

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи бакалавра

на тему: *Оцінка впливу рівня заповнюваності рухомого складу на сприйнятий час поїздки та привабливість маршрутної мережі пасажирського транспорту*

м. Кривий Ріг

Виконав:

студент 4 курсу, групи ТТ-22 _____ Д.О.Панченко

(шифр групи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент _____

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

В.О.Сістук

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор _____

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ю.А. Монастирський

(прізвище та ініціали)

Кривий Ріг – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Галузь знань: J – «Транспорт та послуги»

Спеціальність: J8 – «Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
автомобільного транспорту

_____/_____
”_____” 2026 р. . /

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТА *Панченка Дмитра Олександровича*

- Тема: *Оцінка впливу рівня заповнюваності рухомого складу на сприйнятий час поїздки та привабливість маршрутної мережі пасажирського транспорту м. Кривий Ріг*
керівник проекту Сістук В.О., к.т.н., доцент
затверджені наказом університету № в191с від 07.04.2026.
- Строк подання студентом роботи для перевірки на плагіат до 10.06.2026.
- Вихідні дані до роботи: Керівництво до програми VISUM, транспортна модель м. Кривий Ріг
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз теоретичних підходів. 2. Моделювання транспортного попиту. 3. Аналіз результатів та безпека на транспорті. 4. Оформлення пояснювальної записки.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графіки та діаграми по результатам досліджень у вигляді презентації в програмі Microsoft Office Power Point.
- Дата видачі завдання 07.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Аналіз теоретичних підходів	07.04-12.04	
2	Моделювання транспортного попиту	12.04 – 04.05	
3	Аналіз результатів та безпека на транспорті	04.05 – 10.05	
4	Оформлення пояснювальної записки і презентації	10.05 – 25.05	

Студент

Д.О. Панченко

Керівник

В.О. Сістук

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження. Процес перерозподілу пасажиропотоків у мережах громадського транспорту в умовах обмеженої пропускної здатності та суб'єктивного сприйняття часу у дорозі.

Мета роботи. Розробка методичного підходу до оцінювання привабливості транспортної мережі через інтеграцію впливу наповненості рухомого складу на сприйняте викривлення часу подорожі.

Наукова новизна та результати. У роботі доведено, що традиційні моделі розподілу попиту без урахування місткості рухомого складу дають суттєві похибки у прогнозуванні привабливості маршрутів. Впроваджено експоненціальну функцію дискомфорту та кубічну залежність для моделювання «бар'єру посадки», що дозволило математично формалізувати «штрафний» час, який пасажир підсвідомо додає до фактичної тривалості поїздки при надмірному заповненні салону.

Реалізовано вдосконалений ітераційний метод розподілу попиту з алгоритмами згладжування, що забезпечує стабільність транспортної моделі. Для масштабних систем запропоновано спрощений метод оцінки через матрицю пропускної здатності, що оптимізує обчислювальні витрати.

Практичне значення. На прикладі транспортної системи м. Кривий Ріг встановлено, що для 35% рейсів у місті умови перевезення класифікуються як «надмірний дискомфорт», що призводить до сприйняття часу поїздки у 7 разів довшим за фактичний. Обґрунтовано необхідність переходу від рухомого складу малої місткості до автобусів великого класу на магістральних напрямках для відновлення привабливості мережі.

Ключові слова: громадський транспорт, привабливість маршрутної мережі, сприйнятий час поїздки, коефіцієнт заповнюваності, транспортний дискомфорт, PTV Visum, бар'єр посадки.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ПРИВАБЛИВОСТІ ТА ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ.....	8
1.1. Підходи до оцінювання сприйнятого часу подорожі в пасажирських системах.....	8
1.2. Підходи до оцінювання привабливості поїздок на громадському транспорті	9
1.3. Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ ЗА УМОВ ОБМЕЖЕНОЇ МІСТКОСТІ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ.....	15
2.1. Математична інтерпретація факторів дискомфорту пасажирів у моделях розподілу транспортних потоків.....	15
2.2. Реалізація методу в транспортній моделі.....	21
2.3. Висновки до розділу 2.....	33
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІВНЯ ЗАПОВНЮВАНOSTІ РУХОМОГО СКЛАДУ НА ПРИВАБЛИВІСТЬ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖІ ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ	35
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ПРИ ПОСАДЦІ В ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ.....	42
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасна парадигма розвитку систем громадського транспорту (ГТ) базується на переході від суто техніко-економічних показників (кілометраж, пасажиромісткість) до людино-центричного підходу. У цьому контексті одним із найменш вивчених, але критично важливих аспектів є рівень заповнюваності рухомого складу та його детермінуючий вплив на поведінкові реакції пасажирів. Актуальність вивчення цього питання обумовлена кількома науково-практичними факторами.

Дослідження в галузі транспортної психології доводять, що час поїздки не є константою в усвідомленні пасажира. Наповненість салону виступає потужним «модератором» дискомфорту. При досягненні критичних значень щільності пасажирів виникає ефект «стиснення» часу, коли кожна хвилина перебування в переповненому просторі сприймається як 1,5–2,0 хвилини за нормальних умов.

Коефіцієнт заповнюваності безпосередньо корелює зі зростанням суб'єктивних витрат часу. Ігнорування цього фактору в моделях розподілу пасажиропотоків призводить до системних похибок у прогнозуванні привабливості маршрутів.

Для власників автомобілів ключовим бар'єром для переходу на ГТ є втрата «особистого простору». Рівень заповнюваності є фізичним вираженням порушення цього простору. Якщо частота та швидкість руху можуть бути конкурентними, то надмірна заповнюваність нівелює ці переваги, роблячи систему ГТ «транспортном останнього вибору». Вивчення цього параметра дозволяє встановити граничні межі комфорту, за яких можливий реальний модальний перехід.

Традиційне планування часто прагне максимального заповнення рухомого складу для підвищення рентабельності. Проте існує зворотний ефект: переповнений транспорт спричиняє збільшення часу затримок на зупинках (через утруднену посадку/висадку) та знижує надійність графіку.

Висока заповнюваність на початкових ділянках маршруту робить його «невидимим» або непривабливим для пасажирів на наступних зупинках, навіть за умови наявності технічної можливості посадки.

Розрахунок привабливості мережі без урахування типу рухомого складу (мала, середня або велика місткість) є неповним, оскільки пасажир оцінює не лише факт прибуття транспортного засобу, а й потенційні умови проїзду в ньому.

Рівень наповненості є критичним для вразливих груп населення (літні люди, пасажирів з дітьми, особи з інвалідністю). Висока щільність пасажирів у салоні фактично стає формою транспортної ізоляції для цих категорій, оскільки вони змушені відмовлятися від поїздок у пікові години.

Вивчення впливу заповнюваності на сприйнятий час поїздки дозволяє перейти від «плоских» гравітаційних моделей до багатовимірних моделей вибору, де комфорт є математично вираженою складовою вартості поїздки (опору руху), що дає змогу транспортним планувальникам обґрунтовувати необхідність збільшення кількості рейсів або зміни класу рухомого складу не лише через дефіцит місць, а через необхідність підтримки цільового рівня привабливості всієї транспортної мережі міста.

Мета дослідження.

Розробка методичного підходу до оцінювання привабливості маршрутної мережі пасажирського транспорту шляхом врахування впливу рівня заповнюваності рухомого складу на суб'єктивне (сприйняте) викривлення часу подорожі.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати наявні підходи до оцінки суб'єктивного сприйняття часу пасажиром та визначити вплив рівня заповнюваності салону на вибір рейсу на громадському транспорті.

2. Обґрунтувати вибір математичного апарату для опису нелінійної залежності між фізичним навантаженням салону та «штрафним» часом поїздки.

3. Розробити алгоритм розрахунку бар'єру посадки для імітації поведінки (відмови від посадки або посадки) пасажирів від поїздки в залежності від рівня наповненості салону рухомого складу громадського транспорту.

4. Сформулювати теоретичну та апробувати модель викривленого сприйняття часу, яка інтегрує об'єктивні параметри руху та суб'єктивні відчуття дискомфорту пасажирів.

Об'єкт дослідження: методи моделювання перерозподілу пасажиропотоків у маршрутних мережах громадського транспорту в умовах обмеженої пропускної здатності рухомого складу та суб'єктивного сприйняття часу поїздки пасажирів.

Предмет дослідження: закономірності впливу заповнюваності рухомого складу та технічних параметрів транспортної мережі на показники привабливості маршрутів і рівень транспортного дискомфорту пасажирів.

Методи та інструменти дослідження. Теоретичний аналіз та узагальнення, математичне моделювання, ітераційні методи розрахунку, системний аналіз та методи апроксимації, статистичний аналіз та графоаналітичні методи, геоінформаційні системи (GIS) та спеціалізоване програмне забезпечення з транспортного моделювання.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена модель із впровадженням зворотним зв'язком «попит–місткість рухомого складу» дозволяє оцінити, як зміна типу рухомого складу змінить розподіл пасажирів у мережі, забезпечуючи перехід від кількісних показників моделювання до якісних оцінок комфорту перевезень.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 43 джерел. Загальний обсяг роботи становить 50 с.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ПРИВАБЛИВОСТІ ТА ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

1.1. Підходи до оцінювання сприйнятого часу подорожі в пасажирських системах

Коли реалізується новий інфраструктурний проєкт у сфері громадського транспорту (ГТ), він зазвичай спрямований на підвищення якості обслуговування (тобто скорочення часу поїздки, часу очікування та кількості пересадок). Дані аспекти обслуговування та відповідні зміни пасажиропотоку можна виміряти об'єктивно, використовуючи автоматизовані джерела даних, такі як дані смарт-карт [1] та дані систем автоматичного визначення місцезнаходження транспортних засобів (AVL) [2]. У роботі [3] проаналізовано наслідки впровадження нової лінії метро на основі обох цих джерел даних. Однак сприйнятий час поїздки зазвичай є гіршим за фактичний час, що означає, що пасажирів відчувають більшу економію часу, ніж та, що розрахована на основі об'єктивних показників [4, 5, 6].

Хоча ідея викривленого сприйняття часу в дорозі не є новою [7], дотепер лише кілька досліджень розглядали сприйняття часу саме у громадському транспорті. Були вивчені окремі етапи поїздки, які, як відомо, мають різну цінність для мандрівників [8]: час перебування в транспортному засобі [4, 6, 9], час очікування [10, 11, 12], час ходьби пішки [13] та час пересадки [14].

У деяких із цих досліджень для оцінки фактичного часу поїздки використовується ручне відстеження [4, 11] або моделі розподілу [9]. Окремий напрям досліджень використовує дані GPS-трекінгу як альтернативу або доповнення до опитувань домогосподарств чи щоденників поїздок [15], причому в новіших роботах для таких вимірювань застосовуються додатки для смартфонів (наприклад, [16, 17]). Попри високу точність, такі дані вимагають від респондентів

носіння GPS-пристрою або смартфона, що може бути дорогим процесом з точки зору збору та повернення обладнання. Крім того, це може створювати значне навантаження на акумулятор смартфона.

У роботі [15] розглянули численні дослідження, що порівнювали час поїздки, вимірний за допомогою GPS, із часом, зазначеним в опитуваннях. Вони зауважили, що в роботах, де обидва показники зіставлялися попарно, результати опитувань зазвичай демонструють завищення часу поїздки на 3–6,5 хв (9,2–34,2%) на одну подорож. Серед останніх досліджень [16] порівняли задекларований в опитуваннях час із фактичним часом, вимірним за допомогою смартфона, і виявили, що більшість пасажирів громадського транспорту незначною мірою недооцінюють свій час у дорозі. Водночас у працях [4] та [5] виявили, що час, вказаний в опитуваннях, у середньому вищий за фактичний. У дослідженні [4] встановлено, що на сприйняття часу в дорозі впливають соціально-економічні характеристики респондента, параметри поїздки та особливості використання об'єктів інфраструктури, тоді як стать і мета поїздки впливу не мають. Крім того, автор [5] у своєму дослідженні пасажирів трамваїв зазначив, що чинники, які пояснюють сприйняття мандрівників, відрізняються для тих, хто схильний до переоцінки, порівняно з тими, хто недооцінює час поїздки.

