робочий день, передсвятковий день, вихідний, подієвий режим) формується власний набір параметрів або коригувальних коефіцієнтів. Такий підхід підвищує точність прогнозу без надмірного ускладнення моделі та полегшує інтеграцію результатів у диспетчерське планування.

Додаткову управлінську цінність дає декомпозиція похибки моделі на просторовий і часовий компоненти. Якщо похибка концентрується в окремих зонах, потрібне уточнення індексу привабливості. Якщо похибка домінує у певних часових вікнах, слід переглянути структуру узагальнених витрат і калібрування параметра чутливості. Така діагностика дозволяє адресно підвищувати якість моделі й уникати «глобальних» переналаштувань без чіткої причини.

7.3 Привабливість маршрутів і зон: структура та оцінювання

Поняття привабливості у транспортному аналізі доцільно трактувати як інтегральну характеристику, що поєднує функціональний потенціал призначення, параметри транспортної доступності та суб'єктивне сприйняття якості поїздки. На відміну від вузького підходу, де привабливість зводиться до часу в дорозі, сучасна постановка враховує багатовимірність вибору пасажиром: не тільки швидкість, а й передбачуваність, простоту ланцюга поїздки, ризик зриву стикування, комфорт, інформованість і узгодженість із індивідуальним режимом активності.

Для практичної оцінки привабливості варто будувати багатокритеріальний індекс із чіткою процедурою нормування показників і прозорою системою ваг. Ваги можуть задаватися експертно, на основі опитувань або через оцінювання поведінкових моделей вибору. Ключовою вимогою є інтерпретованість: оператор повинен розуміти, який саме компонент індексу став причиною зміни потоку, і які дії можуть посилити або компенсувати цей ефект. Інакше індекс перетворюється на формальний показник без управлінської цінності.

Суттєвим є поділ привабливості на маршрутну і зональну. Маршрутна привабливість характеризує якість способу досягнення (інтервал, надійність, пересадки, комфорт, тариф). Зональна привабливість описує цінність самого пункту призначення (робочі місця, освітні можливості, сервісна насиченість, міське середовище). У реальних системах

перерозподіл виникає на перетині цих двох складових: навіть дуже швидкий маршрут матиме обмежений ефект до зони з низькою функціональною вагою, тоді як помірне покращення доступу до високопривабливої зони здатне змінити структуру потоків у масштабі мережі.

Для підвищення достовірності оцінювання доцільно поєднувати кілька джерел даних: транзакції оплати проїзду, GPS/AVL, спостереження за пересадками, цифрові сліди активності, результати вибіркового опитувань. Кожне джерело має свої зміщення, тому інтеграція має супроводжуватись процедурою узгодження і перевіркою репрезентативності. Особливо важливо контролювати недопредставлення груп із нижчою цифровою активністю, оскільки саме ці групи часто мають іншу чутливість до вартості та часу поїздки.

Ще один принциповий аспект — просторово-часова мінливість привабливості. Зона, що є «магнітом» у ранковому піку, може втрачати тяжіння в міжпіковий період і знову посилюватися ввечері. Тому агрегування в один добовий індекс часто маскує критично важливі коливання. Для регламентного управління доцільно розраховувати привабливість у часових зрізах і використовувати її як вхід до сценарної моделі перерозподілу.

У практичному управлінні особливу роль відіграє textitграничний ефект підвищення привабливості. Після досягнення певного рівня якості подальше покращення маршруту дає менший приріст потоку, ніж інвестиції в суміжні слабкі ланки (пересадочний контур, інформаційний сервіс, доступність «останньої милі»). Отже, ефективна стратегія має базуватись не на максимізації одного показника, а на збалансованому покращенні всієї траєкторії поїздки.

Таким чином, оцінювання привабливості є ключовим мостом між мате-

матичною моделлю і транспортною політикою. Воно дозволяє пояснити, чому однакові за бюджетом інтервенції дають різний перерозподіл, і формує основу для пріоритезації заходів за критерієм системної віддачі. Саме через коректну структуру привабливості стає можливим перехід від реактивного усунення перевантажень до проактивного формування бажаної структури мобільності.

У прикладних задачах «привабливість» A_j не можна зводити лише до чисельності населення або кількості робочих місць. Вона має багатокомпонентну природу. Доцільно задавати її агрегованим індексом:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (14).

$$A_j = \omega_1 E_j + \omega_2 S_j + \omega_3 U_j + \omega_4 Q_j + \omega_5 R_j, \quad (14)$$

де $\omega_1 E$ — ваговий коефіцієнт складової; $\omega_2 S$ — ваговий коефіцієнт складової; $\omega_3 U$ — ваговий коефіцієнт складової; $\omega_4 Q$ — ваговий коефіцієнт складової; $\omega_5 R$ — ваговий коефіцієнт складової; A_j — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Співвідношення (14) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Для порівняння альтернативних маршрутів пасажир фактично оцінює не лише «ціну шляху», а й «цінність досягнення» пункту призначення. Тому ефективна функція корисності може бути вираз як:

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (15).

$$V_{k,ij} = \phi \ln A_j - \psi C_{k,ij}, \quad (15)$$

де k — індекс спостереження, елемента або сценарію; A_j — масштабний або балансувальний параметр моделі.

Рівняння (15) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Для регламентного застосування індексу привабливості доцільно встановлювати порогові діапазони інтерпретації. Наприклад, діапазон низької привабливості сигналізує про необхідність базових операційних корекцій, середній — про потенціал точкових інтервенцій, високий — про доцільність підтримувального режиму без різких змін. Така шкала спрощує комунікацію між аналітичним блоком і диспетчерським контуром, переводячи складні розрахунки у зрозумілі управлінські дії.

Особливу увагу слід приділяти взаємодії привабливості та надійності пересадкового досвіду. Навіть висока функціональна цінність зони не забезпечує стабільного потоку, якщо пасажир систематично стикається з невизначеністю стикувань або надмірним часом переходу. Тому оцінювання привабливості має включати показники фактичної якості пересадки: розподіл часу очікування, частоту зриву стикування, середню варіацію повного часу ланцюга поїздки.

У контексті сталого розвитку міста доцільно враховувати також екологічний компонент привабливості. Для частини користувачів важливими стають показники вуглецевого сліду поїздки, шумового впливу та якості пішо-

хідного середовища навколо вузлів. Інтеграція цих факторів не тільки поглиблює аналітику вибору, а й узгоджує транспортне планування з ширшими цілями міської політики.

Зрештою, привабливість має розглядатися як керований ресурс системи, а не як зовнішній «фон». Оператор може цілеспрямовано змінювати її через пакет інтервенцій: розклад, пріоритет руху, тарифні стимули, покращення вузлів, цифрові сервіси та інформаційні кампанії. Саме така постановка переводить аналіз із пасивного спостереження за попитом до активного формування бажаних патернів мобільності.

Для довгострокового планування корисно формувати динамічні карти привабливості, які відображають очікувану зміну зонального потенціалу під впливом містобудівних проєктів, розвитку ділових кластерів, освітньої інфраструктури та сервісних центрів. Поєднання таких карт із транспортною моделлю дозволяє заздалегідь оцінити майбутні хвилі перерозподілу та уникнути запізненого реагування, коли перевантаження вже сформоване.

У щоденному управлінні доцільно вводити компактну панель індикаторів привабливості для ключових коридорів: індекс доступності, індекс надійності пересадки, індекс інформаційної визначеності, індекс комфортності. Панель має оновлюватися регулярно і використовуватися як «ранній сигнал» до корекції режиму руху. Така практика перетворює складні аналітичні конструкції на робочий інструмент оператора.

На практиці варто проводити регулярний бенчмаркінг привабливості між коридорами, що конкурують за подібний попит. Порівняння не повинно обмежуватися середнім часом поїздки; до нього слід включати стабільність сервісу, частоту збоїв стикування, щільність пересадкового навантаження,

якість навігації та доступність сервісів «останньої милі». Саме комплексний бенчмаркінг допомагає виявляти приховані причини відтоку пасажирів із формально «швидких» маршрутів.

Крім того, для груп із різною мобільністю (студенти, працівники змінного графіка, пасажирів з обмеженою мобільністю) доцільно використовувати адаптовані підіндекси привабливості. Це підвищує точність прогнозу перерозподілу та запобігає ситуації, коли рішення, ефективне «в середньому», погіршує доступність для окремих груп користувачів.

7.4 Інтеграція гравітаційної моделі з маршрутним вибором

Інтеграція гравітаційного блоку з моделлю маршрутного вибору є принципово важливою, оскільки дозволяє одночасно описати два різні, але взаємопов'язані рівні процесу:

textitміжзонний (скільки поїздок виникає між зонами) та

textitвнутрішньопарний (як ці поїздки розподіляються між альтернативними маршрутами). Якщо аналізувати лише один із рівнів, отримується спрощена картина: або без поведінкового вибору, або без зміни інтенсивності OD-зв'язків. Саме поєднання двох рівнів дає коректне уявлення про реальний перерозподіл.

З математичної точки зору така інтеграція забезпечує передачу ефектів у двох напрямках. Зміна якості маршруту впливає на імовірності вибору в логіт-блоці, а через узагальнені витрати — на гравітаційну інтенсивність взаємодії зон. У результаті навіть локальна зміна параметрів може спричинити системний ефект, що охоплює суміжні OD-пари та пов'язані пересадкові вузли. Для практики це означає потребу відмовитися від «лінійної» інтуїції і

планувати інтервенції з урахуванням мережових вторинних наслідків.

В операційних задачах корисно застосовувати ітераційну процедуру інтеграції: початкове OD-оцінювання, розподіл за маршрутами, оновлення узагальнених витрат з урахуванням завантаження, повторний перерахунок до збіжності. Така схема відтворює зворотний зв'язок між попитом і якістю: зростання потоку збільшує очікування або дискомфорт, що змінює подальший вибір пасажирів. Без цього кроку модель може систематично недооцінювати ефекти перевантаження у пікові періоди.

Ключовим методичним питанням є коректне задання узагальнених витрат. До них доцільно включати не тільки час у русі, а й очікування, штраф за пересадку, надійність, комфорт і тарифні компоненти. За потреби окремо враховується штраф за інформаційну невизначеність (нестабільність прогнозу прибуття). Саме повна структура витрат забезпечує реалістичну чутливість моделі до інтервенцій, особливо в умовах конкуренції близьких альтернатив.

Для валідації інтегрованого блоку доцільно застосовувати набір КРІ, що поєднує точність потоків і якість керованості: помилка на контрольних перерізах, помилка пікового навантаження вузлів, помилка частки пересадочних поїздок, стійкість прогнозу на позабазових днях, коректність напряму реакції на сценарні зміни. Такий підхід запобігає ситуації, коли модель добре відтворює середні значення, але помиляється в критичних точках, де приймаються управлінські рішення.

З практичної перспективи інтегрована модель має використовуватись не як «разовий розрахунок», а як інструмент циклічного управління. Після впровадження інтервенції оператор отримує нові фактичні дані, уточнює параметри вибору і гравітаційні коефіцієнти, повторює сценарний аналіз і кори-

гує мережу. Такий цикл дозволяє поступово наближати систему до цільової конфігурації попиту без різких і ризикових рішень.

Отже, інтеграція гравітаційної моделі з маршрутним вибором формує аналітичне ядро керованого перерозподілу пасажирів. Вона забезпечує узгодження стратегічного рівня (міжзонна структура попиту) з операційним рівнем (фактичний розподіл по маршрутах) і створює основу для проактивного сценарного управління транспортною мережею.

Після оцінки OD-взаємодій за (13) потік кожної пари (i, j) розподіляється по маршрутах:

Математичне представлення моделі подано у формулі (16).

$$x_{k,ij} = T_{ij} P_{k|ij}, \quad \sum_{k \in \mathcal{K}_{ij}} P_{k|ij} = 1, \quad (16)$$

де \mathcal{K}_{ij} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; T_{ij} — часова або транспортна характеристика; K — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

У формулі (16) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

де умовні ймовірності $P_{k|ij}$ задаються логіт-правилом:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (17).

$$P_{k|ij} = \frac{\exp(-\theta C_{k,ij})}{\sum_{m \in \mathcal{K}_{ij}} \exp(-\theta C_{m,ij})}. \quad (17)$$

де \mathcal{K}_{ij} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; θ — ва-

говий коефіцієнт критерію; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; m — індекс спостереження, елемента або сценарію; K — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Співвідношення (17) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Тоді зміна параметра одного маршруту (наприклад, зниження часу) впливає на потік двома каналами одночасно: через $P_{k|ij}$ у (17) та через T_{ij} у (13). Саме цей подвійний канал і формує сильний нелінійний перерозподіл у реальних мережах.

Для інтерпретації чутливості доцільно використовувати крос-еластичність:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (18).

$$\mathcal{E}_{ab} = \frac{\partial x_b}{\partial C_a} \frac{C_a}{x_b}, \quad (18)$$

де \mathcal{E}_{ab} — інтегральний показник похибки/точності моделі; E — показник ефективності/похибки; x_b — змінна або параметр відповідної математичної моделі; C_a — узагальнені витрати переміщення.

Рівняння (18) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

яка показує, наскільки зміна витрат на маршрут a змінює потік маршруту b . У конкуренції близьких альтернатив $|\mathcal{E}_{ab}|$ є високою; для структурно різних маршрутів — нижчою [132, 134, 109].

Практично важливим наслідком інтегрованої постановки є можливість проводити багатосценарне тестування перед впровадженням змін. Оператор може порівнювати базовий сценарій, сценарій помірної інтервенції, сценарій агресивної інтервенції та сценарій збурення (наприклад, часткове вибуття вузла). Для кожного сценарію оцінюються не лише потоки, а й ризики перевантаження, стійкість пересадок, очікуваний вплив на повний час поїздки та розподіл навантаження між коридорами. Це суттєво підвищує якість підготовки управлінських рішень.

Ще один методичний напрям — інтеграція з обмеженнями пропускної здатності та комфортності. Умовно «найкращий» маршрут за витратами може втрачати перевагу при наближенні до межі місткості, тому функція витрат має адаптуватися до рівня завантаження. У такій постановці модель відтворює реальний компроміс між швидкістю і комфортом та запобігає систематичній переоцінці магістральних ліній у піку.

