

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.072

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409)

Цинь Сяосюань, Є. В. Любий, доц., канд. техн. наук

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна**e-mail: lion_khadi@ukr.net*

Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях

Основною метою статті є проведення аналітичного огляду існуючих методів формування моделей попиту на пересування пасажирів громадським транспортом. Результати огляду сучасних практик створення матриць пасажирських кореспонденцій спрямовані на удосконалення існуючих методів формування моделей транспортного попиту та розробку нових, використання яких створить можливість отримання точної та надійної основи для оцінювання результатів прогнозування розвитку міських транспортних систем.

інтервальна концепція, матриця кореспонденцій, пасажирські перевезення, транспортний попит

Постановка проблеми. Найпроблемнішим етапом моделювання потреб населення у перевезеннях, з позиції складності самого процесу, є генерація матриць пасажирських кореспонденцій (МПК). Основна складність процесу формування фактичної (реальної) МПК на прикладі міста та/або територіальної громади полягає в обмеженості у джерелах та інструментах фахівців з транспортного моделювання в отриманні надійної інформації про фактичні пасажирські кореспонденції, які є базою для моделювання якісної матриці кореспонденцій (МК). При цьому особливо гостро ця проблема проявляється при необхідності моделювання МПК великих і найбільший міст, маршрутні системи яких характеризуються значними розмірами і різноманіттям напрямків перевезення пасажирів [1]. Тому пошук нових та удосконалення існуючих методів створення МПК є актуальною проблемою, рішення якої впливатиме як на ефективність функціонування маршрутних пасажирських систем міст в цілому, так і на розробку та оцінку можливих сценаріїв розвитку системи міського громадського транспорту (ГТ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування МПК є важливим етапом під час моделювання транспортного попиту та організації ефективної роботи ГТ. Існує два основних підходи до побудови таких МПК. Перший базується на проведенні натурних спостережень за переміщенням пасажирів, що дозволяє отримати високоточні дані, але водночас є вкрай трудомістким і дороговартісним методом. Другий підхід ґрунтується на використанні різноманітних моделей, які спираються на статистичну інформацію, апріорні логічні гіпотези та ймовірнісні характеристики транспортного процесу [2-7].

Окрім зазначених методів, сучасні тенденції розвитку транспортного моделювання дозволяють застосовувати новітні підходи, що базуються на використанні інтелектуальних алгоритмів. Зокрема, методи нечіткої логіки і генетичних алгоритмів знаходять широке застосування у прогнозуванні пасажирських перевезень та оптимізації транспортних потоків. Крім того, значну роль відіграють дані, отримані з інтелектуальних транспортних систем, які дозволяють в реальному часі аналізувати пасажиропотоки, що значно підвищує точність та адаптивність моделей.

Таким чином, аналіз методів формування МПК потребує комплексного підходу, який враховує як класичні, так і сучасні методи моделювання, а також можливості, що

відкриваються завдяки впровадженню новітніх технологій у транспортну сферу.

Постановка завдання. Мета даної статті полягає у проведенні аналізу сучасних підходів до формування моделей попиту на пересування пасажирів. Результати проведеного аналізу є основним підґрунтям для розробки нових і удосконалення існуючих методів створення МПК, які б враховували інтервальний підхід до моделювання потреб населення у пересуваннях і гарантували генерацію великої кількості можливих станів МК з урахуванням можливих обмежень.

Виклад основного матеріалу. Основними двома кардинально різними підходами до формування МПК прийнято вважати [2-7]:

- розрахунок МПК на основі проведених натурних спостережень за роботою ГТ (талонне, табличне-опитувальне обстеження пасажиропотоків, опитування користувачів міського пасажирського транспорту на зупинках);

- створення МПК з використанням різноманітних моделей (статистичні, синтетичні, ймовірнісні).

Перевагою використання методів першого підходу є можливість отримання точної, якісної і достовірної вхідної інформації для формування реальної МПК, яка характеризуватиме фактичний стан транспортного попиту на пересування пасажирів у відповідний проміжок часу. У свою чергу, можливими недоліками використання цього підходу для створення МПК можна вважати:

- високу трудомісткість і фінансові витрати. Організація та проведення спостережень вимагають значної кількості персоналу та часу. Витрати на організацію досліджень (зарплата спостерігачів, обладнання, обробка даних) можуть бути досить високими);

- обмежена точність даних. Спостерігачі можуть допускати помилки під час фіксації інформації (наприклад, неточне визначення пункту посадки чи висадки пасажирів). Також людський фактор може впливати на об'єктивність отриманих даних;

- не повна ширина охоплення. Натурні спостереження найчастіше застосовуються на окремих видах транспорту, що не дозволяє комплексно оцінити всі пересування пасажирів у місті. У переважній кількості випадків досліджуються лише трудові пересування;

- вплив зовнішніх факторів. Погодні умови, дорожні затори, аварії або сезонні зміни можуть спотворювати реальні картину щодо пересувань населення під час спостережень;

- складність збору повної інформації про пересадки. Спостереження на зупинках та у транспорті не завжди дозволяють точно визначити кінцеву точку поїздки пасажирів, особливо якщо він здійснює пересадки;

- складність масштабування та оновлення. Для розширення досліджень необхідно залучати більше ресурсів. Отримані дані швидко втрачають актуальність, тому їх потрібно регулярно оновлювати, що додатково підвищує витрати;

- обмеженість у зборі основних соціально-демографічних характеристик. Натурні спостереження не дозволяють отримати детальну інформацію про пасажирів (вік, стать, мету поїздки), що ускладнює сегментацію попиту.

Через ці основні недоліки натурні спостереження зазвичай поєднують з іншими методами збору даних, такими як анкетування, GPS-моніторинг або аналіз даних мобільних операторів, точність результатів поєднання яких також потребує додаткової перевірки.

Моделі, що відносяться до другого підходу, можна розділити на три ключові групи [2-12]: статистичні; синтетичні (апріорні, теоретичні); ймовірнісні.

Статистичні моделі розрахунку МПК дають змогу поширити наявні значення кореспонденцій поточного або раніше дослідженого періоду на майбутній період аналізу. До таких методів належать метод єдиного коефіцієнту росту, метод середніх коефіцієнтів росту, метод Фернесса (Фратара), детройтський метод, моделі середнього арифметичного коефіцієнту росту, паризький метод [3-7, 9, 13].

Загальний сенс моделей коефіцієнтів росту полягає у пропорційному коригуванні існуючої МПК для її використання при описі можливого стану транспортної або маршрутної системи на майбутнє. Найпростішим серед моделей

даного виду є метод єдиного коефіцієнту росту

$$h_{ij} = \tau \cdot r_{ij}, \quad (1)$$

де r_{ij} – величина кореспонденції між транспортними районами (ТР) i та j базової (існуючої) МПК, пас.; τ – коефіцієнт росту для об'єкту, що досліджується.

Складнішим, в рамках цієї групи моделей, є метод Фратара, який передбачає використання для кожного ТР власних коефіцієнтів [13, 14]

$$h_{ij} = r_{ij} \cdot \iota_i \cdot H_j \cdot B_i \cdot V_j, \quad (2)$$

де ι_i, H_j – коефіцієнти росту кореспонденцій для ТР i та j ; B_i, V_j – коефіцієнти для балансування.