1.2. Підходи до оцінювання привабливості поїздок на громадському транспорті

Проблема привабливості громадського транспорту є широкою та багатогранною концепцією. Найчастіше привабливість транспорту оцінюється на основі відчуттів пасажирів, висловлених в опитуваннях, які можуть охоплювати як задоволеність, так і переваги (очікування). Фактори, що впливають на привабливість громадського транспорту, можна розглядати з двох перспектив [18]:

- *Макроскопічні:* міське просторове планування, структури землекористування, географічне середовище, рівень економічного розвитку, демографічні характеристики, державна політика та сервісні характеристики громадського транспорту.
- *Мікроскопічні:* індивідуальні характеристики учасників руху, характеристики попиту на поїздки, характеристики самих поїздок та рівень обслуговування громадського транспорту.

Наразі багато дослідників зосереджуються на питаннях, пов'язаних із привабливістю транспорту, що асоціюється з такими поняттями, як задоволеність поїздкою або ширша якість громадського транспорту [19].

Згідно з дослідженням [20], з точки зору пасажирів, задоволеність поїздкою пов'язана не з окремими характеристиками, що визначають якість транспортних послуг, а скоріше з цілим набором цих характеристик. Більше того, однаковий рівень задоволеності може бути досягнутий при різних конфігураціях цих характеристик. У дослідженнях частота сполучень є важливою для всіх груп опитаних пасажирів, тоді як інші ознаки, такі як швидкість або інтермодальність, важливі лише для деяких.

В дослідженні [21] було визначено якісні характеристики громадського транспорту, які визначають його привабливість для пасажирів, та способи, якими ці характеристики мають бути змінені, щоб спонукати водіїв автомобілів користуватися громадським транспортом. Автори поділяють характеристики, що визначають якість транспорту, на фізичні (наприклад, частота, надійність, швидкість і вартість), які можна оцінити на основі їх впливу на пасажирів, і сприйняті (комфорт, відчуття безпеки), вимірювання яких вимагає взаємодії з пасажиром. Інше дослідження [21] вказало на те, що такі характеристики, як надійність і частота, є вирішальними у визначенні інтересу до громадського транспорту та задоволеності пасажирів поїздкою. Подібні висновки були зроблені раніше Чжаном та ін. [22], які вивчали фактори, що впливають на задоволеність

пасажирів громадським транспортом. Однак визначення значущих ознак, які мають бути дотримані, стає складнішим, коли розглядається привабливість громадського транспорту для користувачів автомобілів [21]. Послуги громадського транспорту повинні забезпечувати базовий рівень доступності, надійності, конкурентоспроможну вартість, ефективну швидкість [23] і технічну ефективність [24], щоб бути конкурентоспроможними щодо приватних автомобілів.

Одним із ключових факторів, що впливають на якість громадського транспорту, є частота руху [25, 26]. Задовільне значення частоти для пасажирів залежить від кількох факторів. Деякі дослідники [27, 28] вказали на те, що збільшення частоти рейсів може позитивно вплинути на кількість пасажирів, у тому числі шляхом залучення нових пасажирів, які раніше користувалися автомобілями, як у містах, так і в сільській місцевості, де якість послуг громадського транспорту часто нижча. Однак слід зазначити, що покращення частоти обслуговування може мати набагато більший ефект на збільшення кількості пасажирів, ніж зниження цін на квитки [29]. З іншого боку, важливо враховувати порогове значення частоти, нижче якого певний вид громадського транспорту стає непривабливим. Наприклад, Хеншер [30] вказав на те, що пасажирів дуже погано оцінюють зниження частоти нижче однієї поїздки кожні пів години.

Аналіз публікацій щодо вподобань пасажирів у регіональному громадському транспорті [31] показує, що цьому виду транспорту досі приділяється мало уваги. У проаналізованих публікаціях категорією, яка розглядається найчастіше, є доступність (діапазон пропонованих послуг з точки зору географії, видів транспорту, годин роботи та частоти). Однак автори вказують на те, що бракує досліджень операційних аспектів доступності, таких як години та частота обслуговування.

Більшість досліджень частоти громадського транспорту стосуються міст (високоурбанізованих територій), де частота набагато вища, ніж у регіональному транспорті, з розглянутими значеннями від чотирьох до шести поїздок на годину.

Такі частоти є недосяжними в регіональному автобусному транспорті, особливо в країнах, де цей транспорт або не субсидується, або мінімально субсидується з державного бюджету.

Аналогічно, дослідження потенціалу регіонального транспорту проводяться дослідниками набагато рідше. Деякі джерела описують використання гравітаційної моделі для визначення попиту на транспортні послуги в різних регіонах, наприклад, у Греції [32], Словаччині [33] та Чехії [34, 35]. Існують також дослідження щодо оптимізації розкладів руху в регіональному транспорті [36], оцінки розкладів [37] та частоти сполучення між одиницями місцевого самоврядування в Чехії [38]. Також підкреслюються переваги транспортної системи на основі циклічного розкладу в сільській місцевості, засновані на швейцарському досвіді [39]. Особливий інтерес щодо цієї роботи становлять дослідження взаємозв'язку між попитом та додатковими послугами в періоди між пік [40], змін попиту в пікові та поза пікові періоди [41], а також факторів, що впливають на розподіл поїздки за видами транспорту під час поїздки на роботу до європейських міст [42]. У роботі [43] автори проаналізували вплив різних характеристик громадського транспорту, включаючи ціни, частота та доходи жителів, на зміни попиту протягом кількох десятиліть у всіх видах транспорту в Тунісі.

Роботи також в основному стосуються аспектів транспортного планування, вподобань пасажирів та транспортної ізоляції. Дослідження та аналізи регіонального транспорту здебільшого спираються на опитування або національні переписи населення, які містять загальну інформацію, але є досить обмеженими за точністю для великих територій (регіонів). Важко знайти дослідження щодо фактичного попиту та пасажиропотоків між різними локаціями та місцевими регіональними центрами в різний час доби або щодо структури квитків, якими користуються пасажирів. Тема транспортних уподобань, як вказують пасажирів в опитуваннях щодо найбільш бажаних характеристик, які повинна пропонувати транспортна система, обговорюється широко. Проте важко знайти публікацій про

вплив різних ознак і факторів, пов'язаних із регіональним транспортом та його оточенням, на його фактичне використання різними групами пасажирів і, отже, на привабливість регіонального автобусного транспорту. Це суттєво, оскільки, зрештою, на привабливість транспортної системи вказує кількість пасажирів, які нею користуються, особливо тих, хто має альтернативні варіанти подорожі.

1.3. Висновки до розділу 1

Дослідження підтверджують суттєву розбіжність між об'єктивними показниками часу (виміряними за допомогою AVL або GPS) та суб'єктивним сприйняттям пасажирів. Пасажири схильні переоцінювати тривалість поїздки (в середньому на 9–34%), що робить суб'єктивне сприйняття часу критичним фактором при оцінці якості транспортних проєктів.

Привабливість системи громадського транспорту формується на двох рівнях: макроскопічному (планування міст, економіка) та мікроскопічному (індивідуальні потреби та сервіс). При цьому задоволеність пасажирів залежить не від одного показника, а від певної конфігурації характеристик, де ключову роль відіграють надійність та частота руху.

Для залучення нових користувачів (особливо власників приватних авто) підвищення частоти рейсів є ефективнішим інструментом, ніж зниження вартості проїзду. Встановлено «пори́г непривабливості»: для регіональних перевезень інтервал понад 30 хвилин призводить до критичного зниження інтересу пасажирів до системи.

Більшість наукових робіт фокусуються на високо урбанізованих територіях, тоді як питання регіонального та приміського автобусного сполучення залишаються недостатньо вивченими, особливо в контексті фактичних пасажиропотоків та динаміки попиту в різний час доби.

Незважаючи на широке вивчення факторів швидкості, частоти та вартості, у науковій літературі недостатньо висвітлено питання впливу місткості рухомого складу та рівня комфорту в салоні (наповненості) на загальну привабливість поїздки. Хоча місткість безпосередньо впливає на сприйнятий час (через дискомфорт у переповненому транспорті), цей фактор часто ігнорується в класичних моделях привабливості ГТ, що створює прогалину в розумінні того, як фізичні параметри транспортного засобу впливають на рішення пасажирів обрати громадський транспорт замість приватного автомобіля.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ ЗА УМОВ ОБМЕЖЕНОЇ МІСТКОСТІ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

2.1. Математична інтерпретація факторів дискомфорту пасажирів у моделях розподілу транспортних потоків

Врахування обмежень пропускної здатності систем громадського транспорту (ГТ) у межах моделювання попиту базується на принципі зворотного зв'язку: виникнення перевантажень викликає зменшення обсягів кореспонденцій. Даний механізм реалізується через зростання значень функції опору на перевантажених сполученнях, що призводить до зниження імовірності вибору ГТ як пріоритетного виду транспорту.

Наукові підходи до інтеграції параметрів пропускної здатності в моделі попиту класифікуються за методами розподілу на основі розкладу.

1. **Розподіл з жорсткими обмеженнями.** Характеризується перерозподілом потоків з критично завантажених маршрутів на альтернативні сполучення з вищим суб'єктивним часом подорожі, але доступною пропускною здатністю. За умови неможливості посадки пасажирів в транспортний засіб моделюється пошук альтернативного шляху. Даний метод забезпечує високу точність детермінованих результатів, проте його застосування в класичних моделях попиту обмежене через необхідність наявності прецизійних даних щодо часового розподілу попиту.

2. **М'яке обмеження пропускної здатності.** Передбачає ітераційне збільшення опору ділянок мережі з високим рівнем завантаження, що стимулює зниження попиту на відповідні сегменти під час повторних циклів вибору сполучення. Метод є більш стійким до обчислювальних похибок, хоча не враховує фактичний коефіцієнт використання ємності безпосередньо в момент посадки.

Застосування вищезазначених методів ускладнюється стохастичною природою часового розподілу попиту в макромоделях та суттєвим зростанням обчислювальних витрат. Як альтернатива пропонується апроксимаційний метод, що базується на оцінці дискомфорту пасажирів, який обумовлюється двома ключовими факторами:

- динамічною щільністю пасажиропотоку в салоні під час руху;
- імовірнісним зниженням доступності сидячих місць або фізичної можливості здійснення посадки на зупиночних пунктах.

Перший фактор моделюється через зважений коефіцієнт використання місткості на всіх ділянках маршруту, тоді як другий - виключно на основі завантаження транспортного засобу в момент посадки.

У межах даної концепції зниження рівня комфорту інтерпретується як лінійне або експоненціальне збільшення прийнятого часу у дорозі. Підсумковий опір ділянки розраховується як інтегральна сума тривалості руху на окремих ділянках маршруту, скоригована на відповідні коефіцієнти дискомфорту, що є функціями від рівня використання номінальної місткості (зокрема, сидячих місць).

Коефіцієнт дискомфорту:

$$D_f = 0,3 \cdot e^{2 \cdot VolCapRatio - 2} \quad (2.1)$$

де e - експоненціальна функція, $VolCapRatio$ - співвідношення обсягу пасажиропотоку на ділянці маршруту до пропускної здатності ділянки.

Функція опору, що визначається рівнем комфорту, характеризується нелінійною прогресією: при мінімальних значеннях $VolCapRatio$ вплив фактора дискомфорту є неістотним, проте у фазі наближення до граничної пропускної здатності спостерігається стрімке зростання граничних витрат часу. При 100% коефіцієнті використання пропускної здатності фактор дискомфорту становить 0,3, що призводить до 30% збільшення сприйманого часу подорожі.