Для підвищення стійкості прогнозів доцільно виконувати аналіз чутливості параметрів вибору

(
theta

) і ваг компонентів узагальнених витрат. Якщо невелика зміна параметрів радикально змінює результат, рішення потребує додаткової перевірки або поетапного запуску. Такий аналіз формує «коридор невизначеності» прогнозу і допомагає керівнику приймати рішення з прозорим розумінням ризику.

У підсумку інтегрований підхід має працювати як частина постійного аналітичного контуру: моделювання — сценарне тестування — впровадження — аудит — рекалібровка. Саме безперервність цього циклу забезпечує нако-

пичення системного знання про поведінку мережі та зменшує залежність від разових експертних припущень.

З методичного боку важливо передбачати процедуру узгодження інтегрованої моделі з фактичними обмеженнями експлуатації: доступним парком рухомого складу, кадровими обмеженнями, допустимими інтервалами та вікнами технічного обслуговування. Сценарій, що є математично ефективним, може виявитись нереалістичним в операційному контурі. Тому фінальний вибір інтервенцій має спиратися на поєднання модельного результату і перевірки реалізованості.

Також доцільно застосовувати «контрольні» експерименти на обмеженому полігоні мережі перед масштабним запуском змін. Пілот дає змогу перевірити правильність напряму перерозподілу, уточнити параметри вибору та оцінити чутливість користувачів до інформаційного супроводу. За результатами пілоту модель коригується, і лише після цього рішення масштабується на всю систему.

Під час практичного впровадження важливо забезпечити трасованість рішень: для кожної зміни параметрів має бути зафіксовано, які модельні припущення її обґрунтовують і які КРІ підтверджують результат. Така трасованість спрощує аудит, підвищує довіру до аналітики і дозволяє швидше коригувати політику за появи нових даних.

Також доцільно застосовувати порогові правила прийняття рішення: інтервенція масштабується лише тоді, коли прогнозований виграш перевищує визначений рівень із урахуванням невизначеності, а ризик перевантаження вузлів залишається в допустимому діапазоні. Це дисциплінує процес керування і зменшує імовірність «надмірно сміливих» змін без достатнього запасу

стійкості.

Окремо слід враховувати вимоги до обчислювальної оперативності інтегрованої моделі. Для щоденного управління важливо, щоб цикл перерахунку сценаріїв виконувався в прийнятний час, а результати могли використовуватися до початку чергового операційного періоду. Тому в практиці доцільно поєднувати повні офлайн-розрахунки з пришвидшеними онлайн-апроксимаціями для оперативних рішень.

З управлінської точки зору це формує дворівневу систему: стратегічний рівень уточнює структуру моделі та параметри, а оперативний рівень використовує стабілізовані залежності для швидкого вибору дій у межах допустимого коридору рішень. Така організація підвищує керованість і знижує ризик затримки реакції на зміни попиту.

7.5 Динамічна адаптація пасажирів після інтервенцій

Динамічна адаптація є невід’ємною характеристикою реальних транспортних систем, оскільки пасажирів змінюють поведінку поступово, через накопичення досвіду та оновлення очікувань щодо надійності поїздки. У цьому контексті перший період після інтервенції не можна трактувати як «підсумковий результат»: на старті домінує інерція звичних патернів, далі формується перехідний режим із підвищеною варіативністю, і лише потім система наближається до нового квазістійкого стану.

Управлінська помилка, що часто трапляється на практиці, полягає у передчасній оцінці ефекту. Якщо рішення переглядається за підсумками 7–10 днів, оператор може отримати хибний сигнал про «неефективність» заходу, хоча поведінкова адаптація ще не завершилася. Тому необхідно заздалегідь

визначати горизонт спостереження та проміжні критерії успішності: короткострокові (надійність і стабільність), середньострокові (зміна структури вибору), довгострокові (стійкість нового розподілу і системний ефект для мережі).

Важливо враховувати гетерогенність швидкості адаптації. Регулярні користувачі трудових маршрутів, як правило, мають вищу інерцію і переходять повільніше, тоді як користувачі варіативних поїздок реагують швидше на зміни сервісу або тарифу. Відповідно, в моделі доцільно застосовувати сегментні параметри адаптації або сценарний діапазон

(

λ

), щоб не переоцінювати темп перерозподілу в перші тижні.

Окремий чинник — інформаційний ефект і соціальне поширення. Частина пасажирів не тестує новий маршрут самостійно, а приймає рішення на основі відгуків і спостережень інших користувачів. Це створює лаг у реакції та може формувати нелінійні хвилі переходу, коли після періоду слабкої динаміки виникає прискорений перетік. Для коректної інтерпретації даних моніторингу цей механізм необхідно враховувати при встановленні контрольних точок оцінювання.

З практичного боку динамічний блок має бути інтегрований із регламентом післявпроваджувального аудиту. Рекомендується фіксувати серії показників щонайменше щотижня: завантаження по ключових перегонах, частку пересадочних поїздок, стабільність часу подорожі, частку збоїв стикування, інтенсивність скарг користувачів. Поєднання цих індикаторів дозволяє відокремити тимчасову турбулентність від стійкої негативної тенденції.

Крім того, динамічна адаптація створює основу для етапного впрова-

дження складних інтервенцій. Замість одночасної зміни кількох параметрів (маршрут, інтервал, тариф, пересадка) доцільно застосовувати фазування з контрольними паузами. Такий підхід знижує ризик різкого погіршення сервісу і спрощує атрибуцію ефекту: зрозуміло, яка саме зміна викликала позитивну або негативну реакцію попиту.

Отже, врахування динаміки адаптації переводить аналіз перерозподілу з «статичного порівняння до/після» у режим керованого процесу з контрольованою невизначеністю. Це підвищує надійність управлінських висновків, зменшує ризик хибних відкатів і дає змогу досягати стійкого переформатування потоків у межах реалістичних операційних обмежень.

Після запровадження змін пасажир не переходять одномоментно. Для моделювання інерційної адаптації використовують рекурсію:

Аналitiчну інтерпретацію параметрів подано у формулі (19).

$$\mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^t + \lambda (\mathbf{x}^*(C^t) - \mathbf{x}^t), \quad (19)$$

де \mathbf{x} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathbf{x}^t — змінна або параметр відповідної математичної моделі; C^t — змінна або параметр відповідної математичної моделі; λ — параметр чутливості моделі; x — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс; C — узагальнені витрати переміщення.

У формулі (19) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Якщо керувати мережею без урахування (19), легко припуститися си-

стемної помилки: оцінити перші 1–2 тижні як «слабкий ефект» і відкотити рішення, хоча повний перерозподіл з’являється через 4–8 тижнів. Для міжміських систем горизонт стабілізації може бути ще більшим [129, 127, 108, 113].

Для аналітичної практики корисно розглядати адаптацію як процес із можливою неповною збіжністю. У деяких випадках система не переходить до одного стабільного стану, а коливається навколо кількох квазістійких конфігурацій залежно від сезонності, подій і режиму роботи ключових генераторів попиту. Це означає, що ціль управління полягає не лише у досягненні одного «оптимуму», а й у забезпеченні прийнятної якості в межах діапазону реалістичних режимів.

Важливим інструментом є раннє виявлення відхилень від очікуваної траєкторії адаптації. Якщо фактичні дані систематично виходять за довірчий коридор моделі, потрібне оперативне коригування: зміна інтервалів, перефазування пересадок, посилення фідерів або інформаційне втручання. Чим раніше виявлено відхилення, тим нижчі витрати на повернення системи до цільової динаміки.

Доцільно також враховувати ефект «поведінкової пам’яті». Після періоду нестабільності пасажери можуть довше утримуватися від повернення на маршрут навіть після відновлення якості. Тому після збурень потрібні не лише технічні, а й комунікаційні заходи відновлення довіри до сервісу. У моделі це може враховуватися через часові коефіцієнти відновлення або додатковий штраф за нещодавню нестабільність.

У прикладному вимірі динамічна адаптація повинна бути інтегрована в процес бюджетування. Поетапні інтервенції, підтримувальний моніторинг і оперативні корекції потребують ресурсів, але саме вони зменшують імовір-

ність дорогих помилок від невдалих «одноразових» рішень. Отже, фінансове планування має передбачати не тільки капітальні зміни інфраструктури, а й витрати на керування перехідними режимами.

Щоб підвищити керованість перехідного періоду, доцільно заздалегідь формувати набір тригерів автоматичного реагування. Наприклад, при перевищенні порогу завантаження вузла запускається тимчасове підсилення фідерного маршруту; при зростанні середнього часу пересадки понад допустимий рівень активується корекція розкладу; при різкому зростанні скарг користувачів вмикається оперативний інформаційний сценарій. Наявність таких тригерів скорочує час реакції і зменшує ризик каскадних відхилень.

Крім того, динамічна модель має враховувати можливість зовнішніх шоків під час адаптації (погодні аномалії, аварійні обмеження, події піки). Для цього в сценарному контурі варто передбачати «стрес-тести», які перевіряють, чи зберігається позитивна траєкторія перерозподілу за несприятливих умов. Стрес-тестування підвищує надійність висновків і забезпечує більш стійке впровадження змін.

Важливим елементом є і комунікаційна стратегія під час адаптації: чітке пояснення причин змін, очікуваних вигод, тимчасових незручностей і строків стабілізації. Коли пасажир розуміє логіку інтервенції, його готовність тестувати нові альтернативи зростає, а швидкість адаптації підвищується.

У підсумковій оцінці доцільно відокремлювати ефект власне інтервенції від ефекту зовнішніх факторів за допомогою контрольних коридорів або квазіекспериментальних підходів. Це дозволяє уникнути хибної атрибуції та більш точно визначити, які механізми дали найбільший внесок у стійкий перерозподіл потоків.

Не менш важливо визначати критерії завершення адаптаційного етапу. Практично це може бути досягнення стабільності ключових КРІ упродовж заданого періоду: обмежена варіація завантаження, відсутність тренду погіршення пересадкової надійності, стабілізація частки користувачів на нових маршрутах. Формалізація критерію завершення дозволяє своєчасно перейти від режиму посиленого моніторингу до штатного управління.

Таким чином, динамічний підхід не тільки пояснює часову структуру перерозподілу, а й задає чіткі правила управління перехідним станом системи. Це підвищує передбачуваність результатів інтервенцій і покращує якість комунікації між аналітичним, диспетчерським і стратегічним рівнями управління.

7.6 Візуалізація ключових ефектів перерозподілу

На рис. 1 показано S-подібну криву реакції попиту: до порогу зміни витрат перерозподіл обмежений, після порогу — різко прискорюється. Саме ця нелінійність пояснює, чому частина інтервенцій довго не дає помітного ефекту, а потім раптово змінює структуру потоків.

Візуальне подання результату наведено на рис. 1.

На рисунку показано чутливість перерозподілу до зміни ключових параметрів сервісу, насамперед часу поїздки, частоти руху та узагальненої вартості. Візуалізація демонструє, що реакція пасажирів є нелінійною: на початкових етапах покращення дають відносно помірний ефект, тоді як у зоні наближення до конкурентних значень часу і комфорту спостерігається різкіше зростання перетоків. Це означає, що для оператора критично важливо визначати «порогові» режими, після яких інтервенція починає працювати

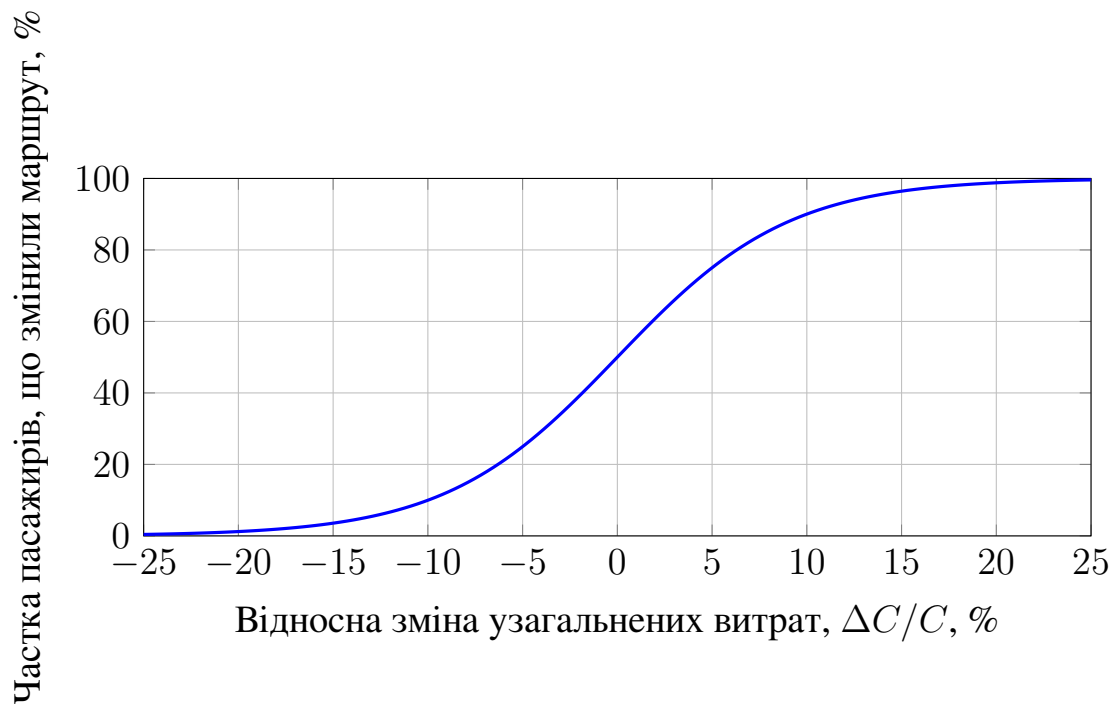


Рис. 1: Нелінійна чутливість перерозподілу до зміни узагальнених витрат.

значно ефективніше. З практичної точки зору графік підтверджує доцільність пакетних рішень, коли зміна інтервалу супроводжується покращенням пересадкової надійності. Саме така узгодженість параметрів дозволяє отримати стійкий перерозподіл попиту без локального перенавантаження суміжних ділянок мережі.

Подана візуалізація дає змогу простежити вплив ключових чинників у межах обраного сценарію.

На рис. 2 наведено приклад структури попиту до і після підвищення привабливості маршруту В (скорочення очікування та підвищення надійності стикування). Видно, що виграш В формується переважно за рахунок маршруту А, який є найближчим конкурентом за параметрами якості.