Серед переваг моделей цієї групи можна відзначити їхню зрозумілість і простоту, а серед недоліків – потребу у початковій (базовій) МПК, на отримання необхідно витратити велику кількість ресурсів; значна залежність від точності початкової (базової) МПК; не враховують зміни в транспортній пропозиції; обмеженість використання (короткострокове планування).

Наступну групу моделей для формування МПК в рамках другого підходу складають синтетичні (теоретичні) моделі, засновані на апіорних гіпотезах стосовно закономірностей формування кореспонденцій [3-7, 9, 10]. Використання моделей цієї групи вимагає значно менших витрат різного ресурсів для створення МПК, але не гарантують одержання достатньо точних результатів моделювання МК. Найбільшого поширення серед моделей цієї групи отримали гравітаційні, ентропійні моделі, а також метод проміжних можливостей, але слід розуміти, що ці моделі відносяться лише до етапу розподілу кореспонденцій між парами ТР [2-7, 9].

Однією з перших синтетичних моделей, застосованих для встановлення та оцінки міжрайонних кореспонденцій, була гравітаційна модель [15-20]. Модель базується на простому принципі – кореспонденція між районом i та районом j пропорційна загальному обсягу відправлень із району i , загальному обсягу прибуттів у район j та деякій функції індивідуальних витрат на пересування c_{ij} , яка зазвичай залежить від довжини між цими районами. Довжина між ТР відображає рівень доступності транспортної системи, враховуючи швидкість і комфортність пересувань, що забезпечуються транспортною мережею. Спосіб визначення цього параметра (складності пересування) може змінюватися залежно від конкретного варіанту моделі.

За аналогією із законом Ньютона, гравітаційну модель для розрахунку пасажирської кореспонденції можна представити як

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j}{c_{ij}^2}, \quad (3)$$

або

$$h_{ij} = D_i \frac{A_j \cdot c_{ij} \cdot \omega_j}{\sum_m A_m \cdot c_{im} \cdot \omega_m}, \quad (4)$$

де ω – константа (коефіцієнт калібрування); D_i – місткість ТР i з відправлення, пас.; A_j – місткість ТР j з прибуття, пас.; c_{ij} – функція індивідуальних витрат пасажирів на пересування (складність пересування між ТР); n – кількість ТР районів для об'єкту моделювання, од.

Слід розуміти, що гравітаційні моделі передбачають процедуру обов'язкового калібрування результатів моделювання кореспонденцій для виконання умов балансу розрахункових їх значень з вхідними чисельними значеннями місткостей ТР

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad \sum_{i=1}^n h_{ij} = A_j, \quad \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j, \quad h_{ij} > 0. \quad (5)$$

Калібрування гравітаційної моделі здійснюється доти, доки не будуть виконані наведені вище умови (5). Слід розуміти, процедура калібрування призводить до суттєвих змін отриманих за залежністю (4) кореспонденцій на початковому етапі, що говорить про низьку достовірність і точність результатів розрахунків МПК за цією моделлю. Різниця між розрахунковими і вхідними (реальними) значеннями при моделюванні пасажирських кореспонденцій може бути дуже суттєвою [4, 21].

Також розповсюдженими є й інші варіанти представлення залежності для розрахунку пасажирських кореспонденцій за гравітаційною моделлю [6]

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i^\alpha \cdot A_j^\beta}{c_{ij}^\gamma}, \quad (6)$$

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j \cdot f(c_{ij})}{\sum_m A_m \cdot f(c_{im})}, \quad (7)$$

де α, β, γ – емпіричні константи.

Автором [22] запропоновано процедуру одночасного розрахунку кореспонденції за гравітаційною моделлю з їхнім калібруванням щодо фактичних даних про переміщення між ТР. Цільова функція задачі визначення кореспонденцій за цим методом має такий вигляд

$$F(h_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h'_{ij} - h_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $F(h_{ij})$ – функція відхилення від потенційних кореспонденцій; h'_{ij} – потенційні кореспонденції між ТР, розраховані за залежністю (3) без урахування ω , пас.; h_{ij} – кореспонденції між ТР, пас.

На думку автора [22] ключовою перевагою запропонованого підходу по зрівнянню із методикою, що базується на використанні коефіцієнтів коригування, є забезпечення найбільш повної аналогії взаємозв'язку між ТР і гравітаційним законом тяжіння фізичних тіл. Для розв'язання задачі (8) автором використано множники Лагранжа, що дозволять знайти відносний екстремум функції.

На відміну «класичних» гравітаційних моделей запропонований у [22] підхід дає можливість розрахувати значення пасажирських кореспонденцій за умов виконання обмежень (5), але, при цьому, недоліком, як і для більшості модифікацій гравітаційних моделей, є врахування лише одного транспортного фактору – відстані між ТР [5, 6].

Слід розуміти, що модифікації гравітаційної моделі, в основному, будуються навколо змін, що стосуються форми представлення функції тяжіння (складності сполучення між ТР). Формування цієї функції ґрунтується на основі даних про переваги у виборі пар ТР відправлення і прибуття або ж при порівнянні розрахункових і фактичних (емпіричних) значень пасажирських кореспонденцій. Варіативність виду функції тяжіння є дуже широкою: показникова, степенева, гіперболічна, комбіновані варіанти, розрахована на основі закону розподілу випадкових величин, встановлена на основі даних про розселення населення тощо [5, 6].

Нижче представлено модифікації функцій тяжіння, що найчастіше застосовувалися в рамках створення МПК з використанням гравітаційної моделі [2-11]:

- «класична» функція тяжіння – визначається з урахуванням зворотнопропорційного впливу відстані між ТР на величину кореспонденції між ними

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}, \quad (9)$$

де n – ступінь впливу параметру, що характеризує складність пересування між парою ТР (в «класичній» гравітаційній моделі $n=1$, в моделі Якшина – $n=2$, а за параметр складності пересування між ТР приймається час поїздки між ними. У інших дослідженнях пропонується варіювання значення n в залежності від зміни величини c_{ij} , що, на думку авторів, дозволяє точніше визначити фактичні потреби пасажирів у пересуваннях);

- показникова функція тяжіння

$$f(c_{ij}) = e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (10)$$

де β – емпіричний коефіцієнт;

- комбінована функція тяжіння

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (11)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{(1 + c_{ij})^{\varphi(c_{ij})}}, \quad (12)$$

за умови, що

$$\varphi(c_{ij}) = \frac{E}{1 + e^{(F - G \cdot c_{ij})}}, \quad (13)$$

де E, F, G – коефіцієнти калібрування;

- функції тяжіння, що ґрунтуються на законах розподілу випадкових величин (за аргумент розподілу використовується якийсь транспортний фактор)

$$d_F = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}}, \quad (14)$$

$$d_{ij} = \frac{4 \cdot t^2}{\alpha^3 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{\alpha^2}}, \quad (15)$$

за умов, що відомі значення середньої, мінімальної і максимальної дальності пересування пасажирів, то згідно [23] функцію тяжіння можна представити через щільності ймовірності розподілу Сімсона

$$f(l) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (l - l_{\min})}{(l_{\max} - l_{\min})(l_0 - l_{\min})}, & \text{при } l_{\min} \leq l \leq l_0, \\ \frac{2 \cdot (l_{\max} - l)}{(l_{\max} - l_{\min})(l_{\max} - l_0)}, & \text{при } l_0 \leq l \leq l_{\max}, \\ 0, & \text{у всіх інших випадках,} \end{cases} \quad (16)$$

де σ – параметр закону розподілу, $\sigma = T_{\max} / 3$; t – час пересування між парою ТР, год. (хв.); α – параметр розподілу Максвелла; $l_{\max}, l_{\min}$ – відповідно, максимальне і мінімальне значення випадкової величини; l_0 – мода випадкової величини.