Ймовірність дефіциту вільних сидячих місць або неможливості здійснення посадки як такої корелює з коефіцієнтом використання пропускної здатності на конкретному зупиночному пункті. Відповідний чинник впливу на функцію опору адекватно описується наступною математичною залежністю:

$$D_f = VolCapRatio^3 \quad (2.2)$$



Рис.2.1. Залежність коефіцієнту дискомфорту від співвідношення обсягу пасажиропотоку та пропускної здатності



Рис.2.2. Залежність коефіцієнту дискомфорту посадки у транспортний засіб від співвідношення обсягу пасажиропотоку та пропускної здатності

Геометрична форма отриманої кривої (рис.2.2) корелює з попередньою залежністю, проте вона моделює значно вагоміший вплив: при досягненні 100% коефіцієнта використання пропускної здатності на зупинковому пункті посадки, приріст сприйманого часу подорожі становить 100%.

Обрані методологічні підходи та параметри базуються на практичному досвіді фахівців PTV з транспортного моделювання та планування [8].

Процедура (2.1 - 2.2), вимагає розподілу громадського транспорту та розрахунку матриць шарів (skims) на кожній ітерації розрахунку попиту. У масштабних транспортних моделях із великими мережами громадського транспорту, де розподіли вимагають багато часу на обчислення, це може призвести до неприйнятно тривалого загального часу обчислень. Для таких випадків розроблено більш спрощений підхід, який враховує ситуації перевантаження в дуже грубій формі.

Основна ідея полягає в константній матриці пропускної здатності, яка є приблизною оцінкою спроможності на кожне сполучення. Коефіцієнт використання пропускної здатності *VolCapRatio* у такому разі виражається часткою від ділення попиту на пропускну здатність.

Даний підхід передбачає, що структура попиту на громадський транспорт істотно не змінюється в ході ітерацій попиту. З цієї причини процедуру можна застосовувати лише після того, як розрахунок попиту вже певною мірою стабілізувався. Матрицю пропускної здатності доведеться оновлювати у разі значних змін у попиті.

Нехай існують базовий попит та відповідний розподіл. Коефіцієнт використання пропускної здатності сполучення зазвичай визначається наступним співвідношенням: *Попит / Пропускна здатність*.

Відповідно, застосовується наступне: *Пропускна здатність = Попит_Базовий / Коефіцієнт_Використання_Базовий*.

Отже, ви можна визначити пропускну здатність шляхом встановлення (середнього) коефіцієнта використання для заданого попиту. Наприклад, на певному сполученні середній коефіцієнт використання становить 20%, попит — 30 пасажирських поїздок. Тоді пропускну здатність оцінюється на цьому сполученні як $30 / 20\% = 150$ пасажирських поїздок.

Розрахунок шарів попиту у Visum не містить середнього коефіцієнта використання пропускну здатності, але його можна легко апроксимувати за допомогою шару дискомфорту. У випадку шару дискомфорту опір (impedance) на елемент рейсу «а», що залежить від коефіцієнта використання, розраховується за формулою:

$$F_a \cdot \exp(A \cdot VolCapRatio - B) \quad (2.3)$$

де F_a - час руху елемента рейсу «а» в секундах). Експоненціальна функція поводить майже лінійно поблизу нуля.

Застосовується наступна апроксимація: $\exp(x) \approx 1 + x$ для x поблизу 0.

Якщо встановити $B=0$, а A дуже малим, наприклад $A=0,1$, отримуємо приблизне значення опору, залежного від коефіцієнта використання: $F_a * \exp(A * VolCapRatio) \approx F_a * (1 + A * VolCapRatio)$.

Тому застосовується наступне (приблизно):

$$DISC = MT * (1 + A * VolCapRatio) \quad (2.4)$$

MT («movement time») - це час руху в транспортному засобі (виражений у секундах). Даний параметр не розраховується у Visum безпосередньо, і його потрібно визначити за допомогою невеликого обхідного шляху. Якщо встановити параметри дискомфорту $A=B=0$, то для опору, залежного від коефіцієнта використання:

$$F_a * \exp(A * VolCapRatio - B) = F_a * \exp(0) = F_a, \quad (2.5)$$

тобто середній час руху (відмінність від часу рейсу полягає в тому, що час очікування на зупинках не враховується).

Звідси випливає:

$$VolCapRatio = (DISC / MT - 1) / A \quad (2.6)$$

Таким чином, пропускна здатність може бути розрахована приблизно як:

$$\begin{aligned} \text{Пропускна здатність} &= \text{Попит_Базовий} / ((DISC / MT - 1) / A) = A * \\ &\text{Попит_Базовий} * MT / (DISC - MT) \end{aligned} \quad (2.7)$$

При розрахунку попиту збільшення опору через високий коефіцієнт використання може бути представлено як адитивна надбавка до сприйманого часу подорожі:

$$\begin{aligned} ImpCar &= \beta_{Car} * VolCapRatio * \text{Час_подорожі} = \beta_{Car} * \text{Попит} / \text{Пропускна} \\ &\text{здатність} * MT / 60, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де параметр β_{Car} контролює вплив коефіцієнта використання пропускної здатності на опір. У цьому прикладі β_{Car} встановлено на рівні 3. Поділ на 60 виконується тому, що MT виражається в секундах, а сприйманий час подорожі — у хвилинах.

У середині циклу попиту опір $ImpCar_k$, залежний від коефіцієнта використання на k -й ітерації, апроксимується за допомогою попиту з попередньої ітерації:

$$ImpCar_k = \beta_{Car} * \text{Попит}_{k-1} / \text{Пропускна_здатність}_{k-1} * MT / 60 \quad (2.9)$$

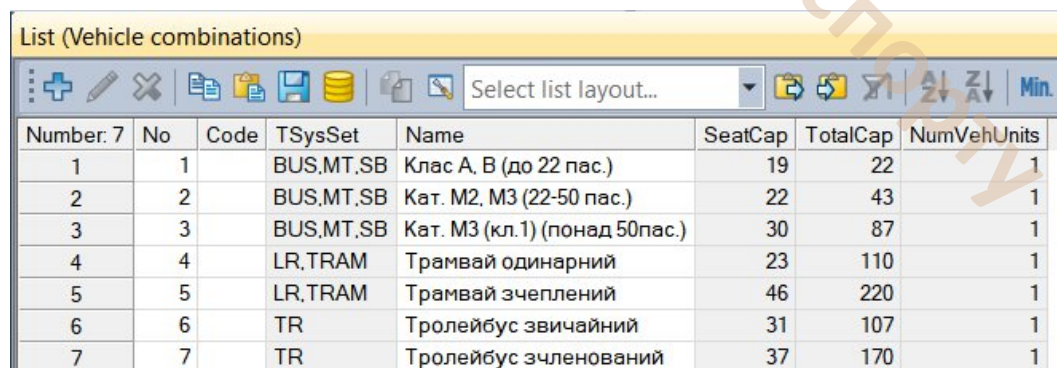
Представлений тут підхід є грубою апроксимацією. Зокрема, структурні зміни в попиті протягом циклу ітерацій враховуються недостатньо. Тим не менш, такий тип врахування пропускної здатності може призвести до більш реалістичних, а отже, кращих результатів попиту, особливо у випадку великих регіональних моделей, ніж якби вона не враховувалася взагалі.

2.2. Реалізація методу в транспортній моделі

Метод врахування дискомфорту пасажирів у моделях розподілу транспортних потоків реалізовано у програмному забезпеченні для транспортного макромодельовання PTV Visum.

Процес налаштування моделі розпочався з підготовки робочого середовища. На цьому етапі модель уже містила сформований попит, а транспортні засоби були коректно пов'язані з рейсами. Для верифікації параметрів рухомого складу (зокрема кількості сидячих місць) було проведено аудит через меню *PuT vehicles* у меню *Network* виберіть *PuT vehicles*. Список відображає всі доступні транспортні засоби ГТ та комбінації транспортних засобів.

У файлі макета *PUT_VEHICLES.LAY* через меню *File > Open global layout* усі секції рейсів транспортних засобів пов'язані з комбінацією транспортних засобів. Таким чином, передумови для врахування пропускної здатності ГТ в моделі забезпечені.



Number	No	Code	TSysSet	Name	SeatCap	TotalCap	NumVehUnits
1	1		BUS.MT.SB	Клас А, В (до 22 пас.)	19	22	1
2	2		BUS.MT.SB	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	22	43	1
3	3		BUS.MT.SB	Кат. М3 (кл.1) (понад 50пас.)	30	87	1
4	4		LR.TRAM	Трамвай одинарний	23	110	1
5	5		LR.TRAM	Трамвай зчеплений	46	220	1
6	6		TR	Тролейбус звичайний	31	107	1
7	7		TR	Тролейбус зчленований	37	170	1

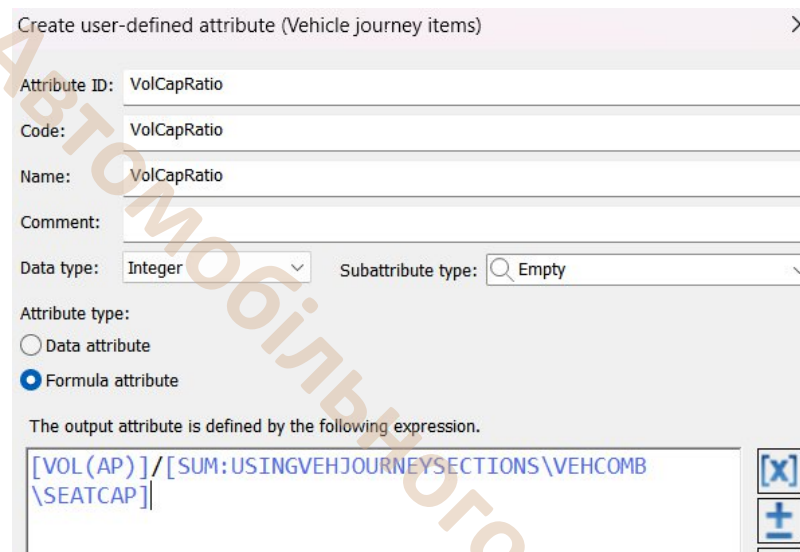
Рис.2.3. Комбінації транспортних засобів у транспортній моделі

Для інтеграції факторів дискомфорту в розрахунковий алгоритм було виконано такі кроки:

Створення розрахункових атрибутів - у перелік атрибутів елементів рейсу було впроваджено два користувацькі параметри:

- *VolCapRatio* — для обчислення поточного рівня завантаження пасажиромісткості (за кількістю місць для сидіння) за формулою у PTV Visum:

$$[VOL(AP)]/[SUM:USINGVEHJOURNEYSECTIONS\VEHCOMB\SEATCAP],$$



Create user-defined attribute (Vehicle journey items)

Attribute ID: VolCapRatio

Code: VolCapRatio

Name: VolCapRatio

Comment:

Data type: Integer Subattribute type: Empty

Attribute type:

☐ Data attribute

☒ Formula attribute

The output attribute is defined by the following expression.

$$[VOL(AP)]/[SUM:USINGVEHJOURNEYSECTIONS\VEHCOMB\SEATCAP]$$

Рис. 2.4. Створення користувацького атрибуту *VolCapRatio*

- *VolCapRatioEffect* — для математичного опису нелінійного впливу перевантаження (зведення коефіцієнта у куб – формула 2.2):

$$POW([VolCapRatio],3)$$

Create user-defined attribute (Vehicle journey items)

Attribute ID: VolCapRatioEffect

Code: VolCapRatioEffect

Name: VolCapRatioEffect

Comment:

Data type: Integer Subattribute type: Empty

Attribute type:

☐ Data attribute

☒ Formula attribute

The output attribute is defined by the following expression.