Графічну інтерпретацію розглянутого ефекту подано на рис. 2.

Наведений рисунок відображає перехід пасажирів між альтернативними маршрутами та видами транспорту залежно від зміни узагальнених витрат.

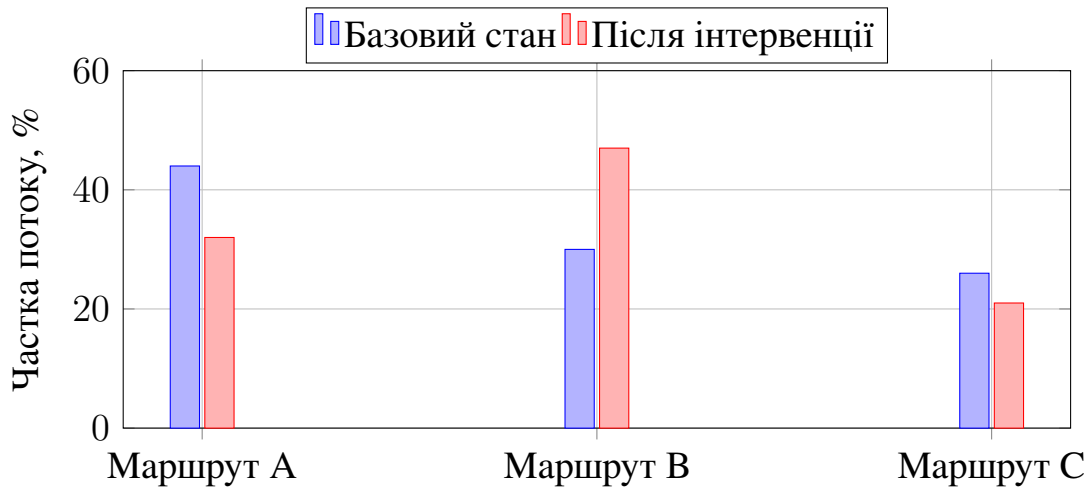


Рис. 2: Приклад перерозподілу між трьома альтернативними маршрутами.

Видно, що навіть за сталого загального попиту частки мод можуть істотно змінюватися під впливом тарифної політики, пересадкових штрафів і надійності стикувань. Графічний профіль підкреслює, що міжвидова конкуренція має асиметричний характер: втратити пасажера легше, ніж повернути його після погіршення сервісу. Для планувальника це означає необхідність не тільки точкового покращення окремої лінії, а й забезпечення стабільності всієї поїздки «від дверей до дверей». У прикладному сенсі рисунок підтверджує доцільність інтегрованих тарифно-мережевих рішень, які підвищують привабливість громадського транспорту відносно індивідуального авто.

Графік наочно підтверджує напрям і інтенсивність виявлених залежностей.

На рис. 3 показано, як керований перерозподіл зменшує пікове навантаження на критичному коридорі. Це ключовий результат для операційного управління: зменшується ризик каскадних збоїв без обов'язкових капітало-містких заходів.

Динаміку відповідної залежності показано на рис. 3.

Рисунок ілюструє розподіл навантаження у транспортній мережі та по-

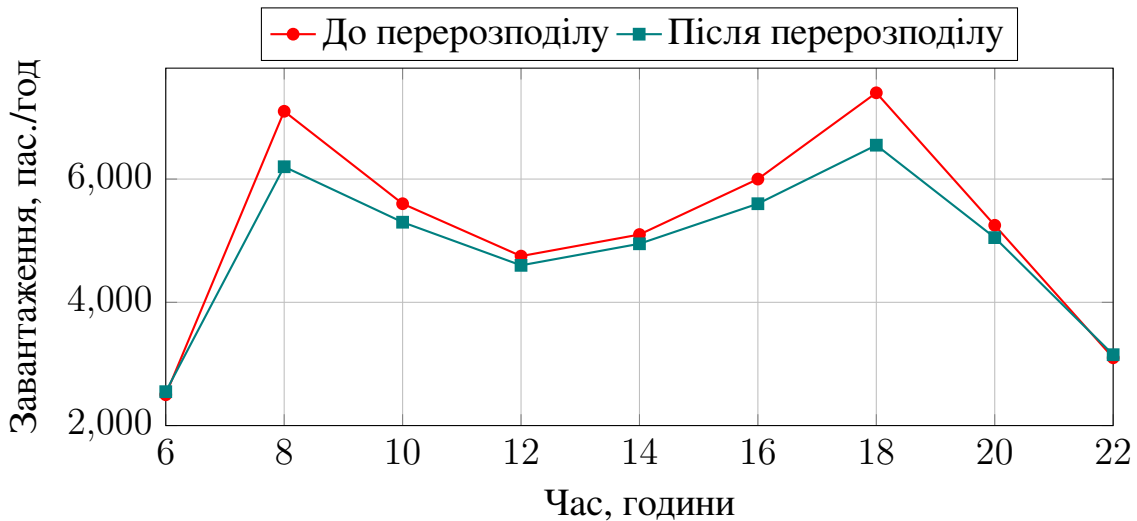


Рис. 3: Профіль коридорного навантаження до і після керованого перерозподілу.

казує, як локальні зміни параметрів призводять до переформатування потоків у суміжних вузлах. Найбільш завантажені сегменти формують «вузькі місця», через які поширюються затримки і зростають часові втрати на пересадках. Візуальна картина демонструє, що перерозподіл не обмежується одним маршрутом: зміна траси або інтервалу впливає на всю мережеву конфігурацію. Це підтверджує необхідність аналізу мережі на рівні коридорів і хабів, а не ізольованих ліній. Для практики управління рисунок є аргументом на користь сценарного тестування перед впровадженням змін, щоб уникати каскадного перевантаження після, здавалося б, локального покращення.

Представлений рисунок полегшує порівняння альтернативних режимів функціонування системи.

Оптимізація керованого перерозподілу Операторська задача може бути подана як мінімізація загальних витрат поїздок із штрафом за перевантаження:

Подальша математична залежність подана у формулі (20).

$$\min_{f, x} Z = \sum_{a \in A} t_a(x_a)x_a + \omega \sum_{a \in A} \left(\frac{x_a}{u_a} \right)^\nu, \quad (20)$$

де f — змінна або параметр відповідної математичної моделі; x — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ω — ваговий коефіцієнт складової; ν — змінна або параметр відповідної математичної моделі; f — змінна або параметр відповідної математичної моделі; x — змінна або параметр відповідної математичної моделі; Z — змінна або параметр відповідної математичної моделі; a — індекс спостереження, елемента або сценарію; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; t_a — часовий індекс.

Співвідношення (20) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Обмеження:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (21).

$$\sum_{l \in L} c_l f_l \leq B, \quad (21)$$

де l — індекс спостереження, елемента або сценарію; L — змінна або параметр відповідної математичної моделі; c_l — змінна або параметр відповідної математичної моделі; f_l — змінна або параметр відповідної математичної моделі; B — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Рівняння (21) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити

стійкість рішення в різних умовах.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків. Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (22).

$$x_a \leq u_a, \quad \forall a \in A, \quad (22)$$

де x_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі; u_a — індекс спостереження, елемента або сценарію; a — індекс спостереження, елемента або сценарію; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

У формулі (22) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (23).

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_{ij}} x_{k,ij} = T_{ij}, \quad \forall (i, j). \quad (23)$$

де \mathcal{K}_{ij} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; K — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; i — просторові індекси зон відправлення/призначення; j — просторові індекси зон відправлення/призначення.

Співвідношення (23) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та

обґрунтувати вибір керуючих дій.

Комбінація (13), (17) і (20)–(23) формує повну прикладну схему: гравітація задає міжзонні взаємодії, логіт — маршрутний вибір, оптимізація — керовані рішення для стабілізації мережі.

Міські, приміські, міжміські й авіаційні мережі Міський рівень. Домінують інтервал, пересадки, щільність сервісу, регулярність. Перерозподіл часто має високу швидкість адаптації λ у (19), бо пасажери щодня отримують зворотний зв'язок.

Приміський рівень. Зростає роль «двері–двері», координації мод «підвезення+магістраль», тарифної цілісності. Привабливість у (14) сильніше залежить від U_j та R_j .

Міжміський рівень. Ключовими стають порогові ефекти переключення між режимами (HSR, автобус, авто, авіа). Перерозподіл відбувається повільніше, але може бути різкішим після досягнення порогу.

Авіаційно-хабовий рівень. Вузлова структура формує каскадні перетоки при збоях. Тут критичні індикатори надійності стикування та резерв пропускної здатності [126, 121, 122, 123].

Практичний алгоритм для транспортної агенції Для впровадження моделі перерозподілу доцільна така послідовність:

- 1) оцінити гравітаційну основу (13) на актуальних OD-даних;
- 2) побудувати індекс привабливості зон за (14);
- 3) відкалібрувати маршрутний вибір за (17);
- 4) змодельовати динаміку адаптації через (19);
- 5) оптимізувати операторські параметри через (20)–(23);

б) запустити пілот і відстежувати КРІ перерозподілу:

Математичне представлення моделі подано у формулі (24).

$$\text{KPI}_{\text{redist}} = \{\varepsilon_Q, \varepsilon_P, \Delta TT, \Delta CF, \Psi\}, \quad (24)$$

де ε_Q — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ε_P — змінна або параметр відповідної математичної моделі; Δ — приріст (зміна) відповідного показника.

Рівняння (24) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Такий алгоритм дозволяє перейти від разового аналізу до постійного регламенту керованого перерозподілу, що особливо важливо в умовах сезонності, змін зайнятості та нестабільної мобільної поведінки.

Механізм перерозподілу за етапами транспортного циклу У практичному вимірі перерозподіл проходить послідовний цикл із чотирьох етапів.

Етап 1: інформаційний імпульс. Користувач отримує сигнал про зміну мережі: новий інтервал, іншу трасу, оновлений тариф, покращену пересадку. На цьому етапі реальний потік ще майже не змінюється, але формується очікувана корисність альтернатив.

Етап 2: пробні переключення. Частина пасажирів тестує нові маршрути. Це найважливіший період для оператора, оскільки саме тут виникає перша хвиля пікових локальних перевантажень, які можуть спотворити сприйняття нової альтернативи.

Етап 3: мережеве вирівнювання. Після перших тижнів у систему входять вторинні ефекти: змінюється якість обслуговування і на «старих», і на «нових» маршрутах, відбувається друга хвиля перерозподілу, часто більш масштабна, ніж перша.

Етап 4: нова рівновага. Структура попиту стабілізується, але не є «остаточною» — вона зберігається лише за сталої конфігурації мережі й зовнішніх умов.

Таке трактування узгоджується з формою (19): оператору необхідно керувати не тільки цільовою рівновагою, а й траєкторією переходу до неї. Саме на цьому етапі практична школа, розвинута в роботах Долі К. В., акцентує потребу поетапного впровадження змін із проміжною валідацією [129, 130, 128].

Поглиблена модель привабливості маршрутів і зон Для детальної оцінки причин перерозподілу доцільно відокремлювати привабливість *пункту призначення* і привабливість *самого маршруту*. Тоді повна привабливість альтернативи (k, ij) подається як:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (25).

$$A_{k,ij} = \underbrace{\chi_1 A_j + \chi_2 G_j}_{\text{привабливість зони } j} - \underbrace{\chi_3 C_{k,ij} + \chi_4 \sigma_{k,ij}}_{\text{дискомфорт маршруту } k}, \quad (25)$$

де A — індекс привабливості або доступності; $\chi_1 A$ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; $\chi_2 G$ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; $\chi_3 C$ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; χ_4 — змінна або параметр відповідної математичної моделі; σ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний

або балансувальний параметр моделі; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; j — просторові індекси зон відправлення/призначення.

У формулі (25) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Рівняння (25) пояснює, чому однакове скорочення часу на двох різних напрямках дає різні результати перерозподілу. Якщо зона призначення має високе A_j і G_j , навіть невелике покращення $C_{k,ij}$ може дати непропорційно великий приріст потоку. І навпаки, для слабо привабливих зон суттєві транспортні інтервенції іноді дають обмежений ефект.

Для інженерної практики зручно вводити узагальнений індекс конкурентності маршруту:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (26).

$$\Gamma_{k,ij} = \frac{A_{k,ij}}{\max_{m \in \mathcal{K}_{ij}} A_{m,ij}}, \quad (26)$$

де A — індекс привабливості або доступності; \mathcal{K}_{ij} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; m — індекс спостереження, елемента або сценарію; K — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Співвідношення (26) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та

обґрунтувати вибір керуючих дій.

Гравітаційний перерозподіл у мережі з пересадками Класична гравітація часто недооцінює роль пересадок. Для мереж із вираженою вузловою структурою доцільно використовувати модифікований імпеданс:

Аналitiчну інтерпретацію параметрів подано у формулі (27).

$$c_{ij}^{\text{eff}} = \min_{k \in \mathcal{K}_{ij}} (t_{k,ij} + \kappa_1 w_{k,ij} + \kappa_2 n_{k,ij} + \kappa_3 r_{k,ij}), \quad (27)$$

де \mathcal{K}_{ij} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; $\kappa_1 w$ — коефіцієнт кроку оновлення параметрів; $\kappa_2 n$ — коефіцієнт кроку оновлення параметрів; $\kappa_3 r$ — коефіцієнт кроку оновлення параметрів; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; K — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Рівняння (27) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Тоді гравітаційний потік для пари зон:

Подальша математична залежність подана у формулі (28).

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j \exp(-\mu c_{ij}^{\text{eff}}). \quad (28)$$

де μ — параметр чутливості моделі.

У формулі (28) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількі-

сно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Рівняння (27)–(28) особливо важливі для систем «магістраль + підвезення», де саме пересадки визначають, чи стане маршрут реальним об'єктом перерозподілу. У багатьох випадках скорочення одного пересадкового ризику дає більший ефект, ніж формальне скорочення часу руху на перегоні.

Декомпозиція причин перерозподілу Щоб управлінське рішення було прозорим, доцільно декомпонувати загальний приріст потоку Δx_k на внески факторів:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (29).

$$\Delta x_k = \Delta x_k^{(t)} + \Delta x_k^{(w)} + \Delta x_k^{(n)} + \Delta x_k^{(f)} + \Delta x_k^{(a)}, \quad (29)$$

де Δ — приріст (зміна) відповідного показника; x_k — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс; w — змінна або параметр відповідної математичної моделі; n — індекс спостереження, елемента або сценарію; f — змінна або параметр відповідної математичної моделі; a — індекс спостереження, елемента або сценарію.