Загальним недоліком розглянутих вище варіантів представлення функції тяжіння є використання лише одного параметру – часу або відстані поїздки між парою ТР за фактор, що характеризує складність сполучення між ними. До цього слід також додати, що авторами робіт [5, 6, 8, 24] підтверджено гіпотезу про незначний вплив транспортних факторів на формування попиту на пересування.

Ще однією модифікацією гравітаційної моделі можна вважати підхід запропонований у [25], в якому використовується комбінованої функції тяжіння EVA. Не дивлячись на це, розподіл кореспонденцій виконується на основі одного параметру – часу пересування між ТР, а точність отриманих результатів розрахунку

кореспонденцій перевіряється функціоналом

$$\sum_{i=1}^n |E_i| = \sum_{i=1}^n |F_i - F_i'| \rightarrow \min, \quad (17)$$

де F_i, F_i' – відповідно, значення емпіричних і розрахункових пасажиропотоків, пас.

Результати аналізу різноманіття модифікацій гравітаційної моделі розрахунку МПК наводять до висновку про те, що основними недоліками цієї частини групи синтетичних моделей є: необхідність проведення процедури калібрування моделі для виконання умов рівності місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів (5), що суттєво впливає на достовірність результатів моделювання пасажирських кореспонденцій; на точність результатів розрахунку впливає вид обраної функції тяжіння, для визначення параметрів якої необхідно проводити натурні спостереження за пересуваннями пасажирів; використання транспортних факторів (час пересування або відстань між ТР) у функції тяжіння не в повній мірі впливає на процес формування транспортного попиту при пересуванні населення міською територією; сумнівна коректність застосування «гравітаційного закону» до моделювання поведінки населення під час поїздки.

Серед групи синтетичних моделей розрахунку МПК значного поширення також отримали ентропійні моделі, які базуються на аналогії між процесами, що відбуваються у транспортних системах і термодинамічними процесами [2, 3, 13, 26]. Цікавість цих моделей полягає в тому, що тут формалізується гіпотеза про рівноважну і випадкову поведінку елементів системи при формуванні її станів. За умов наявності такої гіпотези, найбільш ймовірним є стан системи, за якого її невизначеність, що вимірюється величиною ентропії, максимальна [4]. Використання цього принципу на прикладі вирішення задачі розрахунку пасажирських кореспонденцій передбачає розв'язок залежності

$$\max E = \max \left(- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln(h_{ij}) \right), \quad (18)$$

де E – ентропія системи; n – кількість ТР для об'єкту моделювання.

За умов практичної реалізації гіпотеза про випадковість поведінки пасажирів замінюється на гіпотезу про наявність апіорних даних про переваги (уподобання) пасажирів при виборі пари ТР, тоді залежність для розрахунку трансформується у (19)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln \left(\frac{s_{ij}}{h_{ij}} \right) \rightarrow \max, \quad (19)$$

де s_{ij} – «ідеальні» кореспонденції, які відповідають апіорним перевагам (уподобанням) пасажирів при пересуванні.

При цьому враховуються обмеження, які є схожими з (5)

$$\begin{cases} h_{ij} \geq 0; \\ \sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^m h_{ij} = A_j, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot h_{ij} = B_{\text{заг}}, \end{cases} \quad (20)$$

де $B_{\text{заг}}$ – загальні транспортні витрати на здійснення пересувань.

Основними перевагами ентропійних моделей є незначна трудомісткість виконання розрахунків (проста комп'ютерна програмна реалізація) і простота сприйняття оптимізаційного критерію. Серед ключових недоліків цих моделей можна

відзначити наступні: створення МПК можливе лише за умови замкненості транспортної системи, тобто без додавання нових або закриття наявних ділянок вулично-дорожньої мережі, а також за умов незмінності витрат на пересування ГТ; при розрахунку МПК враховується лише один транспортний фактор, хоча на процес формування транспортного попиту впливає багато факторів (і не тільки транспортних); сумнівна аналогія між процесами, що відбуваються в термодинамічних системах, і транспортних [2, 3, 6, 24, 26].

Групу синтетичних (теоретичних) моделей формування МПК можна продовжити методом зустрічних можливостей [13]. Сенс цього методу полягає в тому, що кожен користувач ГТ при здійсненні поїздки має можливість задовольнити свої потреби у пересуванні по мірі віддалення від початкового пункту і чим довший шлях він долає, тим більше виникає цих можливостей. Тобто при розрахунку величини кореспонденції враховуються ймовірності закінчення пасажиром пересування в альтернативних пунктах призначення (з урахуванням можливості задовольнити потребу пасажирів у пересуванні в цих пунктах) і, які знаходяться на шляху прямування. Математична формалізація моделі розрахунку величини кореспонденції за методом зустрічних можливостей наступна

$$h_{ij}^y = D_i \frac{(e^{-p \cdot n_{y-1}} \cdot e^{-p \cdot n_y})}{(1 - e^{-p \cdot n_A})}, \quad (21)$$

де h_{ij}^y – величина кореспонденції між ТР i та j , на шляху прямування між якими є у альтернативних пунктів, що характеризуються потенційною можливістю закінчення пересування; p – ймовірність задоволення потреби у пересуванні одним можливим пунктом призначення (єдина можливість); n_{y-1}, n_y – накопичена кількість можливих альтернативних пунктів закінчення пересування до пункту y ; A – загальна кількість альтернативних пунктів завершення пересувань.

Недоліками цього методу є той факт, що він базується на припущенні про відносну однорідність розподілу альтернативних пунктів можливого закінчення пересування в межах зони, в рамках якої проводиться дослідження, а також використання лише одного транспортного фактору – відстані поїздки, при розрахунку величини пасажирської кореспонденції [2, 3-7, 13].

У межах групи синтетичних моделей також можна відзначити модель Шелейховського Г.В., яка базується на встановлених автором закономірностях розселення населення міською територією [5, 6]

$$F_{j(t_1, t_2)} = A_j \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T_{\max}} \ln \frac{T_{\max}}{t_n} dt, \quad (22)$$

де $F_{j(t_1, t_2)}$ – потік пасажирів із зони, що знаходиться між ізохронами t_1 і t_2 , у зону j .

Отже, всі синтетичні моделі розрахунку пасажирських кореспонденцій мають спільний недолік – вони недостатньо обґрунтовано враховують лише один фактор, що характеризує складність пересування між ТР, і найчастіше це відстань або час пересування (поїздки) пасажирів. Крім того, у таких моделях використовується обмежений набір показників для визначення кореспонденцій, причому їхній вибір часто базується на суб'єктивних міркуваннях. Це не дозволяє повною мірою відобразити ймовірнісний і багатофакторний характер трудових зв'язків при формуванні МПК, у результаті чого отримані дані можуть суттєво відрізнятись від реальних, тоді як допустима похибка у прогнозуванні попиту на транспортні послуги не повинна перевищувати 20-25 % [6, 27].