POW([VOLCAPRATIO], 3)

Рис.2.5. Створення користувацького атрибуту *VolCapRatioEffect*

Модифікація процедури розподілу. До послідовності процедур було додано додатковий етап розподілу ГТ (на основі перерозподілу за розкладом) розміщений безпосередньо після модуля вибору виду транспорту.

У параметрах цієї процедури було активовано використання файлу сполучень PT_CONNECTIONS.CON та налаштовано розширений опір (**Extended impedance**). Зокрема, було впроваджено штрафні коефіцієнти для посадок та пересадок на основі створеного атрибуту *VolCapRatioEffect*.

Вибрано опцію **Penalty for boardings, transfers, alightings**.

Елемент: *Board* | **Вхідне значення:** 1 | **Атрибут:** *VolCapRatioEffect*

Елемент: *Alight* | **Вхідне значення:** 0 | **Атрибут:** *VolCapRatioEffect*

Елемент: *Transfer when boarding* | **Вхідне значення:** 1 | **Атрибут:** *VolCapRatioEffect*

Елемент: *Transfer when alighting* | **Вхідне значення:** 0 | **Атрибут:** *VolCapRatioEffect*, що дало змогу врахувати вплив завантаженості транспортного засобу безпосередньо в момент посадки пасажирів.

Extended impedance of the perceived journey time

Access + egress + walk times

☐ = 0.1500 * Path leg time² + 0.9000 * Path leg time

In-vehicle time

☐ = 0.1000 * [Q Time] [min] + (1 + 0.0100 * [Q Time]) * Path leg

Vehicle journey item attribute weighted by run time

Transfer penalty depending on path leg run time

☐ = (total run time - max. path leg run time) / 2

Penalty for boardings, transfers, alightings

☒ Board = 1.0000 * [Q VoIC] [s]

Alight = 0.0000 * [Q VoIC] [s]

Transfer = Max { 1.0000 * [Q VoIC] [s] when boarding, 0.0000 * [Q VoIC] [s] when alighting }

Рис.2.6. Налаштування опору у процедурі перерозподілу ГТ

Генерація матриць дискомфорту. Було налаштовано процедуру розрахунку матриць витрат, де єдиним параметром було обрано «Дискомфорт через перевантаження пропускної здатності». Після цього було обрано опцію *Calculate skim matrices* (Розрахувати матриці витрат) та деактивовано опцію *Calculate assignment* (Розрахувати розподіл). На сторінці *Skim matrices* матриця *Extended impedance* (Розширений опір) визначена єдина матриця для розрахунку у дубльованій процедурі розрахунку перерозподілу.

Skim matrices

Considered OD pairs: All

Aggregation

Function: Avg value

Quantile (%): 50 ☒ Weighted by volumes

Which aggregation should I choose?

Skims

Number: 68	Calculate	Save to file	Open	Skim
61	☐	☐	☐	Utility
62	☐	☐	☐	Attribute for path leg skim
63	☐	☐	☐	Adaptation time
64	☐	☐	☐	Extended adaptation time
65	☐	☐	☐	Equivalent journey time
66	☒	☒	☒	Discomfort due to capacity overload
67	☐	☐	☐	Share of fail to board
68	☐	☐	☐	Risk of fail to board per person

Рис.2.7. Активація матриці витрат

У меню *Calculate* було обрано пункт *General procedure settings*. На сторінці *PuT settings > Assignment* для параметра *Save paths* було встановлено значення *As connections*, а для параметра *Save volumes* обрано варіант *Additionally for vehicle journeys* (рис. 2.8).

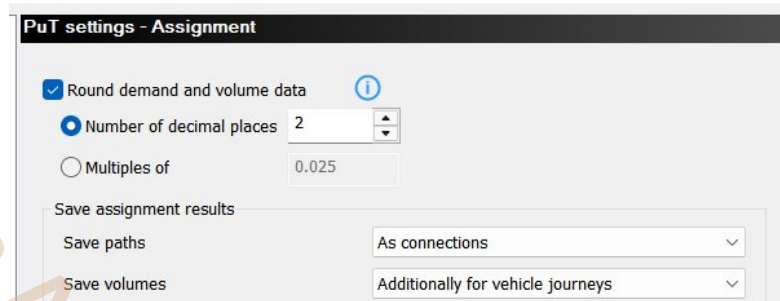


Рис.2.8. Налаштування перерозподілу попиту на ГТ

У загальних налаштуваннях на вкладці (витрати) параметри дискомфорту *A* та *B* були встановлені на рівні 2.0, що детермінувало інтенсивність впливу завантаження на суб'єктивне сприйняття часу (рис.2.9). Оскільки два запроваджені параметри залежать від попиту *i*, таким чином, змінюються з кожною ітерацією попиту, буде використана та ж методологія згладжування коливань, що і для індивідуального транспорту (транспортна модель Кривого Рогу є мультимодальною).

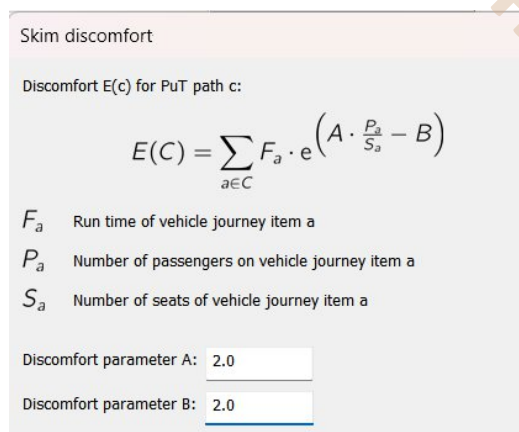


Рис.2.9. Зміна параметрів дискомфорту у матриці витрат

Дискомфорт $E(C)$ для шляху ГТ c визначався (рис.2.9):

$$E(C) = \sum_{a \in C} F_a \cdot e^{(A \cdot \frac{P_a}{S_a} - B)}$$

F_a — час ходу елемента рейсу a ; P_a - кількість пасажирів на елементі рейсу a ; S_a - кількість сидячих місць в елементі рейсу a ; параметр дискомфорту A – 2,0; параметр дискомфорту B - 2,0.

Впровадження алгоритму згладжування витрат. З метою мінімізації коливань попиту між ітераціями було створено дві спеціальні матриці — DISC_S та XIMP_S. Для них було реалізовано механізм ітераційного згладжування за допомогою процедур комбінування матриць із коефіцієнтом 0,5 наступним чином.

Рис.2.10. Створення матриці XIMP_S

У вікні послідовності процедур перед кроком *PuT assignment* вставлено дві процедури *Combination of matrices and vectors* із наступними формулами (перед першою новою процедурою перерозподілу):

$$\text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"DISC_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) := 0$$

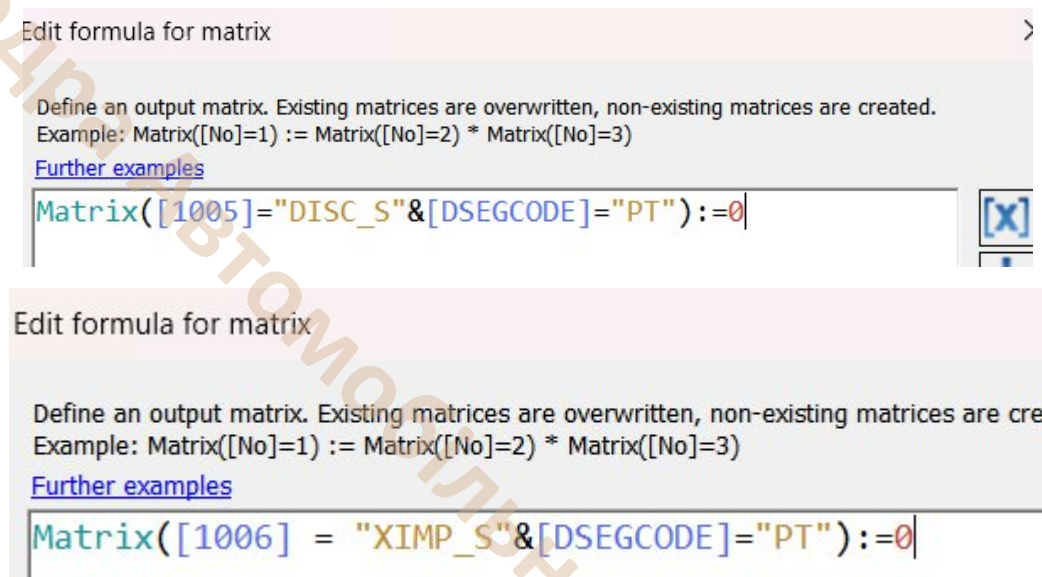
$$\text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"XIMP_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) := 0$$


Рис.2.11. Формули у процедурі *Combination of matrices and vectors*

У вікні послідовності процедур вставлено дві процедури *Combination of matrices and vectors* із наступними формулами:

$$\begin{aligned} &\text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"DISC_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) := \\ &0,5 * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"DISC_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) + \\ &0,5 * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"DISC"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"XIMP_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) := \\ &0,5 * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"XIMP_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) + \\ &0,5 * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"XIMP"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) \end{aligned}$$

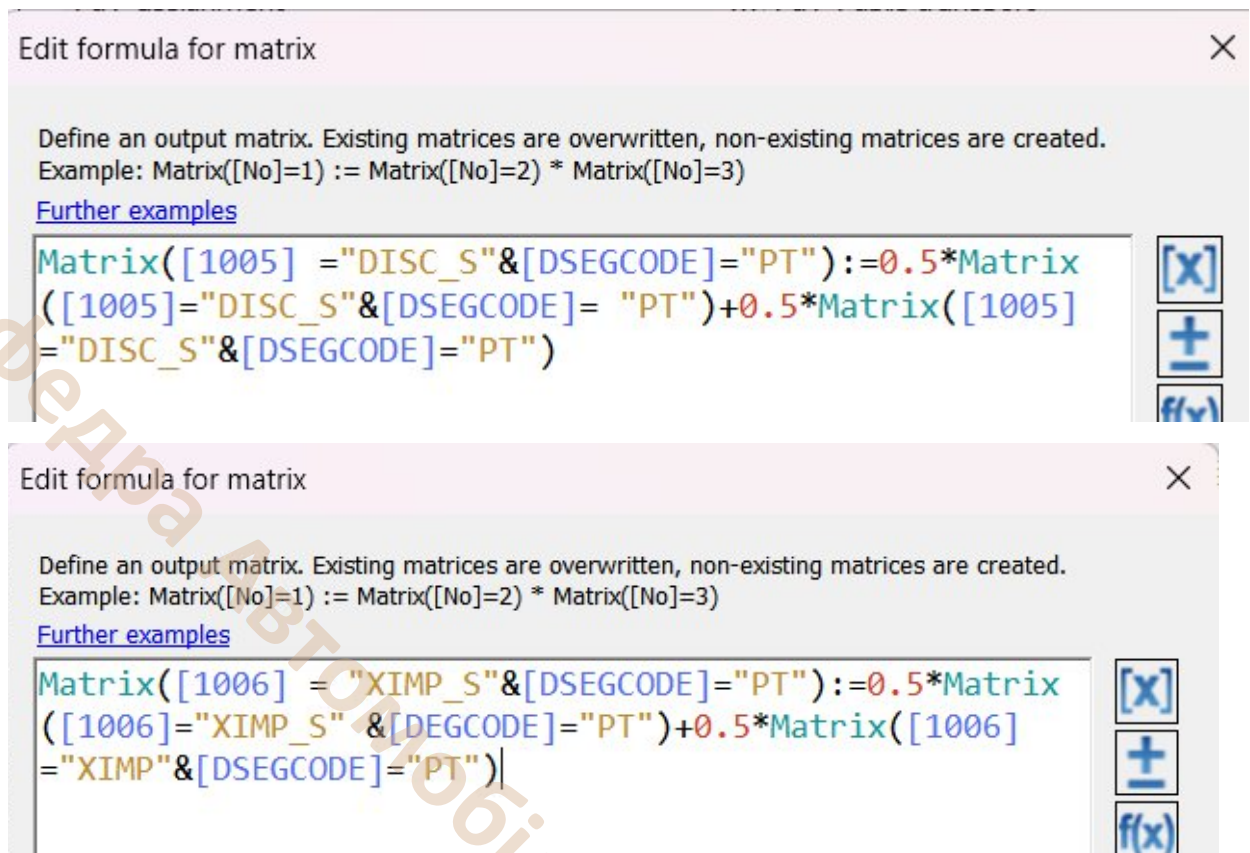


Рис.2.12. Формули у процедурі *Combination of matrices and vectors*

В обох випадках як фактор згладжування було обрано 0,5 (рис.2.12). Дві запроваджені матриці шарів тепер інтегровані у згладженому вигляді у функції корисності виду транспорту «громадський транспорт». Це забезпечило стабільність моделі та поступове наближення до стану рівноваги.