Співвідношення (29) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Така декомпозиція дозволяє відповісти на практичне запитання: *за рахунок чого саме отримано перерозподіл*. Без цього аналізу оператор не може масштабувати успішне рішення на інші коридори, бо не розуміє домінуючого

механізму.

На рис. 4 наведено приклад структури внесків у перерозподіл після комплексної інтервенції. Видно, що найбільший ефект дали очікування і пересадкова надійність, а не тарифний фактор.

Порівняльну картину змін параметрів представлено на рис. 4.

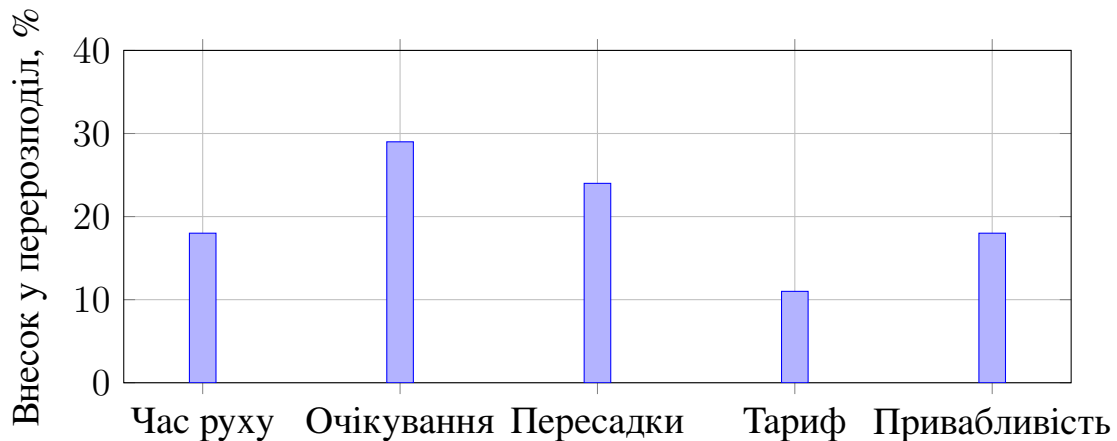


Рис. 4: Декомпозиція причин перерозподілу пасажирів між маршрутами.

На цьому рисунку узагальнено відносний внесок ключових факторів у формування перерозподілу пасажиропотоків між маршрутами. Графік показує, що домінують часові та надійнісні компоненти, однак їхній вплив суттєво підсилюється або послаблюється тарифом і комфортом залежно від сегмента користувачів. Така структура підтверджує багатокритеріальну природу вибору: пасажир оцінює не один параметр, а сукупний профіль поїздки. З точки зору управлінських рішень це означає, що одновимірні інтервенції мають обмежений потенціал і часто не дають очікуваного ефекту. Найбільш результативними є узгоджені дії, коли зміни в часі, пересадках, інформаційному сервісі та тарифі реалізуються синхронно.

Візуальний матеріал підкреслює, як зміна параметрів позначається на підсумковому результаті.

Сценарії, у яких перерозподіл стає нестійким Не будь-який перерозподіл є корисним для мережі. Є щонайменше три ризикові режими.

Режим А: надмірна концентрація. Швидке переключення на один «найкращий» маршрут формує перевантаження і погіршує його власну якість, що запускає зворотну хвилю переходів.

Режим В: хибна синхронізація. Часткове покращення одного сегмента без узгодження пересадок у вузлах дає приріст локального потоку, але погіршує повну поїздку для значної частини пасажирів.

Режим С: тарифна асиметрія. Невдале тарифне рішення переводить потік на дешевшу, але менш містку альтернативу, збільшуючи ризик каскадних затримок.

Для раннього виявлення нестійкості доцільно контролювати індекс мережевого ризику:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (30).

$$\Omega = \sum_{a \in A} \zeta_a \left(\frac{x_a}{u_a} \right)^2, \quad (30)$$

де a — індекс спостереження, елемента або сценарію; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; x_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі; u_a — індекс спостереження, елемента або сценарію.

Рівняння (30) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків. На відміну від локальних КРІ, Ω дозволяє відстежити системний ефект «накопичення напруги» в мережі.

Валідація і горизонт застосування моделі Для коректного використання моделі перерозподілу потрібна багаторівнева валідація:

- 1) *OD-рівень*: похибка відтворення міжзонних потоків T_{ij} ;
- 2) *маршрутний рівень*: похибка часток $P_{k|ij}$;
- 3) *вузловий рівень*: похибка пересадкових потоків у ключових хабах;
- 4) *операційний рівень*: похибка пікових перевантажень і зривів інтервалу.

Загальний індекс узгодженості можна подати як:

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (31).

$$\mathcal{V} = \varpi_1 \mathcal{V}_{OD} + \varpi_2 \mathcal{V}_R + \varpi_3 \mathcal{V}_H + \varpi_4 \mathcal{V}_O, \quad (31)$$

де \mathcal{V} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathcal{V}_{OD} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathcal{V}_R — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathcal{V}_H — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathcal{V}_O — змінна або параметр відповідної математичної моделі; V — змінна або параметр відповідної математичної моделі; R — змінна або параметр відповідної математичної моделі; H — змінна або параметр відповідної математичної моделі; O — потенціал відправлення із зони.

У формулі (31) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні

сценарії розвитку мережі.

Практично це означає, що модель може бути математично «доброю» на OD-рівні, але непридатною для диспетчерських рішень, якщо вона погано відтворює вузлові та пікові режими. Саме тому в сучасній прикладній літературі акцент робиться на мультирівневій перевірці, а не на одному агрегованому показнику похибки [129, 110, 125].

7.7 Висновки до розділу

Перерозподіл пасажирів між маршрутами відбувається тому, що пасажирська поведінка є адаптивною, а мережа — взаємопов'язаною. Зміна одного параметра в одній точці змінює не тільки локальний потік, а й просторову конфігурацію попиту в цілому. Гравітаційні закони (12)–(13) пояснюють, як формуються міжзонні тяжіння, а блок маршрутного вибору (16)–(17) показує, як ці тяжіння трансформуються у конкретні маршрутні потоки.

Детальне врахування привабливості зони через (14) та корисності (15) дає відповідь на головне прикладне питання: *чому одна й та сама транспортна інтервенція у різних частинах мережі дає різний ефект*. Там, де зростає інтегральна привабливість і одночасно знижується узагальнена вартість, перерозподіл є найсильнішим.

Отже, для сучасного планування перерозподіл слід розглядати як керований процес із чіткою математичною структурою, а не як «побічну реакцію» системи. Саме такий підхід, підтверджений у роботах Долі К. В. та сучасних дослідженнях 2021–2025 років, забезпечує стійке зниження перевантажень, підвищення надійності та збалансоване використання маршрутної мережі [126, 128, 131, 132, 130, 102, 104, 113].

8 Фактори формування привабливості

У цьому розділі привабливість маршруту розглядається як керований результат взаємодії часових, економічних, сервісних, безпекових, просторових і поведінкових параметрів транспортної системи. Для практики транспортного планування принципово важливо, що пасажир обирає не «лінію як таку», а повний ланцюг поїздки, у межах якого порівнює очікувані вигоди, ризики, дискомфорт та грошові витрати. Тому підвищення привабливості неможливе через одну локальну зміну (наприклад, тільки тариф або тільки інтервал); потрібна узгоджена конфігурація інтервенцій, яка зменшує узагальнену вартість поїздки та водночас підвищує стабільність сервісу.

У прикладних постановках Долі К. В. привабливість трактується як фактор, що безпосередньо формує перерозподіл пасажиропотоків між маршрутами та видами транспорту. Це означає, що правильна оцінка привабливості дає змогу не тільки описувати наявний попит, але й керувати ним через параметри інтервалу, надійності, комфорту, пересадкової інтеграції, тарифної логіки та інформаційного супроводу [131, 129, 128, 132, 109, 110].

8.1 Теоретичні основи привабливості маршруту та інтегральні індекси

Привабливість маршруту r визначимо як інтегральну функцію багатьох факторів:

Математичне представлення моделі подано у формулі (32).

$$A_r = F(T_r, C_r, K_r, S_r, R_r, I_r, A_r, Q_r, E_r), \quad (32)$$

де A_r — індекс привабливості або доступності; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; F — змінна або параметр відповідної математичної моделі; T_r — часова або транспортна характеристика; C_r — узагальнені витрати переміщення; K_r — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; S_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; R_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; I_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A_r — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Співвідношення (32) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Для практичного розрахунку застосуємо нормований індекс:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (33).

$$A_r = \sum_{m=1}^M \omega_m \tilde{z}_{rm}, \quad \sum_{m=1}^M \omega_m = 1, \quad \omega_m \geq 0, \quad (33)$$

де A_r — індекс привабливості або доступності; ω_m — ваговий коефіцієнт складової; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; m — індекс спостереження, елемента або сценарію; M — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; z — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (33) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Нормування для «витратних» компонент:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (34).

$$\tilde{z}_{rm}^{(-)} = \frac{z_m^{\max} - z_{rm}}{z_m^{\max} - z_m^{\min}}, \quad (34)$$

де z — змінна або параметр відповідної математичної моделі; z_m — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (34) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

для «виграшних» компонент:

Аналitiчну інтерпретацію параметрів подано у формулі (35).

$$\tilde{z}_{rm}^{(+)} = \frac{z_{rm} - z_m^{\min}}{z_m^{\max} - z_m^{\min}}. \quad (35)$$

де z — змінна або параметр відповідної математичної моделі; z_m — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (35) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Щоб уникати переоцінки маршруту з високою середньою якістю, але нестабільною роботою, вводимо робастну поправку:

Подальша математична залежність подана у формулі (36).

$$\mathcal{A}_r^{rob} = \mathcal{A}_r - \lambda_1 CV(T_r) - \lambda_2 CV(h_r) - \lambda_3 CV(q_r), \quad (36)$$

де \mathcal{A}_r^{rob} — індекс привабливості або доступності; \mathcal{A}_r — індекс привабливості або доступності; λ_1 — параметр чутливості моделі; λ_2 — параметр чутливості моделі; λ_3 — параметр чутливості моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; T_r — часова або транспортна характеристика; h_r — індекс спостереження, елемента або сценарію; q_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (36) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

На рівні коридору з кількома маршрутами використовуємо агрегований індекс:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (37).

$$\mathcal{A}_{corr} = \sum_{r \in \mathcal{R}_{corr}} \pi_r \mathcal{A}_r, \quad \pi_r = \frac{F_r}{\sum_{j \in \mathcal{R}_{corr}} F_j}, \quad (37)$$

де \mathcal{A}_{corr} — індекс привабливості або доступності; \mathcal{R}_{corr} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathcal{A}_r — індекс привабливості або доступності; π_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; r — індекс спостереження, елемента або сценарію; R — змінна або параметр відповідної математичної моделі; F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; j — просторові індекси зон відправлення/призначення; F_j — змінна

або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (37) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

що дозволяє оцінювати не окрему лінію, а конкурентоспроможність усього транспортного коридору.

Важливо, що ваги ω_m не є сталими в часі. Для пікових періодів вага часу та надійності зростає, для вечірніх поїздок — вага безпеки, для соціально вразливих груп — вага ціни та доступності. Це означає, що в реальних задачах доцільно застосовувати динамічні або сегментні вагові профілі:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (38).

$$\omega_m = \omega_m(g, t), \quad (38)$$

де ω_m — ваговий коефіцієнт складової; g — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс.

Співвідношення (38) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків.

Для системного аналізу корисно вводити декомпозицію індексу привабливості на короткострокову та довгострокову компоненти:

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (39).

$$A_r = A_r^{short} + A_r^{long}, \quad (39)$$

де A_r — індекс привабливості або доступності; A_r^{short} — індекс привабливості або доступності; A_r^{long} — індекс привабливості або доступності; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Рівняння (39) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Короткострокову частину доцільно оцінювати через експоненційне згладжування фактичних показників:

Математичне представлення моделі подано у формулі (40).

$$A_r^{short}(t) = \chi A_r^{obs}(t) + (1 - \chi)A_r^{short}(t - 1), \quad (40)$$

де A_r^{short} — індекс привабливості або доступності; A_r^{obs} — спостережене (фактичне) значення показника; χ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; t — часовий індекс.

У формулі (40) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

а довгострокову — через агреговані середньоквартальні індикатори:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (41).

$$A_r^{long} = \sum_m \bar{\omega}_m \bar{z}_{rm}. \quad (41)$$

де A_r^{long} — індекс привабливості або доступності; ω — ваговий коефіцієнт складової; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; m — індекс спостереження, елемента або сценарію; z — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (41) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Управлінський сенс такої постановки полягає в розрізненні «шуму» та структурних змін. Якщо оперативна аналітика реагує лише на короткострокові коливання, оператор ризикує приймати надмірно реактивні рішення. Якщо ж фокус лише на довгострокових середніх, система втрачає чутливість до пікових перевантажень і швидких збурень. Тому в сучасних транспортних агенціях доцільно підтримувати дворівневий контур оцінювання привабливості, де короткий цикл (доба/тиждень) доповнює тактичний і стратегічний (місяць/квартал).

Додатково важливо враховувати гетерогенність пасажирів. Для різних груп ваги факторів можуть суттєво відрізнятися. Наприклад, для студентів відносно вища чутливість до ціни, для працівників у ранкові піки — до часу та регулярності, для літніх пасажирів — до безпеки, доступності та кількості пересадок. Це можна зафіксувати матрицею ваг:

Для строгого опису використовуємо вираз у формулі (42).

$$\mathbf{W} = \{\omega_{m,g}\}, \quad g = 1, \dots, G. \quad (42)$$

де \mathbf{W} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ω — ваговий коефіцієнт складової; W — змінна або параметр відповідної математичної моделі; m — індекс спостереження, елемента або сценарію; g — змінна або параметр відповідної математичної моделі; G — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (42) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Під час сценарного планування доцільно оцінювати не тільки середній індекс A_r , а й його дисперсію між групами:

Аналitiчну інтерпретацію параметрів подано у формулі (43).

$$\sigma_{A,r}^2 = \frac{1}{G} \sum_{g=1}^G (A_{r,g} - \bar{A}_r)^2, \quad (43)$$

де A — індекс привабливості або доступності; σ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; r — індекс спостереження, елемента або сценарію; G — змінна або параметр відповідної математичної моделі; g — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (43) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні

сценарії розвитку мережі.