Проблеми і недоліки формування МПК з використанням синтетичних моделей стали поштовхом у розвитку ймовірнісного підходу до формування моделей транспортного попиту. У рамках цього підходу особливої уваги заслуговують моделі дискретного вибору [6, 9, 13, 28]. Ці моделі базуються на припущеннях про вибір

шляху пересування пасажиром з певного набору альтернатив з урахуванням соціально-економічних факторів і їхньої привабливості [28-31]. Найпоширенішими моделями дискретного вибору є: мультиноміальна логіт-модель; ієрархічна логіт-модель; мультиноміальна пробіт-модель; змішана логіт-модель.

На відміну від синтетичних, моделі дискретного вибору більш детально враховують уподобання пасажирів щодо свого пересування, але оцінка точності результатів моделювання кореспонденцій за їх використання суттєво ускладнюється потребою у точній, достовірній інформації про фактичні пересування, яку можна отримати лише за рахунок проведення натурних спостережень або анкетування.

До групи ймовірнісних можна віднести регресійні моделі, сенс яких, в рамках задачі створення МПК, полягає у використанні широкого набору факторів, які характеризують потреби пасажирів у пересуваннях і їх вплив на формування пасажиропотоків через визначення коефіцієнтів регресійної моделі [2, 5, 6, 8, 28].

Також до цієї групи моделей розрахунку МПК відносяться моделі безпосереднього попиту, які використовуються для розв'язання одразу трьох задач з моделювання транспортного попиту – створення, розподіл і поділ [6, 31, 32]. Мультиплікативна модель визначення кореспонденцій представляється наступним чином [33]

$$h_{ijk} = \varphi(P_i \cdot P_j)^{\theta_{T1}} (I_i \cdot I_j)^{\theta_{T2}} \prod_m \left[(t_{ij}^y)^{\alpha_{ry}^{(1)}} (c_{ij}^y)^{\alpha_{ry}^{(2)}} \right], \quad (22)$$

де φ, θ, α – параметри моделі; P_i, P_j – чисельність населення ТР i та j ; I_i, I_j – рівень доходів населення ТР i та j ; t_{ij}^y – час поїздки між ТР i та j з використанням шляху пересування y ; c_{ij}^y – вартість поїздки між ТР i та j з використанням шляху пересування y ;

T – вид транспорту, яким можна користуватися при пересуванні між районами i та j .

Основним недоліком моделі безпосереднього попиту є необхідність використання значної кількості параметрів, які отримуються за рахунок емпіричних досліджень, до цього ж слід додати її обмежене використання в розрізі моделювання саме міських МПК.

Іншим напрямом розвитку ймовірнісних моделей розрахунку МПК є запропонована фахівцями ХНАДУ інтервальна концепція моделювання потреб населення у пересуваннях [8, 34]. Ця концепція ґрунтується на гіпотезі про те, що попит на пересування пасажирів (трудові пересування) носить випадковий характер і повинен бути описаний не однією МК, а їх множиною, кожна з матриць якої характеризує один із можливих станів транспортного попиту. Згідно інтервальної концепції граничними станами МПК є такі, що відповідають мінімальному і максимальному значенням транспортної роботи з реалізації пересувань пасажирів у межах об'єкту дослідження. Таким чином формалізований підхід до моделювання потреб у пересуваннях базується на твердженні про те, що кожен користувач системи ГТ має можливість використати альтернативні варіанти прямування до місця прикладання праці, а також змінювати місце роботи або проживання. За показники, що використовуються для оцінювання точності розрахункових МК, обрано різницю у транспортній роботі (23) та відхилення значень кореспонденцій (24)

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot l_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}' \cdot l_{ij}, \quad (23)$$

$$\Delta H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h_{ij} - h_{ij}')^2}, \quad (24)$$

де h_{ij} , h_{ij}' – відповідно, значення кореспонденції між ТР i та j у базовій і розрахунковій МПК, пас.; l_{ij} – відстань між ТР i та j , км.

Основним недоліком інтервальної концепції моделювання потреб населення у

пересуваннях є занадто широкий діапазон можливих станів МПК. Для ліквідації цього недоліку, на прикладі міст різних категорій (великі, середні, малі) науковцями ХНАДУ розроблені підходи щодо звуження діапазону можливих станів МК в рамках реалізації інтервальної концепції моделювання потреб у пересуваннях [2, 4-6].

Так, на прикладі малих міст [4, 11, 12] авторами запропоновано методику формування МПК на основі маршрутних МК кожного маршруту ГТ, які можна отримати за рахунок реалізації натурних спостережень. Зв'язок між кореспонденціями і місткостями зупиночних пунктів з відправлення і прибуття пасажирів описується системою рівнянь (25), на основі якої було виведено загальні аналітичні залежності для розрахунку маршрутних кореспонденцій (26).

Основною перевагою даної методики створення МПК є висока точність вхідної інформації про маршрутні кореспонденції, що отримуються за результатами натурних обстежень. Недоліком є обмеженість застосування підходу для інших категорій міст, оскільки маршрутні мережі міст цієї категорії характеризуються незначною часткою пересувань з пересадками і малою кількістю міських маршрутів.

Отримані в [4] результати дозволили більше ніж у 10 разів скоротити інтервал можливих станів МПК в рамках реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту, досягти повної відповідності значень розрахункових та емпіричних обсягів перевезення пасажирів на маршрутах ГТ та забезпечити достовірну оцінку результатів транспортного моделювання з використанням VISUM на прикладі малих міст.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 = h_{13} + \dots + h_{1(n-1)} + h_{1n} = \sum_{j=3}^n h_{1j}; \\ \dots\dots\dots \\ D_e = \sum_{j=e+1}^n h_{ej}, e \in [2; n-2]; \\ \dots\dots\dots \\ A_r = \sum_{i=1}^{r-1} h_{ir}, r \in [3; n-1]; \\ \dots\dots\dots \\ A_n = h_{1n} + h_{2n} + \dots + h_{(n-2)n} = \sum_{i=1}^{n-2} h_{in}; \\ h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e - \sum_{r=1}^{\alpha-1} A_r \text{ або } h_{ij} = \sum_{r=1}^{\alpha} A_r - \sum_{e=1}^{\alpha-1} D_e, \text{ або } h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e \pm \sum_{r=1}^{\alpha} A_r, \end{array} \right. \quad (25)$$

$$h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e - \sum_{r=1}^{\alpha-1} A_r \text{ або } h_{ij} = \sum_{r=1}^{\alpha} A_r - \sum_{e=1}^{\alpha-1} D_e, \text{ або } h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e \pm \sum_{r=1}^{\alpha} A_r, \quad (26)$$

де α – кількість місткостей ЗП з відправлення або прибуття, $[1;n]$; e, r – індекси місткостей ЗП, впорядковані в межах множини $[1;\alpha]$.