Коригування функції корисності. Ключовим етапом стала модифікація функції корисності для режиму «Громадський транспорт». До стандартного розрахунку було додано згладжені матриці додаткового опору та дискомфорту. При цьому значення дискомфорту було масштабовано (поділено на 60) для приведення секундних значень шару до хвилинного формату моделі, а саме функція корисності для громадського транспорту була заміненена на:

$$\begin{aligned} & \text{CONTEXT}[\text{MODE} \backslash \text{TT_COEF}] * (\text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"IPD"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) * \\ & (1.0 + 1.0 * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"XIMP_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"})) + \\ & 0.3 * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"DISC_S"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) / 60) + \\ & \text{CONTEXT}[\text{PERSONGROUP} \backslash \text{PT_SPECIFIC_CONSTANT}] \end{aligned}$$

Фіналізація циклу попиту. На завершення було скориговано крок переходу до ітерації (*Go to the procedure*), де контрольною матрицею було призначено матрицю ГТ. Це підкреслило, що в оновленій моделі саме попит на громадський транспорт стає динамічним показником, що реагує на рівень завантаження мережі.

Для великих моделей як модель міста Кривий Ріг, де ітераційний розрахунок повного розподілу ГТ є занадто трудомістким, було впроваджено спрощену методику. Процес реалізації включав наступні кроки.

Налаштування параметрів мережі та попиту. Спочатку було визначено пропускну здатність для кожного рейсу. У структуру даних було додано два нових користувацьких атрибути:

DiscomfortParaA (атрибут мережі) зі значенням 0,1;

beta_Cap (атрибут групи осіб) зі значенням 3,0 для всіх категорій користувачів.

Ініціалізація базових показників часу:

Для коректного розрахунку було видалено процедуру ініціалізації попиту. Перед основним розподілом було впроваджено скрипт, який тимчасово обнулив параметри дискомфорту A та B:

```
Visum.Procedures.Functions.PutSkimMatrixSettings.SetAttValue("DiscomfortParaA",0)
```

```
Visum.Procedures.Functions.PutSkimMatrixSettings.SetAttValue("DiscomfortParaB",0).
```

Це дозволило розрахувати «чистий» час руху (MT — *Movement Time*) без впливу перевантажень, зберігши його в окремій матриці DISC.

Генерація матриці пропускну́ї здатності.

Після відновлення значень параметрів дискомфорту за допомогою скрипта, було виконано процедуру розрахунку матриці шарів (*skim matrices*).

Вставлено процедуру комбінування матриць і векторів (*Combination of matrices and vectors*) з наступною формулою:

$$\text{Matrix}([\text{CODE}] = "MT") := \text{Matrix}([\text{CODE}] = "DISC")$$

Потім вставлено процедуру запуску скрипта (*Run script*) з наступним кодом:

$$A = \text{Visum.Net.AttValue}("DiscomfortParaA")$$
$$\text{Visum.Procedures.Functions.PutSkimMatrixSettings.SetAttValue}("DiscomfortParaA",$$
$$A)$$

На основі отриманих даних було створено матрицю *PT Cap*. Розрахунок пропускну́ї здатності здійснювався шляхом математичного співвідношення поточного попиту, часу руху та дискомфорту, що дозволило отримати статичну оцінку спроможності сполучень.

Продубльовано процедуру розподілу громадського транспорту та перемістіть її безпосередньо під створену процедуру. У цій процедурі деактивавано розрахунок шару опору (*Impedance*).

Під процедурою розподілу громадського транспорту вставлено процедуру комбінування матриць і векторів з наступною формулою:

$$\text{Matrix}([\text{CODE}] = "PT \text{ Cap}") := [\text{DISCOMFORTPARAA}] * \text{Matrix}([\text{CODE}] = "PT") * \\ \text{Matrix}([\text{CODE}] = "MT") / (\text{Matrix}([\text{CODE}] = "DISC") - \text{Matrix}([\text{CODE}] = "MT"))$$

Дані процедура й розраховує пропускну здатність на основі існуючого розподілу початкового попиту. Видалено процедуру *Tour-based model - Combined trip distribution/mode choice*.

Модифікація функції корисності.

Функцію вибору виду транспорту було адаптовано для врахування спрощеного фактора завантаження:

$$\begin{aligned} & \text{CONTEXT}[\text{MODE} \backslash \text{TT_COEF}] * (\text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"IPD"} \ \& \ [\text{DSEGCODE}] = \text{"PT"}) + \\ & \text{CONTEXT}[\text{PERSONGROUP} \backslash \text{BETA_CAP}] * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"PT"}) / \\ & \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"PT Cap"}) * \text{Matrix}([\text{CODE}] = \text{"MT"}) / 60 + \\ & \text{CONTEXT}[\text{PERSONGROUP} \backslash \text{PT_SPECIFIC_CONSTANT}] \end{aligned}$$

Нова формула корисності для ГТ тепер включає:

Коефіцієнт *beta_Cap* як ваговий параметр впливу перевантаження;

Відношення поточного попиту до розрахованої пропускну здатності (PT Cap);

Масштабований час руху (MT/60).

Фіналізація та верифікація.

Для того, щоб мати можливість спостерігати ефект від високонавантажених рейсів транспортних засобів громадського транспорту, спочатку розраховано лише частини моделі.

Запущено розрахунок усіх кроків процедури до моменту безпосередньо перед кроком *Go to procedure*.

Перший розрахунок попиту ще не враховував коефіцієнт використання пропускну здатності. Середній дискомфорт досить високий, так само як і середній розширений опір (через високий коефіцієнт використання пропускну здатності під час посадки).

Пошук найкоротшого шляху показує сполучення для кореспонденції між транспортними районами 238 на 238. На цьому шляху багато елементів мають

високий коефіцієнт використання, відповідно високим є дискомфорт, а також додатковий опір. Якщо на наступному кроці розрахунку буде враховано коефіцієнт використання пропускної здатності, попит для цієї кореспонденції повинен значно знизитися. У вікні списку *List (Vehicle journey sections)* наявні кілька сотень перевантажених елементів рейсів ($VolCapRatio > 100\%$).

У вікні послідовності процедур (*Procedure sequence*) перераховані всі процедури групи 'Loop', крім останньої. Загальний попит на громадський транспорт значно знизився. Проте це було б очікувано, навіть якби в мережі взагалі не було перевантажень. Додані матриці шарів завжди більші за 0, навіть у мережі з низьким обсягом потоків, тому опір виду транспорту «громадський транспорт» завжди збільшується. Таким чином, якщо шар коефіцієнта використання пропускної здатності додається до існуючої моделі попиту, модель повинна бути заново відкалібрована.

Середній дискомфорт знизився, як і середній розширений опір. Очевидно, що врахування пропускної здатності громадського транспорту подіяло в правильному напрямку, що стає особливо зрозумілим на прикладі розглянутої вище кореспонденції 238 на 238. Попит на цьому високонавантаженому сполученні різко впав. Всі процедури було активовано та запущено повний розрахунок знову. У вікні списку *List (Vehicle journey item)* результати стабілізувалися між показниками перших двох запусків. Перевантаження значно зменшилося, і залишилося дуже мало перевантажених рейсів транспортних засобів.

Після запуску всієї послідовності процедур було отримано результат, зафіксований у файлі-версії моделі. Даний підхід дозволив суттєво скоротити час обчислень, оскільки матриця пропускної здатності розраховується лише один раз для базового сценарію, уникаючи складних ітераційних розподілів ГТ на кожному кроці циклу попиту.

У результаті порівняння було встановлено, що спрощений метод забезпечує достатню точність для макромоделей, хоча може давати певні відхилення на сполученнях, де рівень завантаження критично наближається до 100%.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Інтеграція обмежень пропускної здатності в макромоделі транспортного попиту через модифікацію функцій опору дозволяє реалізувати фундаментальний принцип зворотного зв'язку в транспортних системах. Встановлено, що врахування факторів дискомфорту та імовірнісного дефіциту місць призводить до адекватної переорієнтації пасажиропотоків, знижуючи попит на критично перевантажених сегментах мережі, що відповідає реальній поведінці споживачів транспортних послуг.

Доведено, що для коректного відображення суб'єктивного часу поїздки доцільно використовувати експоненціальні або степеневі залежності (наприклад, кубічну функцію для атрибута *VolCapRatioEffect*). Це дозволяє моделювати нелінійне зростання граничних витрат часу: при завантаженні понад 100% сприйманий час подорожі може зростати вдвічі, що стає вирішальним чинником при виборі виду транспорту або маршруту прямування.

2. Порівняльний аналіз методологічних підходів.

Метод ітераційного розподілу: забезпечує найвищу прецизійність результатів за рахунок детального розрахунку матриць витрат (*skims*) на кожному циклі. Проте його застосування в масштабах великих мультимодальних моделей (наприкладі транспортної моделі м. Кривий Ріг) лімітується високою обчислювальною складністю та часовими витратами.

Спрощений апроксимаційний метод: базується на використанні константної матриці пропускної здатності (*PT Cap*). Результати засвідчили релевантність цього підходу для макромодельовання: він дозволяє суттєво оптимізувати час обчислень,

зберігаючи при цьому загальну точність прогнозування перерозподілу попиту, за винятком ділянок із екстремальним навантаженням.

3.. Роль алгоритмів згладжування.

Для забезпечення збіжності моделі за умов динамічної зміни попиту критично важливим є впровадження алгоритмів ітераційного згладжування (наприклад, із коефіцієнтом 0,5 для матриць DISC_S та XIMP_S). Це дозволяє уникнути значних флуктуацій показників від ітерації до ітерації та забезпечує стабілізацію системи в стані транспортної рівноваги.

4. Практична значущість та калібрування.