З практичної точки зору це означає, що «високий середній індекс привабливості» не гарантує справедливої доступності. Маршрут може виглядати ефективним на агрегованому рівні, але бути слабо придатним для частини пасажирів через некомфортні пересадки, низьку безпеку у вечірні години або надмірну тарифну навантаження. Саме тому у регламенті оцінювання бажано фіксувати як середні, так і розподільчі показники привабливості.

8.2 Час, комфорт, безпека, ціна та їхня нелінійна взаємодія у виборі маршруту

Узагальнену вартість поїздки маршрутом r подамо як:

Подальша математична залежність подана у формулі (44).

$$G_r = \alpha_1 T_r^{iv} + \alpha_2 T_r^w + \alpha_3 T_r^{tr} + \alpha_4 C_r + \alpha_5 \Psi_r + \alpha_6 \Phi_r - \alpha_7 K_r, \quad (44)$$

де α_1 — параметр чутливості моделі; α_2 — параметр чутливості моделі; α_3 — параметр чутливості моделі; α_4 — параметр чутливості моделі; α_5 — параметр чутливості моделі; α_6 — параметр чутливості моделі; α_7 — параметр чутливості моделі; G_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; T_r — часова або транспортна характеристика; w — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (44) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та

обґрунтувати вибір керуючих дій.

Нелінійний ефект переповнення доцільно описати так:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (45).

$$\Psi_r = \begin{cases} 0, & \rho_r \leq \rho_0, \\ \kappa_1(\rho_r - \rho_0) + \kappa_2(\rho_r - \rho_0)^2, & \rho_r > \rho_0, \end{cases} \quad (45)$$

де ρ_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ρ_0 — змінна або параметр відповідної математичної моделі; κ_1 — коефіцієнт кроку оновлення параметрів; κ_2 — коефіцієнт кроку оновлення параметрів.

Рівняння (45) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Безпековий індекс задаємо композитно:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (46).

$$S_r = 1 - (\eta_1 p_r^{inc} + \eta_2 p_r^{crime} + \eta_3 p_r^{conflict} + \eta_4 p_r^{night}), \quad (46)$$

де η_1 — змінна або параметр відповідної математичної моделі; η_2 — змінна або параметр відповідної математичної моделі; η_3 — змінна або параметр відповідної математичної моделі; η_4 — змінна або параметр відповідної математичної моделі; S_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; p_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (46) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількі-

сно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків. а тарифну доступність:

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (47).

$$Aff_r = 1 - \frac{n_r C_r}{Y_h}. \quad (47)$$

де Y_h — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (47) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

У поведінковій постановці корисність маршруту:

Математичне представлення моделі подано у формулі (48).

$$U_r = -G_r + \beta_1 S_r + \beta_2 Aff_r + \beta_3 R_r + \beta_4 I_r. \quad (48)$$

де β_1 — параметр чутливості моделі; β_2 — параметр чутливості моделі; β_3 — параметр чутливості моделі; β_4 — параметр чутливості моделі; U_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; G_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; S_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; R_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; I_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (48) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати

числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Імовірність вибору маршруту в logit-моделі:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (49).

$$P_r = \frac{\exp(\theta U_r)}{\sum_{j \in \mathcal{R}} \exp(\theta U_j)}. \quad (49)$$

де \mathcal{R} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; θ — ваговий коефіцієнт критерію; P_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; U_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; j — просторові індекси зон відправлення/призначення; R — змінна або параметр відповідної математичної моделі; U_j — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (49) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Попит маршруту:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (50).

$$F_r = D_{od} P_r. \quad (50)$$

де F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; D_{od} — потенціал прибуття у зону; P_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (50) задає правило обчислення результативного пока-

зника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Важлива для практики еластичність попиту до тарифу:

Аналітичну інтерпретацію параметрів подано у формулі (51).

$$\varepsilon_{F_r, C_r} = \frac{\partial F_r}{\partial C_r} \cdot \frac{C_r}{F_r}, \quad (51)$$

де ε — змінна або параметр відповідної математичної моделі; F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; C_r — узагальнені витрати переміщення.

Рівняння (51) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

і до часу поїздки:

Подальша математична залежність подана у формулі (52).

$$\varepsilon_{F_r, T_r} = \frac{\partial F_r}{\partial T_r} \cdot \frac{T_r}{F_r}. \quad (52)$$

де ε — змінна або параметр відповідної математичної моделі; F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; T_r — часова або транспортна характеристика.

У формулі (52) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні

сценарії розвитку мережі.

Схематичне відтворення цієї закономірності подано на рис. 5.

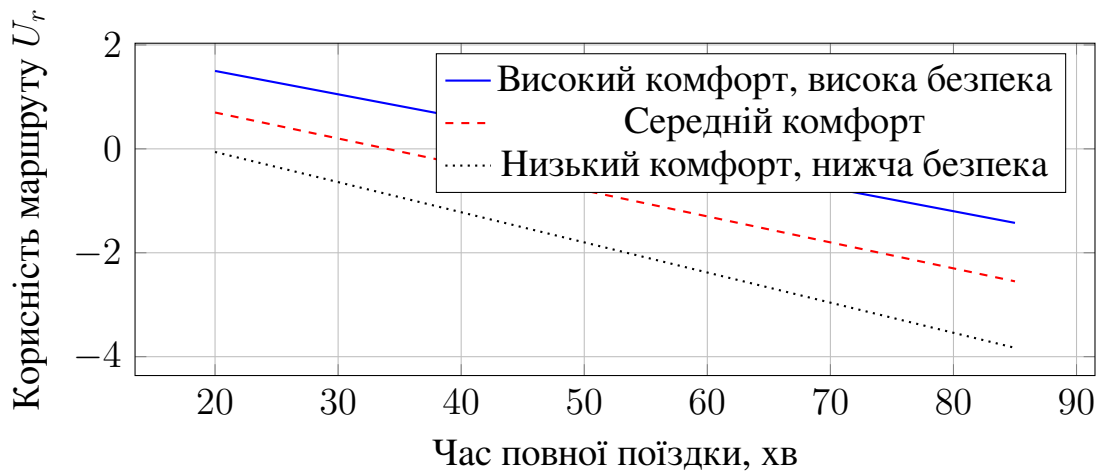


Рис. 5: Залежність корисності маршруту від часу поїздки за різних умов сервісу

Рисунок відображає залежність корисності маршруту від тривалості поїздки за різних комбінацій комфорту та безпеки. Видно, що зі зростанням часу корисність закономірно зменшується, але нахил кривих суттєво відрізняється залежно від якості сервісу. Це означає, що однакове скорочення часу дає різний ефект у маршрутах з різним рівнем комфортності та ризику. Практичний висновок полягає в тому, що підвищення привабливості не зводиться до «боротьби за хвилини»; не менш важливо знижувати дискомфорт та покращувати відчуття безпеки. У підсумку рисунок підтверджує доцільність інтегрованих інтервенцій, у яких часові покращення поєднуються з сервісними.

Ілюстрація конкретизує аналітичні висновки й робить їх прикладну інтерпретацію прозорішою.

Результати моделювання у графічній формі наведено на рис. 6.

Наведений графік показує взаємодію тарифу і часу поїздки у форму-

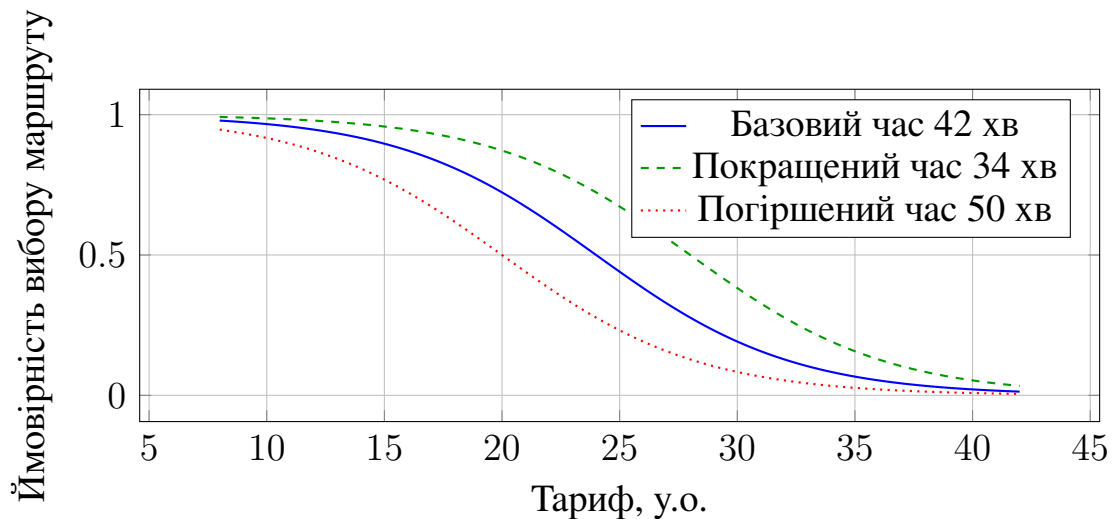


Рис. 6: Взаємодія часу та ціни у виборі маршруту

ванні ймовірності вибору маршруту. Криві демонструють класичну закономірність: зі збільшенням ціни привабливість знижується, однак швидкість цього зниження визначається якістю часового профілю. За кращого часу поїздки пасажир довше зберігає готовність користуватись маршрутом навіть при підвищенні тарифу. Натомість за повільнішого сервісу цінова чутливість різко зростає, і попит втрачається швидше. Для оператора це означає, що тарифні рішення мають прийматися лише в зв'язці з фактичним рівнем сервісу, інакше зростає ризик непропорційного відтоку пасажирів.

З рисунка чітко видно характер реакції системи на варіювання визначальних змінних.

Окремо розглянемо пороговий ефект часу очікування. У багатьох мережах після досягнення певного інтервалу пасажирська реакція стає різко нелінійною. Це можна описати кусочно-гладкою функцією штрафу:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (53).

$$\Pi_r^{wait} = \begin{cases} \beta_w T_r^w, & T_r^w \leq T^*, \\ \beta_w T^* + \beta_w^+(T_r^w - T^*), & T_r^w > T^*, \end{cases} \quad (53)$$

де β_w — параметр чутливості моделі; T_r^w — часова або транспортна характеристика; T — часова або транспортна характеристика.

Співвідношення (53) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Аналогічно для тарифу доцільно враховувати психологічну межу прийнятності:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (54).

$$\Pi_r^{fare} = \beta_c C_r + \beta_c^{shock} \max(0, C_r - C^*), \quad (54)$$

де β_c — параметр чутливості моделі; β_c^{shock} — параметр чутливості моделі; C_r — узагальнені витрати переміщення; C — узагальнені витрати переміщення.

Рівняння (54) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків.

Комплексний штраф дискомфорту поїздки з урахуванням температу-

ри, вібрації, шуму і щільності:

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (55).

$$\Psi_r = \vartheta_1 \psi_r^{crowd} + \vartheta_2 \psi_r^{temp} + \vartheta_3 \psi_r^{noise} + \vartheta_4 \psi_r^{ride}, \quad (55)$$

де позначення відповідають прийнятій нотації моделі.

У формулі (55) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

що дає можливість інтерпретувати «комфорт» не як абстрактну експертну оцінку, а як відтворюваний техніко-експлуатаційний індикатор.

Для міських систем із пересадками істотний вклад має ймовірність успішного стикування:

Математичне представлення моделі подано у формулі (56).

$$R_r^{tr} = \prod_{q=1}^{n_r^{tr}} \mathbb{P}(\Delta t_q \leq \tau_q), \quad (56)$$

де Δ — приріст (зміна) відповідного показника; τ_q — змінна або параметр відповідної математичної моделі; R_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; q — змінна або параметр відповідної математичної моделі; n_r — індекс спостереження, елемента або сценарію; P — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t_q — часовий індекс.

Співвідношення (56) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та

обґрунтувати вибір керуючих дій.

а штраф за ризик зриву стикування:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (57).

$$\Phi_r^{tr} = \zeta (1 - R_r^{tr}) . \quad (57)$$

де R_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (57) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

У підсумку узагальнена вартість повної поїздки може бути переписана як функція п'яти блоків:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (58).

$$G_r = G_r^{time} + G_r^{fare} + G_r^{comfort} + G_r^{safety} + G_r^{transfer} . \quad (58)$$

де G_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (58) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Така декомпозиція зручна для керування, тому що оператор бачить, який саме блок створює найбільший негативний внесок. Наприклад, якщо домінує $G_r^{transfer}$, пріоритетом стає синхронізація вузлів, а не лише збільшення швидкості на окремому плечі. Якщо переважає G_r^{fare} , виправданими стають

тарифні інтервенції, абонементні продукти або зміна правил пересадочної оплати.

Для емпіричного аналізу чутливості до факторів часто застосовується напівеластичність:

Аналitiчну інтерпретацію параметрів подано у формулі (59).

$$\frac{\partial \ln F_r}{\partial x_m} = \eta_m, \quad (59)$$

де η_m — змінна або параметр відповідної математичної моделі; F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; x_m — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (59) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

що дозволяє безпосередньо інтерпретувати відсоткову зміну попиту при зміні фактору x_m на одиницю.

8.3 Мережева, просторова та динамічна модель формування привабливості

На мережевому рівні привабливість маршруту формується не лише локальними параметрами лінії, а й властивостями всього графа пересадок. Нехай $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{L})$ — транспортна мережа, а $p \in \mathcal{P}_{od}$ — шлях між зонами o, d . Тоді шляхова привабливість:

Подальша математична залежність подана у формулі (60).

$$A_p = \sum_{a \in p} \varphi_a - \sum_{a \in p} \chi_a(x_a) - \sum_{\nu \in \mathcal{T}(p)} \pi_\nu, \quad (60)$$

де A_p — індекс привабливості або доступності; \mathcal{T} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; φ_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі; χ_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ν — змінна або параметр відповідної математичної моделі; π — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; a — індекс спостереження, елемента або сценарію; p — змінна або параметр відповідної математичної моделі; x_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (60) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Для часу проходження дуги застосуємо BPR-тип залежності:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (61).