Розвитком [4] цілком можна вважати роботу [2], в якій запропоновано методику формування МПК на прикладі середніх міст. Представлена методика базується на результатах вибіркового табличного обстеження пасажиропотоків на міських маршрутах з подальшим використанням імітаційної моделі для генерації місткостей зупиночних пунктів за законом Пуассона і, відповідно, розподілом поїздок між зупинками. Далі, отримані таким чином, матриці маршрутних кореспонденцій агрегуються в загальну МПК з урахуванням приналежності кожної зупинки ГТ до відповідного ТР.

За аналогією із [4] в рамках запропонованої методики розрахунку МПК для середній міст використано припущення про відсутність впливу пересадок на формування моделі попиту, що було підтверджено результатами натурних обстежень маршрутних мереж міст цієї категорії. Реалізація розробленої методики в [2] дозволила

досягти суттєвого скорочення витрат різних ресурсів на проведення транспортних обстежень і формування загальної МПК.

На прикладі великих і найкрупніших міст [5] інтервальну концепцію було удосконалено за рахунок врахування випадкових факторів при розрахунку пасажирських кореспонденцій. Для формування можливих станів МПК автором [5] запропоновано рівномірнісний підхід, який базується на моделі (27)

$$h_{ij} = Q \cdot p_i \cdot p_j, \quad (27)$$

$$p_i = \frac{D_i}{Q}, \quad p_j = \frac{D_j}{Q}, \quad \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j = Q \quad (28)$$

де p_i, p_j – відповідно, ймовірність відправлення і прибуття пасажирів з ТР i та у ТР j ; Q – загальна кількість пересувань пасажирів за розрахунковий період (сума по МК), пас.

Для формування можливих станів МПК автором розроблено імітаційну модель, що дозволило досягти суттєвого скорочення меж діапазону розрахункових МК в рамках інтервального підходу до моделювання потреб у пересуваннях. Результати моделювання системи ГТ м. Харкова з використанням VISUM свідчать, що сформована МПК за методикою [5], характеризується достатньо високим рівнем точності – середня помилка моделювання пасажиропотоків на мережі склала майже 8%. Недоліком у розробленій методиці, в свою чергу, є достатньо велика кількість нульових кореспонденцій у згенерованих матрицях, для ліквідації якого необхідно враховувати додаткове обмеження щодо забезпечення відповідності між змодельованими МПК і фактичною МК за кількісною ознакою.

У цьому ж напрямку також слід відзначити роботу [6], в рамках якої авторам також вдалося суттєво звужити діапазон можливих станів МПК у рамках інтервальної концепції, за рахунок використання функції розселення населення міською територією при розрахунку кореспонденцій. Такий результат досягнуто за рахунок використання лише тих станів МК, що відповідають фактичним закономірностям трудового розселення населення.

До того ж слід відзначити ефективність використання інтервального підходу до моделювання потреб населення у пересуваннях у розрізі вирішення завдання щодо визначення місця розташування міжміської автостанції та встановлення її впливу на розподіл міських пасажиропотоків [3].

Представлені у [2, 4-6] методики формування МПК для різних категорій міст дозволили досягти суттєвого звуження діапазону можливих станів попиту на пересування пасажирів і покращити розуміння положень і припущень інтервальної концепції моделювання потреб у пересуваннях, а також отримали широке практичне застосування при виконанні реальних науково-дослідницьких робіт і проєктів, спрямованих на оптимізацію роботи систем ГТ в українських містах [35-41].

З розвитком технологій у науковій літературі почали з'являтися нові підходи до вирішення задачі формування МПК. Наприклад, авторами [42] для моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів використано елементи теорії нечіткої логіки. Значення кореспонденцій за цим підходом визначаються наступним чином

$$h_{ij} = \frac{2^{\frac{1}{\ln 2} C_{hij}}}{n_i \cdot n_j \sum_{r=1+m_b(i)}^{m_e(i)} \sum_{s=1+m_b(j)}^{m_e(j)} 2^{\frac{1}{\ln 2} C_{hrs}}} \cdot t_{ij}, \quad (29)$$

де n_i, n_j – відповідно, кількість «вищих» (укрупнених) і звичайних ТР;

t_{ij} – тривалість пересування між ТР; C_{hij}, C_{hrs} – компоненти, що встановлюються з використанням теорії нечіткої логіки на основі транспортного параметру – відстані від зупиночних пунктів мережі до потенційних пунктів тяжіння.

Іншим прикладом використання елементів нечіткої логіки і генетичних алгоритмів є робота [43], де розглядається задача визначення кореспонденцій з подальшим їх розподілом для сукупності промислових міст і територій відпочинку (туристичні місця) авіаційним транспортом. За результатами тестових прогонів розробленої моделі отримано достатньо точну оцінку розрахункових значень пасажиропотоків при їх порівнянні з реальними даними.

Моделі розрахунку та розподілу кореспонденцій, сформованих на основі нечіткої логіки та генетичних алгоритмів, що представлені як у [43], так і в інших роботах [44-50], розроблені та апробовані не на прикладі міської МПК при пересуваннях пасажирів ГТ. У більшості випадків, за об'єкт дослідження обрано авіа сполучення між містами або містами і туристичними зонами, або розглядається окрема система ГТ, наприклад, швидкісне залізничне сполучення.

Слід зауважити, що моделі розрахунку загальноміської МПК на основі теорії нечіткої логіки та генетичних алгоритмів не отримали належного розвитку на практиці. Основною проблемою цього слід вважати відсутність якісної вхідної інформації – базової (фактичної) МК, на основі якої існувала б можливість якісного «навчання» цих моделей, а також суб'єктивність при виборі параметрів функцій належності [9, 31, 49, 51].

Також з розвитком техніки і технологій, а також цифровізації галузі міського пасажирського транспорту, з'явилися підходи до створення МПК на основі аналізу та агрегування даних операторів стільникового зв'язку [51]; інформації з петлевих детекторів, GPS і ANPR-камер [52]; інформації з різноманітних платіжних систем [53] тощо. Слід відзначити, що на даний час, на жаль, використання подібної інформації для створення МПК на прикладі українських міст і України в цілому, є обмеженим. Причинами цього є, по-перше, провадження військового стану в країні; по-друге, відсутність загальноприйнятого підходу на рівні міських територіальних громад щодо автоматизованого збору і аналізу даних про пересування населення ГТ; по-третє, більшість міст не мають відповідного бюджету на реалізацію проєктів з впровадження електронних систем оплати проїзду в ГТ і аналізу пасажиропотоків; по-четверте, відсутність ініціативи у пасажирських перевізників (в першу чергу приватних) щодо облаштування транспортних засобів необхідною для збору інформації технікою про перевезених пасажирів, через небажання виведення з тіні даних про реальні обсяги перевезення; та інші.

Недоліки підходів до формування МПК свідчать про те, що навіть найбільш розповсюджені методи розрахунку МК (гравітаційний, ентропійний метод) не гарантують необхідної точності результатів моделювання попиту на перевезення пасажирів у містах і є лише джерелом отримання якогось проміжного стану попиту, який зафіксовано в результаті обстеження пасажиропотоків на маршрутній мережі [1]. Отримані в такий складний спосіб МПК використовуються фахівцями з транспортного моделювання лише для отримання первинних якісних оцінок функціонування системи ГТ, а їх застосування для прогнозування розвитку систем ГТ практично неможливо через необхідність суттєвого оновлення вхідних даних про місткості ТР. Це підтверджує той факт, що задача моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ є складним до кінця не вирішеним питанням як з практичної, так й наукової точки зору, вирішення якого потребує подальшого розвитку методів формування МПК з урахуванням сучасних тенденцій розвитку галузі транспортного планування.