Врахування пропускної здатності ГТ змінює базисний рівень опору мережі навіть при низьких навантаженнях (оскільки значення функцій дискомфорту завжди більше 0), що обумовлює необхідність проведення повторного калібрування транспортної моделі після інтеграції даних параметрів для досягнення відповідності фактичним обсягам кореспонденцій.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІВНЯ ЗАПОВНЮВАНOSTІ РУХОМОГО СКЛАДУ НА ПРИВАБЛИВІСТЬ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖІ ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Після розрахунку моделі, атрибути *VolCapRatio* та *VolCapRatioEffect* (усереднені за ітераціями значення) були використані для оцінки впливу рівня заповнюваності рухомого складу на привабливість маршрутної мережі пасажирського транспорту міста Кривий Ріг за допомогою графічних налаштувань на відрізках мережі (рис.3.1)

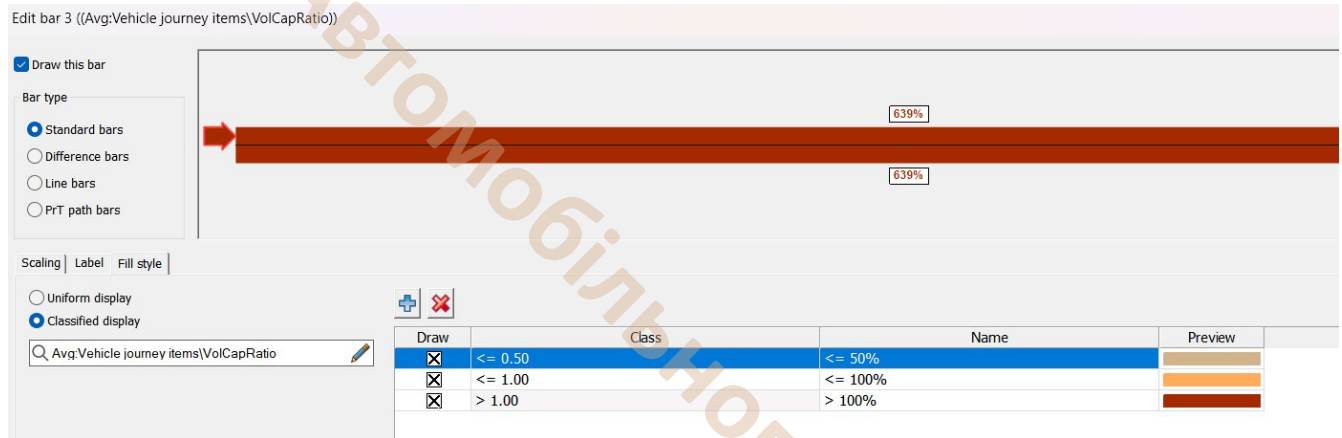


Рис.3.1. Налаштування графічних параметрів відрізків для *VolCapRatio*

Обидва отримані картограми (рис.3.2, рис.3.3) просторово ідентичні, що підтверджує правильність роботи алгоритму: зони максимального завантаження (червоні) стають зонами максимального дискомфорту (темно-зелені).

Картограма на рис. 3.3 демонструє «штрафний» характер функції — він гіперболізує проблеми перевантаження, роблячи їх пріоритетними для алгоритму перерозподілу попиту.

Для транспортної системи Кривого Рогу критичною точкою є південний вектор. Показники дискомфорту в цій зоні є сигналом про необхідність збільшення частоти руху або використання рухомого складу більшої місткості на цих ділянках.

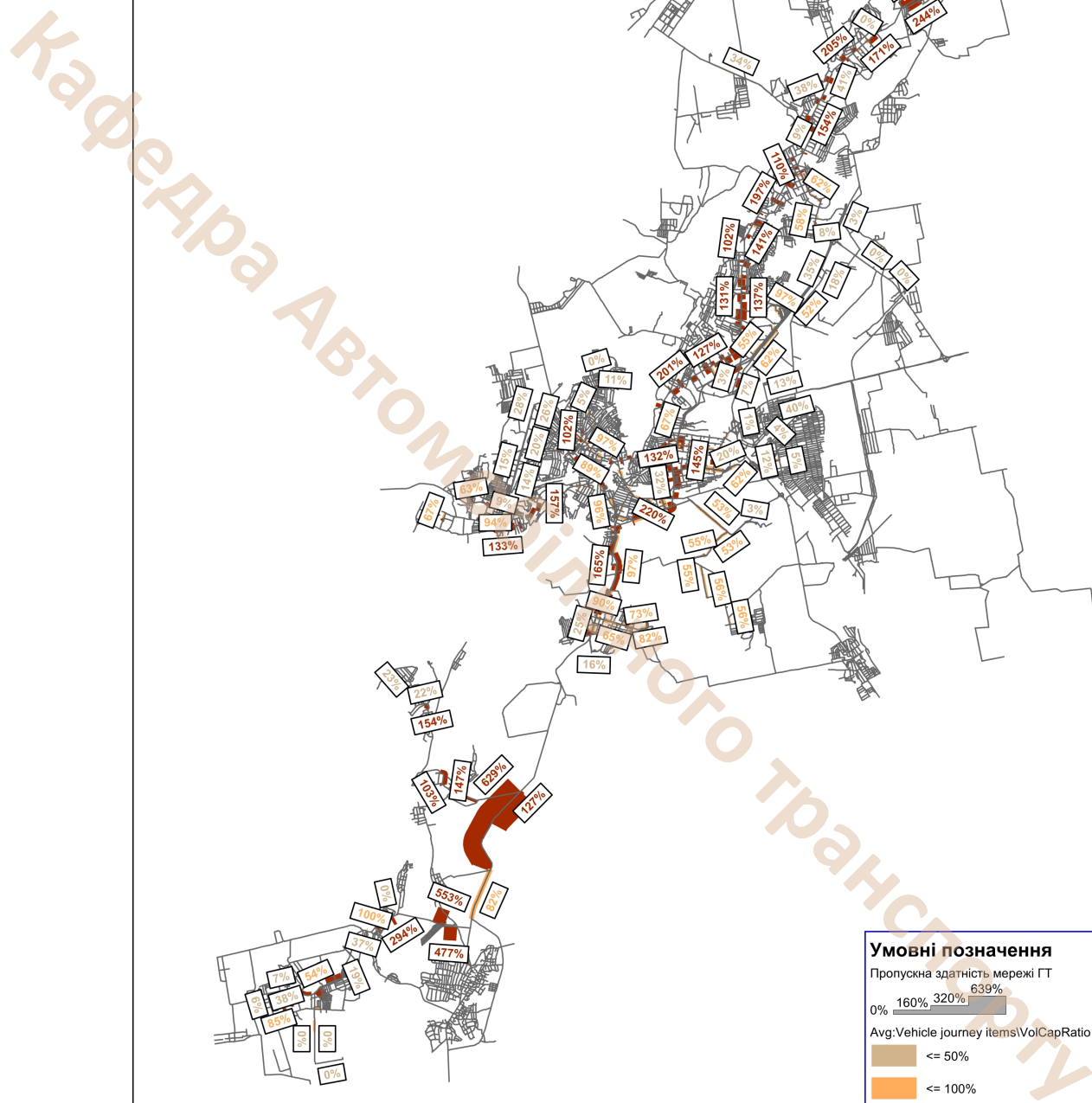


Рис. 3.1. Коефіцієнти дискомфорту рухомого складу (в залежності від рівня завантаження мережі)

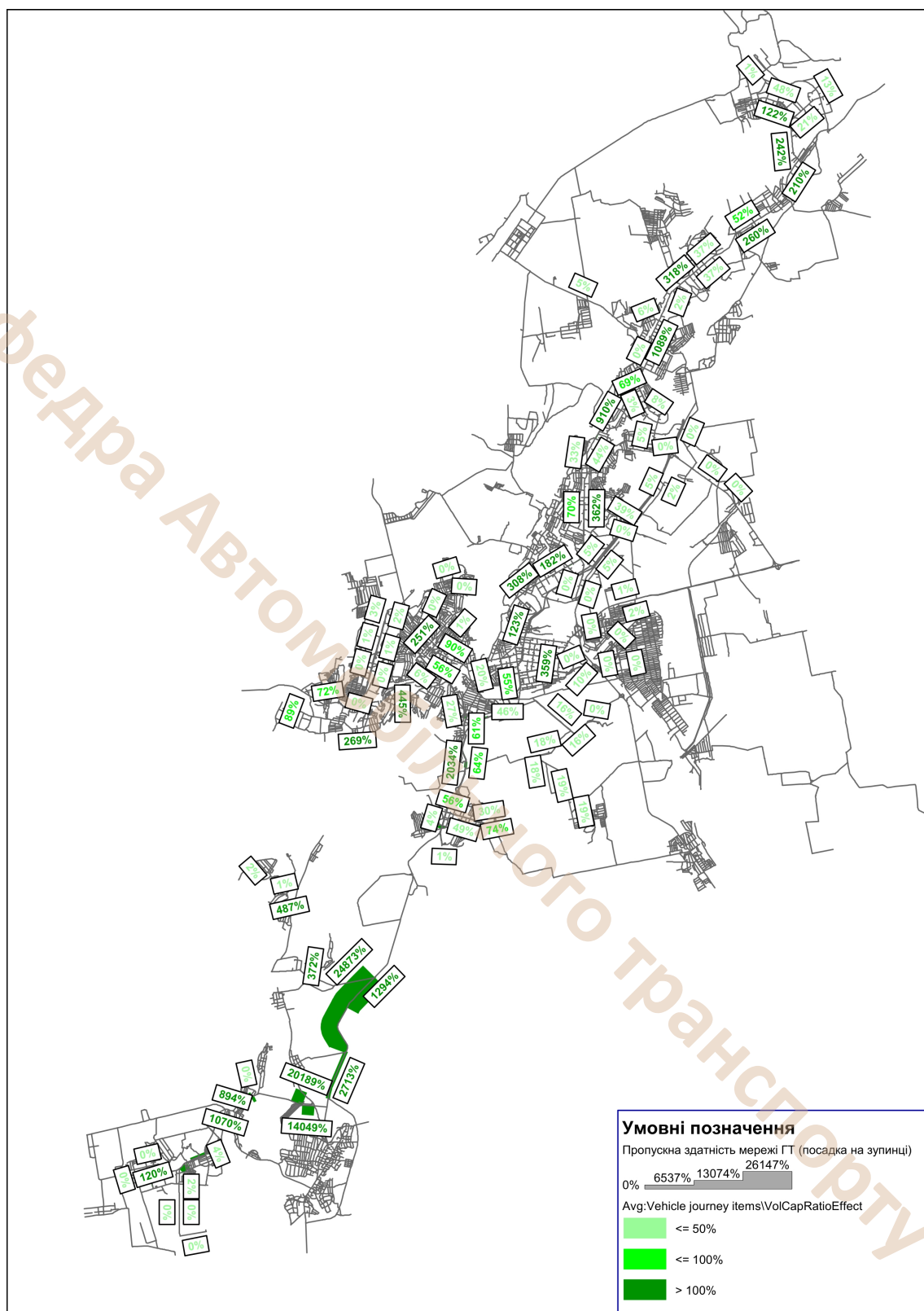


Рис. 3.3. Коефіцієнт дискомфорту посадки у транспортний засіб (в залежності від рівня завантаження мережі)

Основні осередки критичного завантаження (позначені темно-червоним кольором, більше 100%) зосереджені у південній частині міста (райони Інгульця та прилеглі селища) та вздовж центральної магістральної осі «північ-південь».

На деяких ділянках коефіцієнт дискомфорту сягає аномальних значень (477%, 553%, 629%) що свідчить про значний рівня завантаженості рухомого складу на цих напрямках у моделі, де попит кратно перевищує номінальну місткість наявних рейсів.

Мережа характеризується високою нерівномірністю; значна частина периферійних маршрутів працює в межах норми (50 %), тоді як магістральні вулиці транспортної системи стабільно перевантажені з точки зору привабливості рухомого складу (рівня наповненості).

Картограма на рис.3.3 представляє *VolCapRatioEffect*, що відповідає нелінійному штрафу за дискомфорт у момент посадки (згідно з формулою $VolCapRatio^3$).

Через кубічну залежність навіть незначне перевищення порога в 100% завантаження викликає зростання показника дискомфорту. Це видно за значеннями у тисячах відсотків (24873%, 14049%). Висока концентрація «зеленого» дискомфорту на півдні свідчить про те, що для пасажирів цих районів суб'єктивний опір (сприйманий час) зростає настільки сильно, що можливість посадки у транспорт стає ймовірно мінімальною.