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left[1 + \rho \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\mu \right]. \quad (61)$$

де ρ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; μ — параметр чутливості моделі; t_a — часовий індекс; x_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t_a^0 — часовий індекс; c_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (61) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількі-

сно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Тоді ефективна корисність шляху:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (62).

$$U_p = - \sum_{a \in p} t_a(x_a) - \sum_{\nu \in \mathcal{T}(p)} \pi_\nu - \alpha_c C_p + \alpha_s S_p + \alpha_k K_p. \quad (62)$$

де \mathcal{T} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ν — змінна або параметр відповідної математичної моделі; π — змінна або параметр відповідної математичної моделі; α_c — параметр чутливості моделі; α_s — параметр чутливості моделі; α_k — параметр чутливості моделі; U_p — змінна або параметр відповідної математичної моделі; a — індекс спостереження, елемента або сценарію; p — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t_a — часовий індекс.

Співвідношення (62) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків.

Просторова неоднорідність попиту враховується через привабливість зони призначення B_d :

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (63).

$$D_{od} = \Gamma O_o B_d \exp(-\lambda c_{od}), \quad (63)$$

де λ — параметр чутливості моделі; O_o — потенціал відправлення із зони; B_d — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Рівняння (63) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Для динамічної моделі у коротких часових інтервалах використаємо систему:

Математичне представлення моделі подано у формулі (64).

$$\mathcal{A}_r(t+1) = \mathcal{A}_r(t) + \xi \left(\widehat{\mathcal{A}}_r(t) - \mathcal{A}_r(t) \right) + \varepsilon_r(t), \quad (64)$$

де \mathcal{A}_r — індекс привабливості або доступності; \mathcal{A} — індекс привабливості або доступності; ε_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; t — часовий індекс.

У формулі (64) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (65).

$$F_r(t+1) = F_r(t) + \nu (D_{od}(t)P_r(t) - F_r(t)). \quad (65)$$

де ν — змінна або параметр відповідної математичної моделі; F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс; P_r

— змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Співвідношення (65) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

У випадку шоку безпеки (інцидент, резонансна подія) використовуємо затухаючий ефект:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (66).

$$S_r^{shock}(t) = S_r(t) - \Delta_s \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_s}\right) \mathbb{I}_{t \geq t_0}. \quad (66)$$

де Δ_s — приріст (зміна) відповідного показника; τ_s — змінна або параметр відповідної математичної моделі; S_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс; t_0 — часовий індекс; I — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (66) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Тенденцію зміни показників відображено на рис. 7.

Рисунок ілюструє динаміку привабливості маршруту в часі для двох характерних сценаріїв: поступового покращення сервісу та відновлення після безпекового шоку. Видно, що траєкторії мають інерційний характер, тобто система не переходить миттєво до нового рівня, а потребує періоду адаптації. Це принципово важливо для оцінки ефективності управлінських рішень: короткий горизонт спостереження може занижувати реальний ефект інтервенції.

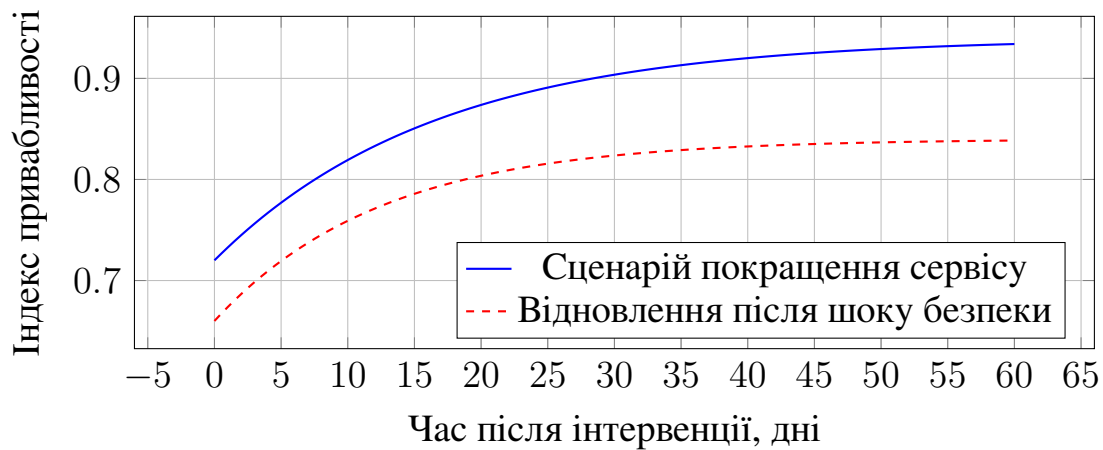


Рис. 7: Динаміка привабливості маршруту у процесі відновлення та покращення

Графік також показує, що втрати від шоку можуть бути частково компенсовані цілеспрямованим підвищенням надійності та інформаційної прозорості. Таким чином, рисунок підкреслює необхідність динамічного моніторингу, а не разових вимірювань привабливості.

Графічне представлення доповнює математичну частину та підсилює аргументацію висновків.

Мережева складність проявляється у тому, що локальне покращення може породжувати каскадні ефекти в суміжних вузлах. Для формалізації використовуємо матрицю взаємовпливу навантажень:

Аналitiчну інтерпретацію параметрів подано у формулі (67).

$$\mathbf{x}(t + 1) = \mathbf{M}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}(t), \quad (67)$$

де \mathbf{x} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathbf{M} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathbf{b} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; x — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс; M — масштабувальний або балан-

сувальний параметр моделі; b — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

У формулі (67) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Стійкість мережі до збурень можна оцінити спектральним критерієм: Подальша математична залежність подана у формулі (68).

$$\rho(\mathbf{M}) < 1, \quad (68)$$

де \mathbf{M} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; ρ — змінна або параметр відповідної математичної моделі; M — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Співвідношення (68) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

У задачах оцінки доступності важливе місце посідає потенціальна доступність зон:

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (69).

$$A_o^{pot} = \sum_d B_d \exp(-\lambda c_{od}), \quad (69)$$

де λ — параметр чутливості моделі; A_o — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; d — змінна або параметр відповідної матема-

тичної моделі; B_d — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

Рівняння (69) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

яка безпосередньо пов'язує мережеву якість маршруту з територіальною справедливістю мобільності.

Для динамічного горизонту доцільно вводити індекс інерції поведінки:

Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (70).

$$\mathfrak{I}_r = \frac{\partial F_r(t+1)}{\partial F_r(t)}. \quad (70)$$

де I — змінна або параметр відповідної математичної моделі; F_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс.

У формулі (70) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Високе значення \mathfrak{I}_r означає, що пасажери повільно змінюють звички навіть після покращень сервісу. Це важливий практичний висновок: ефект інтервенції не завжди проявляється миттєво, тому оцінка ефективності повинна мати лаговий горизонт.

Крім того, у динамічній постановці варто враховувати інформаційний ефект:

Кількісну постановку цього положення наведено у формулі (71).

$$I_r(t + 1) = I_r(t) + v (I_r^{app}(t) - I_r(t)), \quad (71)$$

де I_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; t — часовий індекс.

Співвідношення (71) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Наведений вираз уточнює структуру моделі та окреслює логіку подальших розрахунків.

Поєднання мережевої, просторової та інформаційної динаміки дозволяє адекватніше відтворювати поведінку у режимах пікового навантаження, тимчасових перекриттів і післяаварійного відновлення. Для транспортної агенції це означає перехід від статичної до «живої» моделі привабливості, де оперативні сигнали автоматично впливають на прогнози потоків і рекомендації з управління.

8.4 Калібрування, сценарне оцінювання та управлінські інтервенції

Практичне використання моделей привабливості потребує стабільної процедури калібрування, щоб параметри були інтерпретованими і придатними для управлінських рішень. Параметри Θ оцінюємо за максимальною правдоподібністю:

Математичне представлення моделі подано у формулі (72).

$$\hat{\Theta} = \arg \max_{\Theta} \sum_{n=1}^N \sum_{r \in \mathcal{R}} y_{nr} \ln P_{nr}(\Theta), \quad (72)$$

де \mathcal{R} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; n — індекс спостереження, елемента або сценарію; N — змінна або параметр відповідної математичної моделі; r — індекс спостереження, елемента або сценарію; R — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (72) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Для інтеграції з лічильниками потоків використовуємо змішаний функціонал помилки:

Формалізацію розглянутого процесу подано у формулі (73).

$$\min_{\Theta} \mathcal{L}(\Theta) = \lambda_1 \sum_a (x_a^{obs} - x_a^{mod})^2 + \lambda_2 \sum_{n,r} (y_{nr} - P_{nr})^2 + \lambda_3 \sum_r (\mathcal{A}_r^{obs} - \mathcal{A}_r^{mod})^2. \quad (73)$$

де \mathcal{L} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; \mathcal{A}_r^{obs} — спостережене (фактичне) значення показника; \mathcal{A}_r^{mod} — модельне (розрахункове) значення показника; λ_1 — параметр чутливості моделі; λ_2 — параметр чутливості моделі; λ_3 — параметр чутливості моделі; L — змінна або параметр відповідної математичної моделі; a — індекс спостереження, елемента або сценарію; x_a — змінна або параметр відповідної математичної моделі; n — індекс спостереження, елемента або сценарію.

У формулі (73) зафіксовано математичну залежність між ключовими

параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Якість відтворення перевіряємо набором КРІ:

Для строгого опису використаємо вираз у формулі (74).

$$\text{КРІ} = \{\text{MAPE}_{flow}, \text{RMSE}_{time}, \Delta P_{transfer}, \Delta S_{peak}, \Delta A_{coverage}\}. \quad (74)$$

де Δ — приріст (зміна) відповідного показника.

Співвідношення (74) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та обґрунтувати вибір керуючих дій.

Сценарний ефект інтервенції k :

Аналітичну інтерпретацію параметрів подано у формулі (75).

$$\Delta \mathcal{A}_r^{(k)} = \mathcal{A}_r \left(\mathbf{y} + \Delta \mathbf{y}^{(k)} \right) - \mathcal{A}_r(\mathbf{y}). \quad (75)$$

де \mathcal{A}_r — індекс привабливості або доступності; \mathbf{y} — змінна або параметр відповідної математичної моделі; Δ — приріст (зміна) відповідного показника; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; y — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (75) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати

числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Задача оптимального пакета змін:

Подальша математична залежність подана у формулі (76).

$$\max_{\Delta y} \sum_r w_r \Delta \mathcal{A}_r \quad \text{за умов} \quad \sum_k c_k |\Delta y_k| \leq B, \quad (76)$$

де \mathcal{A}_r — індекс привабливості або доступності; y — змінна або параметр відповідної математичної моделі; Δ — приріст (зміна) відповідного показника; y — змінна або параметр відповідної математичної моделі; w_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; c_k — змінна або параметр відповідної математичної моделі; y_k — змінна або параметр відповідної математичної моделі; B — масштабувальний або балансувальний параметр моделі.

У формулі (76) зафіксовано математичну залежність між ключовими параметрами системи та цільовим індикатором. Такий запис дозволяє кількісно оцінити внесок кожного чинника і коректно порівнювати альтернативні сценарії розвитку мережі.

Відповідний аналітичний вираз наведено у формулі (77).

$$\Delta S_{ineq} \leq 0, \quad (77)$$

де Δ — приріст (зміна) відповідного показника.

Співвідношення (77) задає правило обчислення результативного показника на основі вхідних параметрів моделі. Його практична цінність полягає в можливості пояснити зміну підсумку при варіюванні окремих складових та

обґрунтувати вибір керуючих дій.

Для пріоритезації інтервенцій використовуємо показник «ефект/вартість»:
Шуканий функціональний зв'язок зафіксовано у формулі (78).

$$\Pi_k = \frac{\sum_r w_r \Delta A_r^{(k)}}{c_k}. \quad (78)$$

де A_r — індекс привабливості або доступності; Δ — приріст (зміна) відповідного показника; w_r — змінна або параметр відповідної математичної моделі; A — масштабувальний або балансувальний параметр моделі; k — індекс спостереження, елемента або сценарію; c_k — змінна або параметр відповідної математичної моделі.

Рівняння (78) описує, як із сукупності факторів формується шуканий показник транспортної системи. Завдяки цій формі можна не лише отримати числовий результат, а й виконати інтерпретацію чутливості та перевірити стійкість рішення в різних умовах.

Відповідну візуалізацію параметричних зв'язків наведено на рис. 8.

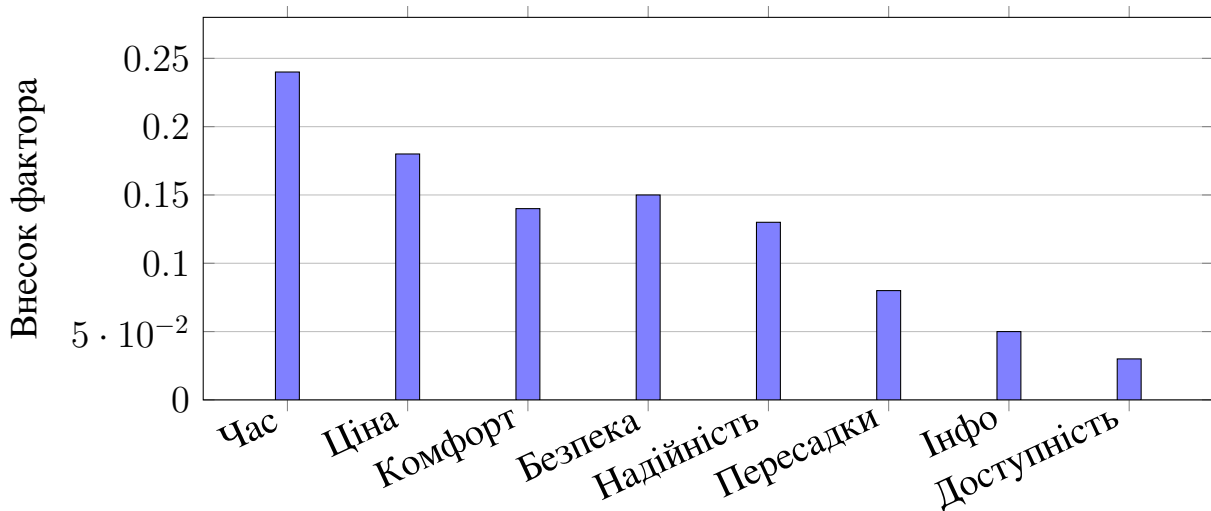


Рис. 8: Структура внесків факторів у привабливість маршруту (приклад калібрування)

На рисунку подано структуру вагових внесків факторів у інтегральний індекс привабливості маршруту за результатами калібрування моделі. Візуально видно, що найбільший внесок припадає на часові та цінові характеристики, проте безпека, комфорт і надійність формують суттєвий коригувальний контур. Це означає, що навіть за конкурентного тарифу маршрут може втрачати пасажирів через низьку регулярність або погані умови поїздки. Графік дозволяє оператору ранжувати управлінські пріоритети: спочатку впливати на фактори з максимальною вагою, а далі на підтримувальні компоненти якості сервісу. Практично така інтерпретація підсилює обґрунтованість рішень у межах обмеженого бюджету інтервенцій.