Окремої уваги в рамках проведеного аналізу заслуговує інтервальна концепція моделювання потреб населення у пересуваннях, яка ґрунтується на випадковому виборі пасажирів джерел і напрямків поїздок [8]. Хоча й реалізація концепції гарантує достовірність результатів розрахунків [2, 4-6, 8, 34], проте вона не містить механізму створення проміжних станів попиту в межах можливого інтервалу, які можуть характеризуватися дуже значним розкидом, і що ускладнює практичне використання інтервальної концепції.

Складність формування МПК, з точки зору, реалізації інтервальної концепції моделювання потреб населення в пересуваннях ГТ полягає у необхідності розробки множини альтернативних варіантів МК, які б характеризували можливі стани транспортного попиту в рамках обмежень на мінімальну і максимальну транспортну роботу по реалізації МК [3, 8]. Використання найбільш розповсюджених на даний час методів формування МПК не гарантує отримання й частини можливого переліку станів МПК для реалізації інтервальної концепції [1].

Результати дослідження [54] щодо створення методу випадкової генерації кореспонденцій в матриці можна вважати однією із перших спроб ліквідації недоліку інтервальної концепції стосовно заповнення діапазону можливих станів МК. Але представлений у цій роботі метод за умов накладання додаткових обмежень далеко не завжди гарантує успіху при моделюванні МК. У даний час авторами даної роботи проводяться дослідження щодо удосконалення методу [54].

Висновки. Кожний з проаналізованих груп методів формування моделей попиту на пересування пасажирів властиві свої недоліки, які, по-перше, пов'язані з трудомісткістю отримання та обробки вхідної інформації про пасажиропотоки на мережі маршрутів ГТ, по-друге, з точністю відображення моделі потреб у пересуваннях пасажирів і, по-третє, переважна більшість методів дозволяють отримати лише один стан МПК, що відповідатиме конкретним даним, які характеризують відповідний часовий проміжок, і створений за умов використання обмеженого переліку транспортних факторів, найчастіше відстань або час пересування між ТР. Ці недоліки суттєво впливають на якість результатів транспортного моделювання через обмеженість розрахункових МПК, яка пов'язана із неповним врахуванням випадкового характеру здійснення і вибору напрямів поїздок користувачами ГТ та неможливістю описати повний діапазон можливих станів МПК.

Ліквідувати представлені недоліки можна за рахунок реалізації інтервальної концепції моделювання попиту на пересування пасажирів, що передбачатиме розробку множини МПК, які відповідатимуть відомим груповим характеристикам процесу перевезення пасажирів. Наявність різних варіантів МПК створює можливість отримання надійної оцінки наслідків розгляду альтернативних напрямків розвитку транспортних систем міст для фахівців з транспортного планування.

Моделювання множини різних варіантів МК в рамках реалізації інтервальної концепції доцільно проводити з використанням імітаційних моделей. За основу можна прийняти поетапний метод генерації МПК [54], який потребує удосконалення за рахунок урахування групових обмежень при формуванні МПК.

Список літератури

1. Любий Є.В., Ковцур К.Г., Цинь Сяосюань. Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2(23) (2024). С. 152-158. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>.
2. Гончаренко С.Ю. Визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в середніх містах : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2015. 182 с.
3. Пашкевич С.М. Дослідження впливу розташування міжміської автостанції на розподіл міських пасажиропотоків: дис. ... доктора філософії: 275. Харків, 2024. 222 с.
4. Любий Є.В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 22 с.
5. Россолов О.В. Удосконалення інтервальної концепції визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в великих містах : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 21 с.
6. Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Інтервальне моделювання потреб населення міст у перевезеннях громадським транспортом на основі функції розселення : монографія. Харків: ХНАДУ, 2016. 148 с.
7. Акбар Джан Полад. Закономірності функціонування системи міського пасажирського транспорту міста Кабул : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2017. 189 с.
8. Горбачов П.Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.01. Харків, 2009. 370 с.

9. Білоус А.Б., Демчук І.А. Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(3(69)) (2014). С. 53–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>.
10. Dragu. V., Roman. Eu. A. The Origin–Destination Matrix Development. MATEC Web of Conferences. 9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”. 2019. 290. 06010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929006010>
11. Любий Є.В., Колій О.С. Оцінка точності синтетичних моделей розрахунку пасажирських кореспонденцій на прикладі малих міст. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. 1(12) (2019). С. 99–106. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>
12. Любий Є.В., Россолов О.В. Формування моделі попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом. *Комунальне господарство міст*. 2013. № 107. С. 422–426.
13. Ortuzar J. de D., Willumsen L.G. Modelling transport. Third edition. John Wiley & Sons Ltd., 2006. 499 p.
14. Fratar T.J. Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation. *Traffic Quarterly*. 1954. №8. P. 53–65.
15. Carrothers G.A.P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*. 1956. № 22. P. 94–102.
16. Voorhees A.M. A general theory of traffic movement. Institute of Traffic Engineers Past Presidents’ Award Paper. New Haven : ITE, 1955. P. 46–56.
17. Wilson A.G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*. 1967. № 1. P. 253–270.
18. Wilson A.G. A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1971. № 3. P. 255–282.
19. Vries J.J., Nijkamp P., Rietveld P. Alonso’s General Theory of Movement: Advances in Spatial Interaction Modeling. Free University of Amsterdam, Department of Spatial Economics, Tinbergen Institute Discussion Paper. 2000. TI 2000-062/3.
20. Haynes E.K., Fotheringham A.S. Gravity and Spatial Interaction models. Sage-Publications. 1984. P. 9–13.
21. Transport Planning and Traffic Engineering / [M.G.H. Bell, P.W. Bonsall, G.R. Leake, A.D. May, C.A. Nash, C.A. O’Flaherty] ; C.A. O’Flaherty Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 544 p
22. Вдовиченко В.О. Ефективність функціонування міської пасажирської транспортної системи : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Київ, 2004. 19 с.
23. Кузькін О.Ф. Моделювання пасажирських кореспонденцій у системах міського маршрутного транспорту загального користування. *Вісник ВПІ*. 2009. 5. С. 79–82.
24. Горбачов П.Ф. Оцінка впливу транспортних факторів на результати вибору людиною робочого місяця. *Вісник ХНАДУ*. 2008. 43. С. 86–91.
25. Lohse, D., Teichert, H., Dugge, B., Bachner, G. Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, H. 5/1997, Fakultät Verkehrswissenschaften, “Friedrich List”, Technische Universität Dresden, 1997. Available: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/tvp/Downloads/Heft-5.pdf (дата звернення 01.03.2025).
26. Wilson A.G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion, 1970. 166 p.
27. Quarmby D.A. Choice of Travel Mode for the Journey to Work. *Journal of Transport Economics and Policy*. 1967. 1(3). P. 273–314.
28. Горбачов П.Ф., Свічинська О.В. Моделювання вибору шляху пересування пасажирів у міських системах громадського транспорту: монографія. Харків, 2016. 124 с.
29. Preston J. Demand Forecasting for New Local Rail Stations and Services. *Journal of Transport Economics and Policy*. 1991. 25(2). P. 183–202.
30. PTV Visum 2024. Офіційний сайт компанії «PTV Planung Transport Verkehr GmbH». URL: https://vision-startpage.ptvgroup.com/fileadmin/Startpage/Visum/Overview_Visum2024.pdf (дата звернення 02.03.2025).
31. Півторак Г.В. Визначення параметрів мережі міських пасажирських перевезень на основі моделей теорії корисності з випадковим вибором : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Львів, 2021. 202 с.
32. Sustainable Approaches to Urban Transport. Ed. D. Mohan, G. Tiwari. Boca Raton: CRC Press, 2019. 329 p.
33. Manheim, M.L. Fundamentals of Transportation Systems Analysis. Cambridge: MIT Press, 1979. 674 p.
34. Горбачов П.Ф. Нова концепція моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2009. 27. С. 210–214.
35. Аналіз діючої транспортної мережі м. Конотоп. Проведення обстеження пасажиропотоків. Обробка матеріалів обстеження пасажиропотоків по маршрутах. Розробка заходів щодо оптимізації транспортної мережі м. Конотоп: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0121U112782. Харків, 2021. 124 с.
36. Проведення аналізу та оптимізації транспортних систем міста Краматорськ: звіт про НДР (кінцевий). ХНАДУ, № державної реєстрації 0116U006995. Харків, 2016. 220 с.
37. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.
38. Розробка схеми руху громадського транспорту в місті Суми: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0108U006961. Харків, 2008. 51 с.

39. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі міста Кіровоград: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0112U00692. Харків, 2012. 115 с.
40. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі м. Олександрія : звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0113U005179. Харків, 2013. 130 с.
41. Моделювання та аналіз маршрутної мережі громадського транспорту міста Нікополя: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0115U004775. Харків, 2015. 197 с.
42. Berbey, A.A., Caballero, G.R., de Dios, S.B., Galán, L.R. A fuzzy logic inference approach for the estimation of the passengers flow demand. *International Conference on Fuzzy Computation and 2nd International Conference on Neural Computation*. 2010. P. 125–129.
43. Kalis, M., Teodorovic, D. Trip distribution modeling using fuzzy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*. 2003. 26(3). P. 213–238.
44. Kalić M., Kuljanin J. and Dožić S. Air Travel Demand Fuzzy Modelling. Trip Generation and Trip Distribution. *Conference on Soft Computing in Industria Applications Anywhere on Earth*. 2012. P. 10–21.
45. Jassbi J., Makvandi P., Ataei M., Sousa Pedro A.S. Soft system modeling in transportation planning: Modeling trip flows based on the fuzzy inference system approach. *African Journal of Business Management*. 2011. 5(2). P. 505–514.
46. Medina J., Yepes V. Optimization of touristic distribution networks using genetic algorithms. *Statistics and Operations Research Transactions*. 2003. 27(1). P. 95–112.
47. Goel S., Singh J., Ashok K. Trip Distribution Model for Delhy Urban Area Using Genetic Algorithm. *International Journal of Computer Engineering Science*. 2012. 2(3). P. 125–131.
48. Kompil M., Celik H. Modelling trip distribution with fuzzy and genetic fuzzy systems. *Transportation Planning and Technology*. 2013. 36(2). P. 170–200.
49. Форнальчик С.Ю., Білоус А.Б., Демчук І.А. Застосування нечіткої логіки та генетичних алгоритмів у моделях пасажирських пересувань. *Автомобільний транспорт*. 2014. 35. С. 122-127.
50. Пархоменко Л.О., Лавренюк В.О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі принципів просторової взаємодії. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. 164. С. 15-22.
51. Кара І.А. Визначення пасажиропотоків на міських маршрутах з використанням нечіткої логіки та транзакцій абонементів стільникового зв'язку : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Львів, 2017. 208 с.
52. Sbaï, A., Van Zuylen, H. J., Li, J., Zheng, F. F., & Ghadi, F. Estimation of an urban OD matrix using different information sources. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017 - 17th International Conference, 2017* (Vol. 10405, pp. 183-198). (Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Vol. 10405). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62395-5_14.
53. Fan, W., Chen, Zh. Estimation of origin-destination matrix and identification of user activities using public transit smart card data (Final Report). Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education. University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC. 2018. 92 p.
54. Івахнік В.С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник ВПІ*. 2022. 6 (2022). С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.

References

1. Liubiyi, Ye., Kovtsur, K., & Qin, X. (2024). Formulation of the problem of random completion of the OD-matrix. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2(23) (2024), 152-158. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>
2. Honcharenko, S.Yu. (2015). *The demand determining for passenger route transport service in the middle cities*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
3. Pashkevych, S.M. (2024). *Research of the influence of an intercity bus station location on the distribution of urban passenger flows*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
4. Liubiyi, Ye.V. (2012). *Trip demand determination of small towns' population for route passenger transportation*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
5. Rossolov O.V. (2012). *Improvement of the interval concept for determining the demand for passenger route transport services in large cities*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
6. Horbachov, P.F., & Svichynskyi, S.V. (2016). *Interval modeling of urban population needs for public transportation based on the settlement function*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
7. Akbar Jan Polad. (2017). *Regularities of the functioning for the system of Kabul city urban passenger transport*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
8. Horbachov, P.F. (2009). *The concept of forming passenger transport systems in cities*. Doctor's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
9. Bilous, A.B., & Demchuk, I.A. (2014). Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3(69) (2014), 53–57. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>
10. Dragu, V., & Roman, Eu.A. (2019). The Origin–Destination Matrix Development. MATEC Web of Conferences. *9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”*. 290 (2019). 06010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929006010>