Картограма на рис.3.3 ілюструє «бар'єр посадки». Там, де завантаження було 400-500%, ефект дискомфорту стає критичним фактором, який у циклі зворотного зв'язку повинен змусити модель перерозподілити дані потоки на інші види транспорту або маршрути.

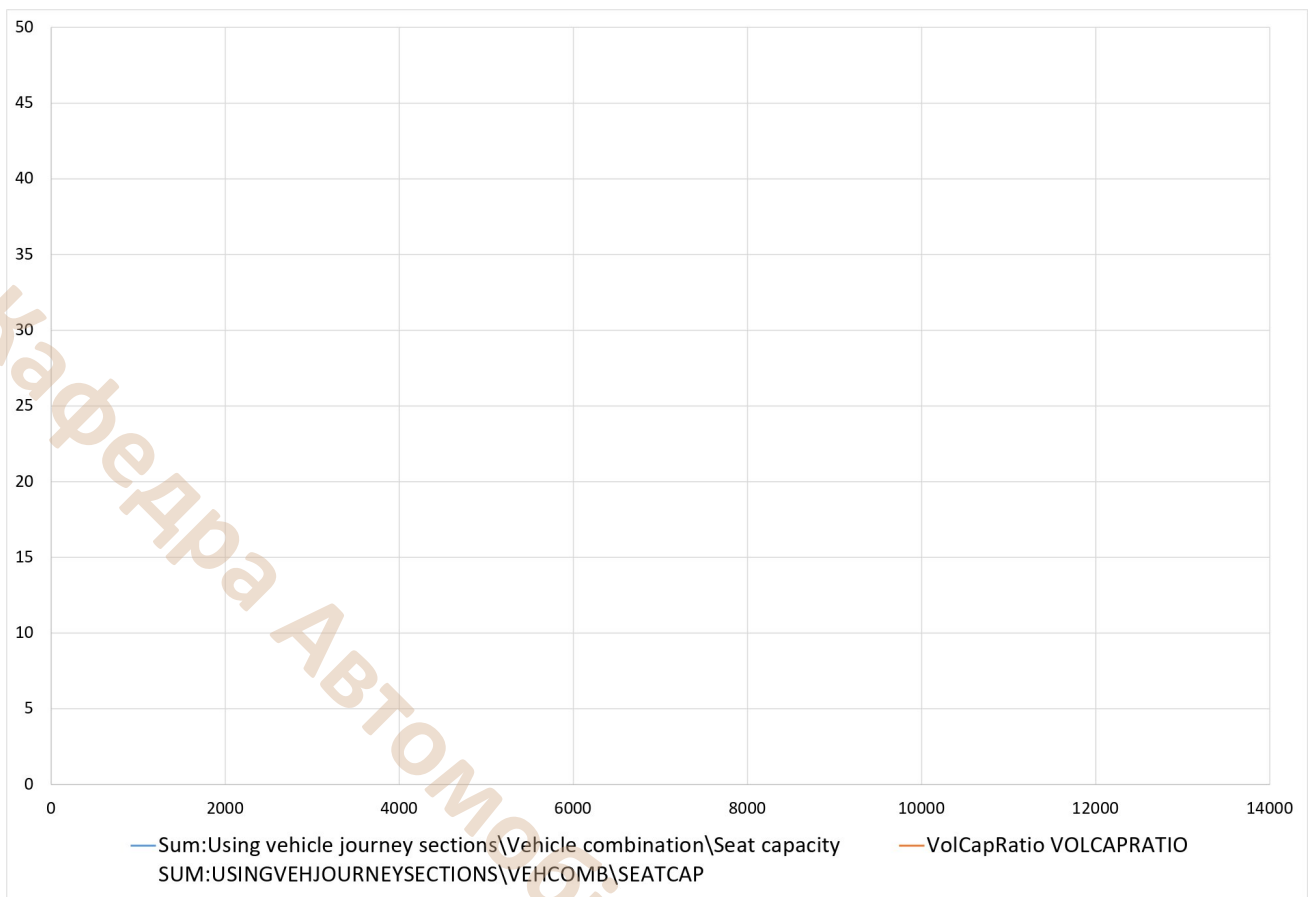


Рис.3.4. Залежність $VolCapRatio$ та $VolCapRatioEffect$ по всім рейсам на громадському транспорті у м. Кривий Ріг

Діаграма на рис.3.4. показує сумарну пасажиромісткість (кількість сидячих місць). Більшість транспортних засобів мають місткість близько 19, 23 або 30 місць, що вказує на використання рухомого складу малого та середнього класу (наприклад, мікроавтобуси типу "Рута" або автобуси "Богдан"), що є типовим для мережі Кривого Рогу. Поодинокий пік до 46 місць свідчить про наявність одиниць великої місткості (автобуси комунального транспорту).

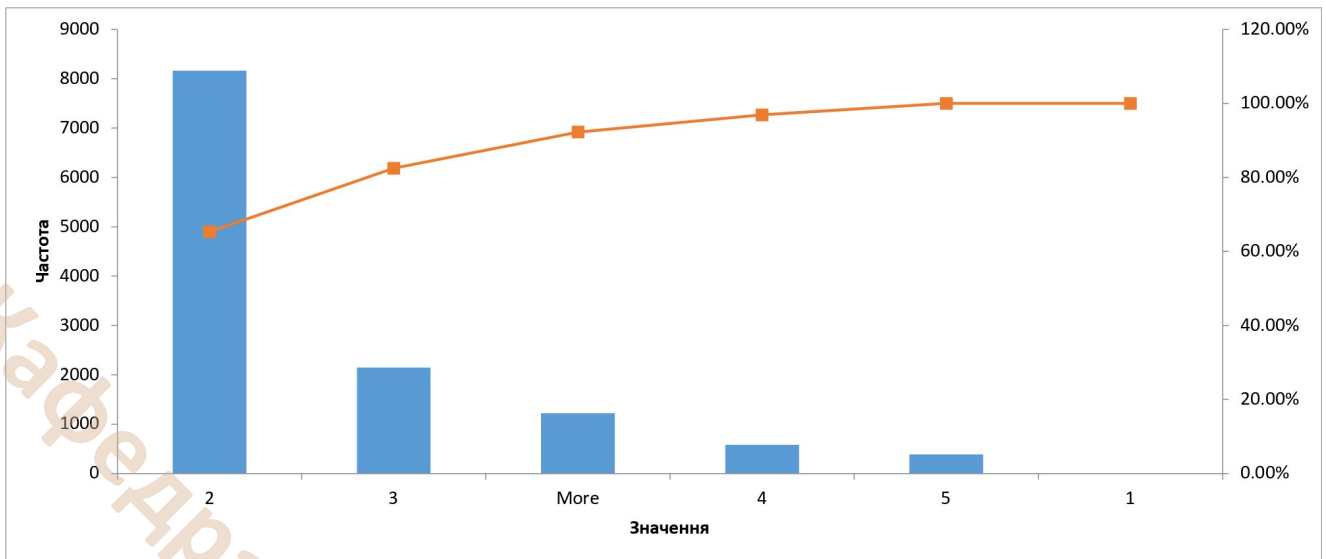


Рис.3.5. Гістограма розподілу показника *VolCapRatio*

Помаранчева лінія (*VolCapRatio*) на рис.3.5 відображає коефіцієнт завантаження. Більшість значень коливаються в діапазоні 0–5, що для даного атрибута в моделі відповідає перевантаженню у 2–5 разів відносно сидячих місць.

У правій частині графіку (рейси після 9000-го) спостерігається значне «згущення» високих значень завантаження, що узгоджується з отриманими картографами вихідних показників, де окремі напрямки (особливо південний вектор) працюють у режимі постійного перевантаження. Пікові значення помаранчевої лінії (до 10-11 одиниць) свідчать про критичне перевантаження, де на одне сидяче місце претендує 10 пасажирів. У реальних умовах це фізично неможливо, але в макромоделі без обмежень свідчить про те, що попит на цих ділянках катастрофічно перевищує пропозицію.

Гістограма на рис.3.6. демонструє розподіл частоти виникнення різних рівнів завантаження серед елементів рейсів. Модальне значення -2. Найбільша кількість сегментів мережі (понад 8000 випадків) мають коефіцієнт завантаження біля 2. Згідно з формулою дискомфорту, де $A=2.0$ та $B=2.0$, при $VolCapRatio = 2$ значення в експоненті дорівнює 2. Це вже викликає відчутне зростання опору, оскільки пасажиропотік удвічі перевищує кількість сидячих місць.

Значна частина рейсів має критичні показники завантаження. Наявність стовпчика значень "4" і "5" свідчить про те, що в мережі є системні ділянки, де кількість пасажирів у 4–5 разів перевищує кількість сидячих місць. Це відповідає ситуаціям, коли транспортний засіб заповнений понад номінальну загальну місткість (включаючи місця для стояння).

Рівень завантаження "1" (відповідність попиту кількості сидячих місць) зустрічається найрідше, що вказує на те, що модель зафіксувала дефіцит пропозиції: транспорт або працює з перевантаженням, або майже не використовується на окремих ділянках.

Помаранчева лінія відображає накопичений відсоток випадків: близько 65% усіх елементів рейсів мають коефіцієнт завантаження до 2 включно, решта 35% рейсів розподілені між значеннями від 3 до 5+. Отримані результати свідчать про те, що кожна третя поїздка в моделі відбувається в умовах надмірного дискомфорту.

Кумулятивна крива виходить на плато після значення "5", що підтверджує: основна маса критичних перевантажень зосереджена в діапазоні 2,0–5,0. Якщо зіставити цю гістограму з формулою

$$E(C) = \sum_{a \in C} F_a \cdot e^{(A \cdot \frac{P_a}{S_a} - B)}$$

для більшості рейсів (значення "2") множник дискомфорту становить $e^2 = 7,39$. Тобто суб'єктивний час перебування в транспорті для пасажирів стає у 7 разів вищим за фактичний фізичний час руху.

Для значень "5" цей множник стає екстремальним: $e^8 = 2980$ фактично блокує вибір таких маршрутів у моделі, оскільки опір стає нескінченно великим.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ПРИ ПОСАДЦІ В ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

Безпека пасажирів під час посадки в громадський транспорт - це комплексне питання, яке залежить не лише від уважності водія, а й від технічних характеристик рухомого складу та рівня його завантаженості. Для міської мережі, де основу парку складають транспортні засоби малої та середньої місткості, ризики травмування мають свої особливості.

Згідно з переліком комбінацій транспортних засобів (див. розділ 2) у маршрутній мережі міста Кривий Ріг, пасажирів користуються різними типами систем, кожен з яких має свої особливості безпеки:

Мікроавтобуси (Клас А, В — до 19 місць). Конструктивні особливості рухомого складу, зокрема обмежені габарити проходів та недостатня висота стелі салону, обумовлюють необхідність оптимізації часових інтервалів посадки пасажирів для запобігання затримкам. Основними чинниками ризику при цьому виступають імовірність травмування механізмами автоматичного закриття дверей, а також втрата статичної стійкості пасажирів на щаблях підніжок під час вертикального переміщення.

Автобуси та тролейбуси середньої місткості (кат. М3). Наявність спеціалізованих накопичувальних майданчиків оптимізує ергономіку вхідної групи та сприяє підвищенню пропускної здатності дверних отворів. Водночас спостерігається дефіцит використання пасажиромі стаціонарних опорних пристроїв (поручнів) у цій зоні, що в умовах інерційних навантажень на старті руху призводить до зростання ризиків травматизму внаслідок втрати стійкості.

Електротранспорт (трамваї, зчеплені тролейбуси). Мають найбільшу загальну місткість (до 170–220 осіб). Найбільша небезпека тут виникає в зоні «гармошки» (вузла зчленування) та на високих підніжках старих моделей трамваїв.