Наведена схема дозволяє швидко оцінити співвідношення між основними компонентами моделі.

Отримані моделі дозволяють переходити від описового аналізу до керованого перерозподілу попиту. Для оператора це означає можливість заздалегідь оцінювати, як конкретний набір змін (тариф, інтервал, пересадковий вузол, пріоритет руху, інформаційний сервіс, безпекові заходи) вплине на структуру потоків, перевантаження і доступність.

8.5 Висновки до розділу

Розділ показує, що привабливість маршруту є багатофакторною й динамічною категорією, яка визначається нелінійною взаємодією часу, вартості, комфорту, безпеки, надійності, доступності та якості пересадок. Практична цінність полягає в тому, що ці фактори можуть бути формалізовані у вигляді індексів, функцій корисності, мережових і динамічних моделей, придатних до калібрування на реальних даних.

Запропонована рамка дає змогу перейти від фрагментарних рішень до системного управління привабливістю: оцінювати еластичності, моделювати перерозподіл попиту, порівнювати сценарії та вибирати оптимальні інтервенції в межах бюджетних і соціальних обмежень. Для міських, приміських і міжміських систем це створює методичну основу стійкого підвищення якості сервісу, зменшення перевантажень і посилення доступності транспортних послуг для різних груп пасажирів [131, 129, 128, 132, 102, 125, 110].

Висновки по роботі

У виконаній монографічній роботі комплексно досліджено пасажирські транспортні кореспонденції як системоутворювальний інструмент сучасного транспортного планування та операційного управління. Проведений аналіз підтвердив, що саме якість формування, валідації та інтерпретації OD-структури визначає результативність рішень на всіх рівнях — від добового диспетчерського налаштування до стратегічного розвитку маршрутної мережі. Транспортні кореспонденції в роботі обґрунтовано не як статичний статистичний продукт, а як динамічний керуючий шар, що поєднує поведінкову реакцію пасажирів, параметри сервісу та мережеві обмеження.

Першим ключовим підсумком є систематизація методичних підходів до побудови та оновлення матриць кореспонденцій у міських, приміських, міжміських і міжнародних умовах перевезень. Показано, що помилки на етапі оцінювання OD-матриці мають мультиплікативний характер і зумовлюють каскадні викривлення в прогнозах завантаження, пересадкових режимах та розподілі ресурсу рухомого складу. Саме тому в роботі обґрунтовано доцільність переходу від рідко оновлюваних «середніх» матриць до динамічних постановок із регулярним пере-калібруванням та контролем якості на незалежних вибірках даних.

Другим підсумком є поглиблення математичного апарату керованого перерозподілу пасажиропотоків. У роботі поєднано гравітаційні, поведінкові та мережеві підходи, що дозволило описати механізм формування потоків як результат одночасної дії міжзонної привабливості, узагальнених витрат досягнення та ймовірного маршрутного вибору. Доведено, що локальна ін-

тервенція (зміна інтервалу, траси, пересадкового вузла або тарифної логіки) зазвичай породжує нелокальний ефект у мережі, тому оцінювання ефективності рішень має проводитися в системній, а не фрагментарній постановці.

Третій підсумок стосується привабливості маршрутів як центрального фактора управління попитом. У межах спеціально розробленого розділу продемонстровано, що привабливість формується нелінійною взаємодією часу поїздки, очікування, комфорту, безпеки, вартості, надійності, інформаційної прозорості та умов пересадки. Запропоновані індексні та функціональні моделі дозволяють не лише порівнювати альтернативні маршрути, але й формувати цільові пакети інтервенцій із вимірюваним ефектом для конкретних сегментів пасажирів. Для практики це означає перехід від інтуїтивного управління до формалізованої системи підтримки рішень із прогнозованим результатом.

Четвертим підсумком є обґрунтування багаторівневої рамки валідації. Показано, що якісна модель повинна перевірятися не тільки за середніми похибками потоків, а й за операційно значущими КРІ: точність у контрольних перерізах, відтворення пікових навантажень, коректність частки пересадочних поїздок, стабільність повного часу подорожі, стійкість прогнозу на позабазових днях. Такий підхід зменшує ризик хибної «ілюзії точності», коли модель демонструє прийнятну середню помилку, але не придатна для реального диспетчерського чи тактичного управління в критичних режимах роботи.

П'ятим підсумком є практичний регламент впровадження OD-аналітики в діяльність транспортних агенцій. У роботі запропоновано циклічну організаційну схему: збір і узгодження даних, калібрування, сценарне тестування, пілотне впровадження, постаудит і повторне оновлення параметрів. Такий контур формує безперервний процес підвищення якості рішень, забезпечує

зіставність результатів між періодами і підвищує керованість транспортної системи в умовах невизначеності попиту та операційних збурень.

Окремо слід відзначити прикладну значущість результатів для різних просторових рівнів. Для міських систем найбільш критичними визначено регулярність сервісу, пересадкову узгодженість і керування піковими перевантаженнями. Для приміських перевезень вирішальними є повний час «двері–двері», інтеграція підвезення з магістральними маршрутами та тарифна цілісність. Для міжміських і міжнародних систем ключовими виявляються міжвидова конкуренція, надійність хабових стикувань і сценарна стійкість до каскадних затримок. Таким чином, у роботі підтверджено необхідність диференційованої параметризації моделей залежно від масштабу та функціонального типу транспортної системи.

Наукова новизна виконаного дослідження полягає у поєднанні класичної OD-парадигми з data-driven підходами, мережевими індикаторами стійкості та регламентною логікою управління. На відміну від підходів, що обмежуються описом середніх потоків, запропонована методична рамка орієнтована на керованість: здатність оператора цілеспрямовано змінювати структуру попиту через узгоджені транспортні інтервенції. Це відкриває можливість переходу від реактивного реагування на перевантаження до проактивного сценарного управління.

Практична цінність роботи полягає в можливості безпосереднього використання розроблених моделей і регламентів у транспортних агенціях, органах місцевого самоврядування, проєктних офісах розвитку мобільності та науково-освітніх програмах підготовки фахівців. Отримані результати придатні для обґрунтування рішень щодо перерозподілу випуску, оптимізації

маршрутної структури, пріоритезації вузлів інтеграції, корекції тарифних механізмів і оцінювання соціальної доступності транспортних послуг.

Отже, поставлену мету дослідження досягнуто. Розроблений у роботі теоретико-прикладний підхід формує цілісну методичну основу для підвищення надійності, доступності та ефективності пасажирських перевезень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення сегментних поведінкових моделей, інтеграцію потокових і тарифних рішень у єдиній оптимізаційній постановці, а також на розвиток цифрових двійників транспортних мереж для підтримки рішень у режимі, близькому до реального часу.

Список літератури

Література

- [1] Meyer, M. D., & Miller, E. J. (2001). *Urban transportation planning: A decision-oriented approach* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [2] Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). Wiley.
- [3] Vuchic, V. R. (2005). *Urban transit: Operations, planning, and economics*. Wiley.
- [4] Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods*. Prentice-Hall.
- [5] Cascetta, E., & Nguyen, S. (1988). A unified framework for estimating

- or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(6), 437–455.
- [6] Cascetta, E. (1984). Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator. *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(4–5), 289–299.
- [7] Van Zuylen, H. J., & Willumsen, L. G. (1980). The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(3), 281–293.
- [8] Yang, H., Iida, Y., & Sasaki, T. (1991). An analysis of the reliability of an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(5), 351–363.
- [9] Yang, H. (1995). Heuristic algorithms for the bilevel origin-destination matrix estimation problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(4), 231–242.
- [10] Zhou, X., Qin, X., & Mahmassani, H. S. (2003). Dynamic origin-destination demand estimation with multiday link traffic counts for planning applications. *Transportation Research Record*, 1831(1), 30–38.
- [11] Bierlaire, M., Crittin, F., & Toint, P. L. (2008). A Monte-Carlo approach for estimating origin-destination matrices. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6), 590–607.
- [12] Baum-Snow, N. (2010). Changes in transportation infrastructure and commuting patterns in U.S. metropolitan areas, 1960–2000. *American Economic Review*, 100(2), 378–382.

- [13] Agyemang, W., Cheng, L., & Vanclay, F. (2020). Spatial structure, intra-urban commuting patterns and travel mode choice: Analyses of relationships in the Kumasi Metropolis, Ghana. *Cities*, 96, 102432.
- [14] Allen, J., & Farber, S. (2021). Suburbanization of transport poverty. *Annals of the American Association of Geographers*, 111(6), 1833–1850.
- [15] Le, J., & Teng, J. (2023). Understanding influencing factors of travel mode choice in urban-suburban travel: A case study in Shanghai. *Urban Rail Transit*, 9, 127–146.
- [16] Barrat, A., Barthélemy, M., Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2004). The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(11), 3747–3752.
- [17] Guimerà, R., Mossa, S., Turtschi, A., & Amaral, L. A. N. (2005). The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(22), 7794–7799.
- [18] Pelletier, M.-P., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557–568.
- [19] Munizaga, M. A., & Palma, C. (2012). Estimation of a disaggregate multi-modal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 9–18.

- [20] Alexander, L., Jiang, S., Murga, M., & González, M. C. (2015). Origin–destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 240–250.
- [21] Zheng, Y., Liu, X., & Chen, W. (2022). Data-driven origin–destination matrix estimation: A review of methods and applications. *Transport Reviews*, 42(6), 743–770.
- [22] Ceder, A. (2016). *Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior* (2nd ed.). CRC Press.
- [23] Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80.
- [24] Litman, T. (2023). *Transportation demand management encyclopedia*. Victoria Transport Policy Institute.
- [25] Ashok, K., & Ben-Akiva, M. E. (1996). Alternative approaches for real-time estimation and prediction of time-dependent origin-destination flows. *Transportation Science*, 34(1), 21–36.
- [26] Cascetta, E., Inaudi, D., & Marquis, G. (1993). Dynamic estimators of origin-destination matrices using traffic counts. *Transportation Science*, 27(4), 363–373.
- [27] Lo, H. P., & Chan, Y. C. (1996). Simultaneous estimation of an origin-destination matrix and link choice proportions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(2), 109–125.

- [28] Bell, M. G. H. (1997). The estimation of origin-destination matrices by constrained generalized least squares. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(1), 13–22.
- [29] Nielsen, O. A. (2000). A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(5), 377–402.
- [30] Cipriani, E., Florian, M., Mahut, M., & Nigro, M. (2011). A gradient approximation approach for adjusting temporal origin-destination matrices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(2), 270–282.
- [31] Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand*. MIT Press.
- [32] Train, K. E. (2009). *Discrete choice methods with simulation* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [33] Bovy, P. H. L., & Stern, E. (2001). *Route choice: Wayfinding in transport networks*. Kluwer Academic Publishers.
- [34] Spiess, H., & Florian, M. (1989). Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(2), 83–102.
- [35] Nguyen, S., & Pallottino, S. (1988). Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks. *European Journal of Operational Research*, 37(2), 176–186.

- [36] Furth, P. G., & Rahbee, A. (2000). Optimal bus stop spacing through dynamic programming and geographic modeling. *Transportation Research Record*, 1731(1), 15–22.
- [37] Wilson, A. G. (1970). *Entropy in urban and regional modelling*. Pion.
- [38] Timmermans, H. J. P. (Ed.). (2009). *Handbook of urban mobility*. Springer.
- [39] Batty, M. (2013). *The new science of cities*. MIT Press.
- [40] Cats, O., Larijani, A. N., Koutsopoulos, H. N., & Burghout, W. (2015). Impacts of holding control strategies on transit performance and passenger behaviour. *Transportmetrica A: Transport Science*, 11(10), 1–25.
- [41] Mazloumi, E., Currie, G., & Rose, G. (2010). Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability. *Journal of Transportation Engineering*, 136(7), 623–631.
- [42] Toole, J. L., Colak, S., Sturt, B., Alexander, L. P., Evsukoff, A., & Gonzalez, M. C. (2015). The path most traveled: Travel demand estimation using big data resources. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 162–177.
- [43] Holtzclaw, J., Clear, R., Dittmar, H., Goldstein, D., & Haas, P. (2002). Location efficiency: Neighborhood and socio-economic characteristics determine auto ownership and use. *Transportation Planning and Technology*, 25(1), 1–27.
- [44] El-Geneidy, A., Levinson, D., Diab, E., Boisjoly, G., Verbich, D., & Loong, C. (2016). The cost of equity: Assessing transit accessibility and social

- disparity using total travel cost. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91, 302–316.
- [45] Manley, E., Zhong, C., & Batty, M. (2018). Spatiotemporal variation in travel regularity through transit user profiling. *Transportation*, 45(3), 703–732.
- [46] Wegener, M. (2004). Overview of land-use transport models. In D. A. Hensher & K. J. Button (Eds.), *Handbook of transport geography and spatial systems* (pp. 127–146). Elsevier.
- [47] McNally, M. G. (2007). The four step model. In D. A. Hensher & K. J. Button (Eds.), *Handbook of transport modelling* (2nd ed., pp. 35–53). Elsevier.
- [48] Stopher, P. R., & Greaves, S. P. (2007). Household travel surveys: Where are we going? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(5), 367–381.
- [49] Derrible, S., & Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A*, 389(17), 3678–3691.
- [50] von Ferber, C., Holovatch, T., Holovatch, Y., & Palchykov, V. (2009). Public transport networks: Empirical analysis and modeling. *The European Physical Journal B*, 68(2), 261–275.
- [51] Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems* (5th ed.). Routledge.
- [52] Kivela, M., Arenas, A., Barthélemy, M., Gleeson, J. P., Moreno, Y., & Porter, M. A. (2014). Multilayer networks. *Journal of Complex Networks*, 2(3), 203–271.