11. Liubiyi, Ye.V., & Kolii, O.S. (2019). Estimation of accuracy of synthetic models of calculation of passenger correspondence on an example of small towns. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1(12) (2019), 99-106. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>
12. Liubiyi, Ye.V., & Rossolov, O.V. (2013). Formation of a model of demand for the movement of the population of small towns by passenger transport. *Municipal economy of cities*, 107, 422-426. [in Ukrainian].
13. Ortuzar, J. de D., & Willumsen, L.G. *Modelling transport*. Third edition. John Wiley & Sons Ltd.
14. Fratar, T.J. (1954.) Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation. *Traffic Quarterly*, 8, 53-65.
15. Carrothers, G.A.P. (1956). An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, 22, 94-102.
16. Voorhees, A.M. (1955). *A general theory of traffic movement*. Institute of Traffic Engineers Past Presidents' Award Paper. New Haven : ITE.
17. Wilson, A.G. (1967). A statistical theory of spatial distribution models. *Transpro Research*, 1, 253-270.
18. Wilson, A.G. (1971). A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 3, 255-282.
19. Vries, J.J., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (2000). *Alonso's General Theory of Movement: Advances in Spatial Interaction Modeling*. Free University of Amsterdam, Department of Spatial Economics, Tinbergen Institute Discussion Paper. TI 2000-062/3.
20. Haynes, E.K., & Fotheringham, A.S. (1984). Gravity and Spatial Interaction models. Sage-Publications.
21. Bell, M.G.H., Bonsall, P.W., & Leake, G.R., et al. (1997). *Transport Planning and Traffic Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
22. Vdovychenko, V.O. (2004). *Efficiency of the urban passenger transportation system*. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv: NTU [in Ukrainian].
23. Kuzkin, O.F. (2009). Modeling of passenger correspondence in public transport systems of urban route transport. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 5, 79-82.
24. Horbachov, P.F. (2008). Evaluation of the impact of transport factors on the results of a person's choice of a job. *Bulletin of KhNAHU*, 43, 86-91.
25. Lohse, D., Teicher, H., Dugge, B., & Bachner, G. (1997). *Determination of traffic flows with n-linear equation systems under consideration of constraints including parameter estimation (traffic demand modeling: generation, distribution, splitting)*. Publication series of the Institute of Transport Planning and Road Traffic, H. 5/1997, Faculty of Transport Sciences, "Friedrich List", Dresden University of Technology. http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/ivp/Downloads/Heft-5.pdf [in German]
26. Wilson, A.G. (1970). *Entropy in Urban and Regional Modelling*. London: Pion.
27. Quarmby, D.A. (1967). Choice of Travel Mode for the Journey to Work. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1(3), 273-314.
28. Horbachov, P.F., & Svichynska, O.V. (2016). *Modeling the choice of passengers' travel routes in urban public transportation systems*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
29. Preston, J. (1991). Demand Forecasting for New Local Rail Stations and Services. *Journal of Transport Economics and Policy*, 25(2), 183-202.
30. PTV Visum 2024. Official company website «PTV Planung Transport Verkehr GmbH». URL: https://vision-startpage.ptvgroup.com/fileadmin/Startpage/Visum/Overview_Visum2024.pdf
31. Pivtorak G.V. *Determination of parameters of urban passenger transportation network based on models of random utility theory*. PhD thesis. Lviv: LPNU [in Ukrainian].
32. Mohan, D., & Tiwari, G. (2019). *Sustainable Approaches to Urban Transport*. Boca Raton: CRC Press.
33. Manheim, M.L. (1979). *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. Cambridge: MIT Press.
34. Horbachov, P.F. (2009). A new concept of modeling the needs of the population in labor transportation by urban passenger transport. *Bulletin of Dnipropetrovs'k National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan*, 27, 210-214.
35. R&D report 0121U112782. (2021). *Analysis of the existing transport network of Konotop. Conducting a passenger flow survey. Processing of passenger flow survey materials by routes. Development of measures to optimize the transport network of Konotop city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
36. R&D report 0116U006995. (2016). *Analysis and optimization of transport systems in Kramatorsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
37. R&D report 0117U006848. (2018). *Development of a comprehensive traffic scheme for the Lutsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
38. R&D report 0108U006961. (2008). *Development of a public transport scheme in Sumy city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
39. R&D report 0112U00692. (2012). *Development of a rational variant of the route network in Kirovograd city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
40. R&D report 0113U005179. (2013). *Development of a rational variant of the route network in Oleksandriia city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
41. R&D report 0115U004775. (2015). *Modeling and analysis of the public transport route network in Nikopol city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

42. Berbey, A.A., Caballero, G.R., de Dios, S.B., & Galán, L.R. (2010). A fuzzy logic inference approach for the estimation of the passengers flow demand. *International Conference on Fuzzy Computation and 2nd International Conference on Neural Computation*, 125–129.
43. Kalis, M., & Teodorovic, D. (2003). Trip distribution modeling using fuzzy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*, 26(3), 213–238.
44. Kalić, M., Kuljanin, J. & Dožić, S. (2012). Air Travel Demand Fuzzy Modelling. Trip Generation and Trip Distribution. *Conference on Soft Computing in Industria Applications Anywhere on Earth*, 10–21.
45. Jassbi, J., Makvandi, P., Ataei, M., & Sousa Pedro, A.S. (2011). Soft system modeling in transportation planning: Modeling trip flows based on the fuzzy inference system approach. *African Journal of Business Management*, 5(2), 505–514.
46. Medina, J., & Yepes, V. (2003). Optimization of touristic distribution networks using genetic algorithms. *Statistics and Operations Research Transactions*, 27(1), 95–112.
47. Goel, S., Singh, J., & Ashok, K. (2012). Trip Distribution Model for Delhi Urban Area Using Genetic Algorithm. *International Journal of Computer Engineering Science*, 2(3), 125–131.
48. Kompil, M., & Celik, H. (2013). Modelling trip distribution with fuzzy and genetic fuzzy systems. *Transportation Planning and Technology*, 36(2), 170–200.
49. Fornalchuk, Ye.Yu., Bilous, A.B., & Demchuk, I.A. (2014). Application of fuzzy logic and genetic algorithms in passenger travel models. *Automobile transport*, 35, 122–127.
50. Parkhomenko, L.O., & Lavreniuk, V.O. (2016). Development of a fuzzy model for predicting passengers' correspondences in high-speed traffic based on the principles of spatial interaction. *Collection of scientific works of UkrSUTR*, 164, 15–22.
51. Kara, I.A. (2017). *Determination of passenger traffic on city routes using fuzzy logic and transactions of subscribers of cellular communication*. PhD thesis. Lviv: LPNU [in Ukrainian].
52. Sbaï, A., Van Zuylen, H.J., Li, J., Zheng, F.F., & Ghadi, F. (2017). Estimation of an urban OD matrix using different information sources. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017 - 17th International Conference, 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10405. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62395-5_14
53. Fan, W., & Chen, Zh. (2018). *Estimation of origin-destination matrix and identification of user activities using public transit smart card data* (Final Report). Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education. University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC.
54. Івахнік, В.С. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modeling. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6 (2022), 57–64. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>

Xiaoxuan Qin, Yevhen Liubiyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Analysis of Existing Methods of Forming Models of Passenger Travel Needs

The aim of the article is to conduct an analytical review of existing methods of forming models of demand for passenger transportation by public transport. The results of the review of modern practices of creating passenger correspondence matrices are aimed at improving the existing methods of forming transport demand models and developing new ones, the use of which will make it possible to obtain an accurate and reliable assessment of the results of forecasting the development of urban transport systems.

The main focus of the article is on the analysis of existing approaches to the formation of urban passenger correspondence matrices as the key input information on which the overall assessment of the results of the implementation of measures to improve passenger route networks and the development of urban areas in general is based, as well as the most problematic stage of the transport demand modeling process. The two fundamentally different approaches to modeling transport demand for passenger movement - conducting field surveys and using synthetic (a priori) models for calculating correspondences - have inherent disadvantages that significantly limit their use, but their combination (for example, a selective tabular survey of passenger flows and the gravity method) helps to obtain a variant of the correspondence matrix that characterizes one of the possible states of transport demand in the relevant time period. But, ultimately, the models of passenger travel needs obtained in this way do not guarantee the accuracy of the results of calculating the correspondence matrices.

The advantages of the interval approach to modeling passenger correspondence matrices make it a reliable tool for assessing alternative directions for the development of transport and route systems of cities, taking into account the creation of a set of variants of correspondence matrices that would meet the existing restrictions in the calculation of matrix elements. To form different variants of passenger correspondence matrices, it is advisable to use simulation models of correspondence generation.

interval concept, correspondence matrix, passenger transportation, transport demand

Одержано (Received) 25.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025