Коли кількість пасажирів значно перевищує кількість сидячих місць виникає критичне переповнення. У переповненому салоні пасажир не завжди може фізично

дотягнутися до опори. При спробі посадки в уже повний транспорт пасажирів можуть бути виштовхнуті на проїжджу частину або затиснуті дверима. Переповнений автобус стає менш стійким при різких маневрах.

Знаходження пасажирів на посадковому майданчику має бути обмежене безпечною відстанню (не менше 0,5 м) від краю бордюрного каменю для запобігання випадковому контакту з корпусом транспортного засобу (ТЗ), що рухається.

Забороняється наближення до ТЗ до моменту його повної зупинки та фіксації. Необхідно враховувати імовірність виникнення бокового заносу ТЗ у межах зупиночної кишені, особливо в умовах зниженого коефіцієнта зчеплення дорожнього покриття в зимовий період.

Для оптимізації пропускної здатності дверних отворів та мінімізації конфліктних точок слід дотримуватися пріоритетності виходу пасажирів. Неконтрольована щільність потоку в зоні входу є основним чинником дестабілізації рівноваги та падіння під елементи ходової частини.

При посадці в рейковий транспорт (трамвай), розташований на осі проїжджої частини, необхідно здійснювати візуальний контроль дорожньої обстановки через перебування пасажирів в зоні динамічного впливу суміжного транспортного потоку.

Безпосередньо після входу до салону пасажир зобов'язаний зафіксувати положення тіла за допомогою стаціонарних опорних пристроїв (поручнів).

Категорично не рекомендується тривале перебування пасажирів на підніжках та в зоні стулкового механізму дверей, обмежуючи огляд водія через сферичні дзеркала та створюючи ризики випадання.

За умов перевищення номінальної кількості сидячих місць пасажирам слід переміщуватися до центральної частини салону, що сприяє рівномірному розподілу осьових навантажень, знижує локальну щільність потоку та забезпечує безперешкодну ротацію пасажирів на наступних зупиночних пунктах.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення точності моделювання пасажирських потоків шляхом інтеграції факторів обмеженої місткості та суб'єктивного дискомфорту пасажирів.

1. Доведено, що класичні моделі розподілу транспортного попиту без урахування місткості дають похибку, ігноруючи поведінкові аспекти. Впроваджено експоненціальну функцію дискомфорту та кубічну залежність для моделювання бар'єру посадки ($VolCapRatio^3$). Це дозволило математично описати "штрафний" час, який пасажир підсвідомо додає до тривалості поїздки при надмірному заповненні салону.

2. Реалізовано ітераційний метод розподілу попиту із впровадженням алгоритмів згладжування (коефіцієнт 0,5), що забезпечило стабільність моделі та запобігло флуктуаціям попиту. Для масштабних систем (на прикладі м. Кривий Ріг) обґрунтовано та апробовано спрощений апроксимаційний метод через матрицю пропускної здатності (PT_Cap), що дозволило скоротити обчислювальні витрати при збереженні релевантності результатів.

3. Проведений аналіз виявив системні диспропорції транспортної системи міста Кривий Ріг. Південний вектор та магістральна вулиця є найбільш критичними зонами, де коефіцієнт завантаження $VolCapRatio$ перевищує норму у 4–5 разів. Встановлено, що для 35% усіх рейсів у місті умови перевезення характеризуються як "надмірний дискомфорт", при якому суб'єктивний час поїздки сприймається у 7 і більше разів довшим за фактичний.

4. Аналіз виявив пряму залежність між низькою привабливістю маршрутів та використанням рухомого складу малої місткості (19–30 місць). Визначено, що наявність "бар'єру посадки" (коефіцієнт дискомфорту понад 1000%) є сигналом для управлінських рішень щодо заміни мікроавтобусів на автобуси великої місткості та збільшення частоти руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kurauchi F, Schmöcker JD (eds) (2017) Public transport planning with smart card data. *CRC Press, Boca Raton*.
2. Hickman M (2004) Bus automatic vehicle location (AVL) systems. In: Gillen D, Levinson D (eds) Assessing the benefits and costs of ITS. *Kluwer*, pp 59–88.
3. Brands T, Dixit M, van Oort N (2020) Impact of a new metro line in Amsterdam on ridership, travel times, reliability and societal costs and benefits. *Eur J Transp Infrastruct Res* 20(4):335–353.
4. Meng M, Rau A, Mahardhika H (2018) Public transport travel time perception: effects of socioeconomic characteristics, trip characteristics and facility usage. *Transp Res Part A* 114:24–37.
5. González RM, Martínez-Budría E, Díaz-Hernández JJ, Esquivel A (2015) Explanatory factors of distorted perceptions of travel time in tram. *Transport Res Part F* 30:107–114.
6. Diab EI, El-Geneidy AM (2012) Understanding the impacts of a combination of service improvement strategies on bus running time and passenger's perception. *Transp Res Part A* 46:614–625.
7. O'Farrell PN, Markham J (1974) Commuter perceptions of public transport work journeys. *Environ Plan A* 6(1):79–100.
8. Wardman M (2014) Valuing convenience in public transport. *Discussion Paper 2014–02. The International Transport Forum at the OECD*.
9. Varotto S, Glerum A, Stathopoulos A, Bierlaire M (2014) Modelling travel time perception in transport mode choices. *14th Swiss transport research conference, Monte Verità/Ascona*.
10. Fan Y, Guthrie A, Levinson D (2016) Waiting time perceptions at transit stops and stations: effects of basic amenities, gender, and security. *Transp Res Part A* 88:251–264.

11. Psarros I, Kepaptsoglou K, Karlaftis MG (2011) An empirical investigation of passenger wait time perceptions using hazard-based duration models. *J Public Transp* 14(3):109–122.
12. Watkins KE, Ferris B, Borning A, Rutherford GS, Layton D (2011) Where Is My Bus? Impact of mobile real-time information on the perceived and actual wait time of transit riders. *Transp Res Part A* 45:839–848.
13. Dewulf B, Neutens T, Van Dyck D, De Bourdeaudhuij I, Van de Weghe N (2012) Correspondence between objective and perceived walking times to urban destinations: influence of physical activity, neighbourhood walkability, and socio-demographics. *Int J Health Geogr* 11(1):1–10.
14. Hua W, Feng X, Zhu X, Jie Y (2018) Comprehensive analysis and evaluation of metro transfer time perception. *3rd International conference on mechatronics and information technology (ICMIT 2018)*.
15. Kelly P, Krenn P, Titze S, Stopher P, Foster C (2013) Quantifying the difference between self-reported and global positioning systems-measured journey durations: a systematic review. *Transp Rev* 33(4):443–459.
16. Delclòs-Alió X, Marquet O, Miralles-Guasch C (2017) Keeping track of time: a Smartphone-based analysis of travel time perception in a suburban environment. *Travel Behav Soc* 9:1–9.
17. Nitsche P, Widhalm P, Breuss S, Brändle N, Maurer P (2014) Supporting large-scale travel surveys with smartphones—a practical approach. *Transp Res Part C* 43:212–221.
18. Zhang, C.; Wang, M.; Dong, J.; Lu, W.; Liu, Y.; Ni, A.; Yu, X. Factors and Mechanism Affecting the Attractiveness of Public Transport: Macroscopic and Microscopic Perspectives. *J. Adv. Transp.* 2022, 2022, 5048678.
19. Hoo, W.; Waheeda, A.; Reesha, A. Factors Influencing the Passenger Satisfaction at Public Transport in Kuala Lumpur, Malaysia. *J. Proj. Manag. Pract.* 2023, 3, 77–94

20. Hansson, J.; Pettersson, F.; Svensson, H.; Wretstrand, A. Preferences in Regional Public Transport: A Literature Review. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2019, 11, 38.
21. Redman, L.; Friman, M.; Gärling, T.; Hartig, T. Quality Attributes of Public Transport That Attract Car Users: A Research Review. *Transp. Policy* 2013, 25, 119–127.
22. Zhang, C.; Liu, Y.; Lu, W.; Xiao, G. Evaluating Passenger Satisfaction Index Based on PLS-SEM Model: Evidence from Chinese Public Transport Service. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 2019, 120, 149–164.
23. Sukhov, A.; Lättman, K.; Olsson, L.E.; Friman, M.; Fujii, S. Assessing Travel Satisfaction in Public Transport: A Configurational Approach. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2021, 93, 102732.
24. Schnieder, M. Effective Speed: Factors That Influence the Attractiveness of Cost Effective and Sustainable Modes of Transport in Cities. *Sustainability* 2023, 15, 8338.
25. Levinson, H.S. Transit Cooperative Research Program. In *Bus Rapid Transit*; National Research Council (U.S.), Ed.; TCRP Report; Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 2003.
26. Yao, D.; Xu, L.; Li, J. Does Technical Efficiency Play a Mediating Role between Bus Facility Scale and Ridership Attraction? Evidence from Bus Practices in China. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 2020, 132, 77–96.
27. Daganzo, C.; Ouyang, Y. *Public Transportation Systems: Principles of System Design, Operations Planning and Real-Time Control*; World Scientific: Hackensack, NJ, USA, 2019.
28. Ceder, A. *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, 2nd ed.; CRC Press/Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2019.
29. De Vos, J.; Waygood, E.O.D.; Letarte, L. Modeling the Desire for Using Public Transport. *Travel Behav. Soc.* 2020, 19, 90–98.
30. Brechan, I. Effect of Price Reduction and Increased Service Frequency on Public Transport Travel. *J. Public Transp.* 2017, 20, 139–156.

31. Hensher, D.A. A Service Quality Index for Area-Wide Contract Performance assessment. *Res. Transp. Econ.* 2007, 18, 259–276.
32. Stefanouli, M.; Polyzos, S. Gravity vs Radiation Model: Two Approaches on Commuting in Greece. *Transp. Res. Procedia* 2017, 24, 65–72.
33. Gasparik, J.; Dedik, M.; Cechovic, L.; Blaho, P. Estimation of Transport Potential in Regional Rail Passenger Transport by Using the Innovative Mathematical-Statistical Gravity Approach. *Sustainability* 2020, 12, 3821.
34. Juřík, D.; Janoš, V. Using Census Data for the Gravity Model in Smart Transport Planning. *Proceedings of the 2022 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, 2022, pp. 1–6.
35. Janoš, V.; Kříž, M. Pragmatic Approach in Regional Rail Transport Planning. *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.* 2018, 100, 35–43.
36. Yang, X.; Qi, Y. Research on Optimization of Multi-Objective Regional Public Transportation Scheduling. *Algorithms* 2021, 14, 108.
37. Ľupták, V.; Drożdziel, P.; Stopka, O.; Stopková, M.; Rybicka, I. Approach Methodology for Comprehensive Assessing the Public Passenger Transport Timetable Performances at a Regional Scale. *Sustainability* 2019, 11, 3532.
38. Tesla, J.; Horak, J.; Ivan, I. Frequency Analysis of Public Transport between Czech Municipalities. *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2015.
39. Petersen, T. Watching the Swiss: A Network Approach to Rural and Exurban Public Transport. *Transp. Policy* 2016, 52, 175–185.
40. Hansson, J.; Pettersson-Löfstedt, F.; Svensson, H.; Wretstrand, A. Patronage Effects of Off-Peak Service Improvements in Regional Public Transport. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2022, 14, 19.
41. Metelka, S.; Janoš, V. Demand Variation in Regional Transport. *Proceedings of the 2021 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, 2021, pp. 1–5.

42. Santos, G.; Maoh, H.; Potoglou, D.; von Brunn, T. Factors Influencing Modal Split of Commuting Journeys in Medium-Size European Cities. *J. Transp. Geogr.* 2013, 30, 127–137.

43. Daldoul, M.; Jarboui, S.; Dakhlaoui, A. Public Transport Demand: Dynamic Panel Model Analysis. *Transportation* 2016, 43, 491–505.

Кафедра Автомобільного транспорту