- [53] Boccaletti, S., Bianconi, G., Criado, R., Del Genio, C. I., Gómez-Gardeñes, J., Romance, M., et al. (2014). The structure and dynamics of multilayer networks. *Physics Reports*, 544(1), 1–122.
- [54] De Domenico, M., Solé-Ribalta, A., Cozzo, E., Kivela, M., Moreno, Y., Porter, M. A., et al. (2013). Mathematical formulation of multilayer networks. *Physical Review X*, 3(4), 041022.
- [55] Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 45(2), 167–256.
- [56] Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701.
- [57] Sienkiewicz, J., & Holyst, J. A. (2005). Statistical analysis of public transport networks. *Physical Review E*, 72(4), 046127.
- [58] Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Metropolitan Association of Urban Designers.
- [59] Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140.
- [60] Bertolini, L. (2009). Integrating transport and urban development agendas. *Transport Policy*, 16(2), 69–78.
- [61] Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks. *Physical Review E*, 73(3), 036125.
- [62] Cardillo, A., Gómez-Gardeñes, J., Zanin, M., et al. (2013). Emergence of network features from multiplexity. *Scientific Reports*, 3, 1344.

- [63] Gallotti, R., & Barthelemy, M. (2015). The multilayer temporal network of public transport. *Scientific Data*, 2, 140056.
- [64] Cats, O., Larijani, A. N., Koutsopoulos, H. N., & Burghout, W. (2015). Impacts of holding control strategies on transit performance. *Transportmetrica A*, 11(10), 1–25.
- [65] Mazloumi, E., Currie, G., & Rose, G. (2010). Using GPS data to analyze transit travel time variability. *Journal of Transportation Engineering*, 136(7), 623–631.
- [66] Toole, J. L., Colak, S., Sturt, B., et al. (2015). Travel demand estimation using big data resources. *Transportation Research Part C*, 58, 162–177.
- [67] Wegener, M. (2004). Overview of land-use transport models. In Hensher & Button (Eds.), *Handbook of transport geography and spatial systems* (pp. 127–146). Elsevier.
- [68] McNally, M. G. (2007). The four step model. In Hensher & Button (Eds.), *Handbook of transport modelling* (2nd ed., pp. 35–53). Elsevier.
- [69] El-Geneidy, A., Levinson, D., Diab, E., et al. (2016). The cost of equity in transit accessibility. *Transportation Research Part A*, 91, 302–316.
- [70] Holtzclaw, J., Clear, R., Dittmar, H., et al. (2002). Location efficiency and auto ownership. *Transportation Planning and Technology*, 25(1), 1–27.
- [71] Levinson, D., & King, D. (2020). Transport access manual. *Journal of Transport and Land Use*, 13(1), 335–350.
- [72] Button, K. (2010). *Transport economics* (3rd ed.). Edward Elgar.

- [73] Batty, M. (2013). *The new science of cities*. MIT Press.
- [74] Karlaftis, M. G. (2004). A DEA approach for evaluating the efficiency and effectiveness of urban transit systems. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 354–364. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00029-8)
- [75] Daraio, C., Diana, M., Di Costa, F., Leporelli, C., Matteucci, G., & Nastasi, A. (2016). Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: A critical review with directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.059>
- [76] Fitzová, H., Matulová, M., & Tomeš, Z. (2018). Determinants of urban public transport efficiency: Case study of the Czech Republic. *European Transport Research Review*, 10, 42. <https://doi.org/10.1186/s12544-018-0311-y>
- [77] Han, J., & Hayashi, Y. (2008). A data envelopment analysis for evaluating the performance of China's urban public transport systems. *International Journal of Urban Sciences*, 12(2), 173–183. <https://doi.org/10.1080/12265934.2008.9693639>
- [78] Yu, M.-M., & Lin, E. T. J. (2012). Route-based data envelopment analysis models. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.10.006>
- [79] Higashimoto, Y., Kishi, K., & Sato, K. (2005). Comprehensive evaluation for efficiency of bus routes with data envelopment analysis.

- Journal of the City Planning Institute of Japan*, 40(3), 379–384.
<https://doi.org/10.11361/journalcpij.40.3.379>
- [80] Hahn, J.-S., Kim, H.-R., & Kho, S.-Y. (2010). A DEA approach for evaluating the efficiency of bus routes. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, 1217–1229. <https://doi.org/10.11175/easts.8.1217>
- [81] Sun, D. J., Chen, S., Zhang, C., & Shen, S. (2016). A bus route evaluation model based on GIS and super-efficient data envelopment analysis. *Transportation Planning and Technology*, 39(4), 358–372. <https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1160582>
- [82] Gomes de Assis, L., Milioni, A. Z., & Oliveira, F. R. (2013). Efficiency of urban public transport: Case study of Brazilian cities. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(24), 379–384. <https://doi.org/10.3182/20130911-3-BR-3021.00019>
- [83] Tian, Q., Wang, D. Z. W., & Lin, Y. H. (2021). Service operation design in a transit network with congested common lines. *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 81–102. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.12.003>
- [84] An, K., Lo, H. K., & Tang, Q. (2016). Two-phase stochastic program for transit network design under demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 84, 157–181. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.12.009>
- [85] An, K., Lo, H. K., & Tang, Q. (2015). Robust transit network design with stochastic demand considering development densi-

- ty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 737–754. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.019>
- [86] Arbex, R. O., & da Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 355–376. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.06.014>
- [87] Cats, O., Yap, M., & Van Oort, N. (2017). Exposing transfer synchronisation inefficiencies in rail networks. *Journal of Transport Geography*, 62, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.10.010>
- [88] Pei, A., Xiao, F., Yu, S., & Li, L. (2022). Efficiency in the evolution of metro networks. *Scientific Reports*, 12, 8326. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12053-3>
- [89] Duranton, G., & Turner, M. A. (2011). The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. *American Economic Review*, 101(6), 2616–2652. <https://doi.org/10.1257/aer.101.6.2616>
- [90] Ranaldi, M., & Bekhor, S. (2021). Estimating the impact of transport policies on economic productivity: A review and synthesis. *Economics of Transportation*, 28, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2021.100196>
- [91] Guihaire, V., & Hao, J.-K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(10), 1251–1273. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.12.011>
- [92] Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. G. (2009). The transit route network

- design problem: Review. *Journal of Transport Geography*, 17(4), 335–344.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.10.002>
- [93] Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57, 264–287.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.09.006>
- [94] Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38–75.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.002>
- [95] Paulley, N., Balcombe, R., Mackett, R., Titheridge, H., Preston, J., Wardman, M., et al. (2006). The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Transport Policy*, 13(4), 295–306.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.12.004>
- [96] Wardman, M. (2012). Review and meta-analysis of U.K. time elasticities of travel demand. *Transportation*, 39, 465–490.
<https://doi.org/10.1007/s11116-010-9327-1>
- [97] Spiess, H., & Florian, M. (1989). Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(2), 83–102. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90034-9)
- [98] Redman, L., Friman, M., Gärling, T., & Hartig, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*, 25, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.11.005>

- [99] Muñoz, J. C., & Palma, C. (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.05.007>
- [100] Alexander, L., Jiang, S., Murga, M., & González, M. C. (2015). Origin–destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.07.013>
- [101] Ling, X., Huang, Z., Wang, C., & Zhang, F. (2018). Exploring the temporal-spatial evolution of urban commuting patterns using transit smart card data. *PLOS ONE*, 13(8), e0202707. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202707>
- [102] Xu, R., Lin, Y., & Wang, D. Z. W. (2022). Passenger flow propagation and crowding risk in urban rail transit networks. *Transportation Research Record*, 2676(3), 187–201. <https://doi.org/10.1177/03611981211058432>
- [103] Liu, B., Zhao, J., Wang, Y., & Sun, L. (2023). Data-driven methods for urban passenger flow dynamics: A synthesis and future agenda. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 381(2257), 20220253. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0253>
- [104] Cui, Y., Wang, H., & Li, Q. (2025). Spatiotemporal prediction of metro passenger flow using hybrid deep learning under disturbances. *PLOS ONE*, 20(8), e0333094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333094>
- [105] Zhu, Y., Yan, X., & Wang, J. (2021). Dynamic passenger flow and station congestion in urban rail transit: Evidence from AFC data. *Internati-*

- onal Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8462.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18168462>
- [106] Zeng, Z., Liu, Y., & Li, Y. (2022). Accessibility inequality and transit passenger flow distribution in metropolitan areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16433.
<https://doi.org/10.3390/ijerph192416433>
- [107] Lu, Y., Zhou, X., & Zhang, L. (2022). Large-scale urban mobility modeling and control with multi-source transportation data. *Engineering*, 18, 155–168.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.09.016>
- [108] Le, V. T., & Teng, J.-Y. (2023). Travel behavior dynamics and commuter flow adaptation in suburban transit systems. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 21, 475–491.
<https://doi.org/10.1007/s40864-023-00190-5>
- [109] He, S., Zhou, P., & Chen, X. (2022). Route choice behavior and transfer reliability in multimodal commuter networks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16045.
<https://doi.org/10.3390/ijerph192316045>
- [110] Shen, Y., Peng, Z., & Wang, X. (2023). A digital twin framework for real-time monitoring of public transport passenger flows. *Sensors*, 23(13), 6091.
<https://doi.org/10.3390/s23136091>
- [111] Cheng, Y.-H., Qin, X., & Li, S. (2014). Measures for practical transit network operation under passenger flow uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 560919. <https://doi.org/10.1155/2014/560919>

- [112] Lunke, E. B., Fearnley, N., & Aarhaug, J. (2021). Public transport datasets for analyzing commuter flow resilience: A data descriptor. *Data in Brief*, 39, 107319. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107319>
- [113] Li, Y., Zhao, X., & Chen, L. (2023). High-speed rail and intercity passenger flow restructuring: A panel evidence approach. *PLOS ONE*, 18(4), e0284747. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284747>
- [114] Xu, J., Zhang, Y., & Luo, H. (2024). Intercity demand redistribution after high-speed rail expansion: A spatiotemporal analysis. *PLOS ONE*, 19(10), e0312745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312745>
- [115] Cao, J., Li, S., & Guo, T. (2024). Modeling multimodal substitution in intercity passenger transport corridors. *PLOS ONE*, 19(11), e0314713. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314713>
- [116] Zhang, W., Liu, J., & Huang, Z. (2025). Evolution of high-speed rail passenger corridors and regional flow polarization. *Scientific Reports*, 15, 19392. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19392-x>
- [117] Li, X., Wu, P., & Sun, H. (2022). Commuting patterns and public transit dependence in suburban belts: A case-based assessment. *Frontiers in Public Health*, 10, 1046922. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1046922>
- [118] Guimerà, R., Mossa, S., Turtschi, A., & Amaral, L. A. N. (2005). The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(22), 7794–7799. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407994102>

- [119] Mao, L., Wu, X., Huang, Z., & Tatem, A. J. (2015). Modeling monthly flows of global air travel passengers: An open-access data resource. *Journal of Transport Geography*, *48*, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.08.017>
- [120] Huynh, C. N., Nguyen, T. T., & Nguyen, H. T. (2024). International travel demand recovery and route-level passenger flow shifts in the post-shock period. *PLOS ONE*, *19*(3), e0299897. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299897>
- [121] Bao, L., Long, D., & Zhao, X. (2021). Topological resilience of the global airline network under major disruptions. *Royal Society Open Science*, *8*(12), 210682. <https://doi.org/10.1098/rsos.210682>
- [122] Zhou, Y., Li, X., & Yang, H. (2021). Pandemic-era structural changes in international air passenger flows and network efficiency. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *153*, 102469. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102469>
- [123] Diop, L., Burghouwt, G., & Müller, J. (2021). Hub dependence and vulnerability in intercontinental air transport networks. *European Transport Research Review*, *13*, 57. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00430-2>
- [124] Manca, F., Pigoli, D., & Porta, S. (2023). Multiscale analysis of commuter flows linking suburban and metropolitan cores. *Transportation Research Record*, *2677*(2), 145–160. <https://doi.org/10.1177/03611981211025287>
- [125] Jafari, A., & Lewison, G. (2024). Artificial intelligence methods for passenger flow forecasting in large transportation networks:

- A review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, 1429341.
<https://doi.org/10.3389/frai.2024.1429341>
- [126] Dolia, V. K., Dolia, K. V., & Dolia, O. Y. (2023). Модель функціонування авіаційної маршрутної мережі. *Science-Based Technologies*, 3(59), 315–324. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17952>
- [127] Dolia, K. V., & Kobrina, N. V. (2022). Закономірності зміни параметрів функціонування системи міжміських пасажирських перевезень. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 1(4), 73–84. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220104.10>
- [128] Dolia, K. V., & Dolia, O. Y. (2023). Моделювання технології пасажирських маршрутних перевезень. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 3, 117–124. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-3.14>
- [129] Dolia, K. V., & Dolia, O. Y. (2023). Системне моделювання функціонування маршрутів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 34(6), 201–208. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/35>
- [130] Dolia, K. V., & Dolia, O. Y. (2024). Системне моделювання функціонування маршрутів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(1-2), 177–184. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/27>
- [131] Dolia, K. V., & Kobrina, N. V. (2024). Concerning the application of gravity modeling network analysis. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(1), 66–74. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240301.08>

- [132] Dolia, V. K., Dolia, K. V., & Dolia, O. Y. (2021). Mathematical formalization of the function of determining the efficiency of passenger transport systems. *Science and Technique*, 20(6), 514–521. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-514-521>
- [133] Dolia, V. K., Dolia, K. V., & Dolia, O. Y. (2021). Determining parameters of functioning of passenger transport routes by means of computer simulation of processes. *Science and Technique*, 20(6), 514–521. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-514-521>
- [134] Dolia, K. V., & Kobrina, N. V. (2024). Analysis of redistribution effects in intercity passenger transport systems. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(1), 75–83. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240301.08>