

## НОВА КОНЦЕПЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТРЕБ НАСЕЛЕННЯ У ТРУДОВИХ ПЕРЕСУВАННЯХ МІСЬКИМ ПАСАЖИРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

В роботі з метою врахування випадкового характеру розподілу місткостей транспортних районів з трудових пересувань в матриці кореспонденцій запропоновано інтервальну концепцію моделювання потреб населення у пересуваннях, за якої для транспортних розрахунків використовується не один варіант матриці, а границі інтервалу її можливих значень при заданих місткостях районів.

В работе с целью учета случайного характера распределения емкостей транспортных районов по трудовым передвижениям в матрице корреспонденций предложена интервальная концепция моделирования потребностей населения в передвижениях, при которой для транспортных расчетов используется не один вариант матрицы, а границы интервала ее возможных значений при заданных емкостях районов.

In the paper, with the purpose of accounting a casual character of distribution of capacities of transport areas on labor movements in a matrix of correspondences, the interval concept of modeling the population needs in movements has been suggested when for transport calculations one uses not one variant of a matrix but borders of an interval of its possible values at the set area capacities.

### Вступ

Основної задачею організації роботи систем маршрутного пасажирського транспорту в містах вважається визначення трас та провізних можливостей маршрутів, виду та типу рухомого складу на них. Ця задача носить назву маршрутизації, вона проводиться за рішенням замовника регулярних перевезень, її результати відображаються в реєстрі маршрутів.

Вирішення задачі маршрутизації з високою ефективністю неможливо без використання сучасних методів моделювання процесу перевезення пасажирів маршрутним транспортом, оскільки вже на самому простому рівні малих міст ця задача має таку кількість варіантів вирішення, яка не може бути охоплена людиною-експертом.

Загальними рисами більшості сучасних методик транспортного моделювання є структура моделі, яка включає в себе модель потреб населення у пересуваннях. Вона відповідає за створення адекватної матриці пасажирських кореспонденцій (МПК) та вносить основну частку невизначеності в транспортний розрахунок.

### Аналіз публікацій

Можна виділити два підходи до формування матриці пасажирських кореспонденцій міста. Перший припускає проведення натурних обстежень пересувань [9] і дозволяє одержати максимально достовірну інформацію. Основними недоліками цього підходу є його висока трудомісткість та обмеженість сегменту, для

якого виходить інформація, частіше всього це дані про потреби населення в трудових пересуваннях. Його поширене застосування на території колишнього Радянського Союзу пояснюється наявністю адміністративного ресурсу, характерного для планової економіки. При сьогоденнішніх можливостях, наданих законами органам державного управління, проведення таких обстежень малоімовірно.

В іншому підході для одержання (синтезу) матриці кореспонденцій використовуються різноманітні синтетичні моделі, засновані на припущеннях про аналогію транспортної системи міста з фізичними системами [2]. Такий підхід вимагає значно менших затрат праці для формування матриці кореспонденцій, однак не дозволяє одержати достатньо точних результатів. Різниця між теоретичними і реальними значеннями при прогнозуванні обсягу кореспонденцій може сягати 200 % [3]. Тут слід також відзначити відсутність обґрунтованих оцінних показників розбіжностей в МПК. Порівняння окремих значень для оцінки всієї матриці явно недостатньо, адже навіть помилка в 500 % може бути незначною, якщо стосується малих значень у сусідніх елементах матриці.

Автор роботи [4] для розрахунків трудових кореспонденцій формулює умову контрольних сум, за якої потік транспорту, як вхідна величина, повинен сприйматися і, відповідно, виконуватись при розподілі та поділі кореспонденцій як «жорсткий» або «фіксований». Сама матриця кореспонденцій встановлюється як лінійна трансформація матриці оцінки витрат на

пересування. Загальними рисами існуючих підходів до моделювання МПК є використання транспортних витрат в якості основного фактору вибору робочого місця. Однак в [4] доведений незначний вплив трудності пересування на вибір робочого місця, що означає неможливість використання транспортних витрат в якості основного фактору при формуванні МПК та необхідного розгляду процедури формування МПК як випадкового процесу, обумовленого впливом багатьох невизначених факторів.

### Мета й постановка задачі

Метою роботи є розробка концепції з підвищення достовірності результатів моделювання потреб населення міст у трудових пересуваннях.

Об'єктом дослідження є моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом, а предметом – методика врахування випадкового характеру процесу формування МПК.

Матриця пасажирських кореспонденцій має наступний вигляд

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1e} & \dots & h_{1N_{TP}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{d1} & \dots & h_{de} & \dots & h_{dN_{TP}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_{TP}1} & \dots & h_{N_{TP}e} & \dots & h_{N_{TP}N_{TP}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HO_1 \\ \dots \\ HO_d \\ \dots \\ HO_{N_{TP}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} HP_1 & \dots & HP_e & \dots & HP_{N_{TP}} \end{bmatrix}$$

де  $H$  – матриця кореспонденцій за розглянутий період часу;  $h_{de}$  – величина кореспонденції (кількість пересувань) між районами відправлення  $d$  та прибуття  $e$ ;  $N_{TP}$  – кількість транспортних районів у транспортній моделі міста, од.;  $HO_d$  – місткість транспортного району  $d$  з відправлення за розглянутий період часу,

$HO_d = \sum_{e=1}^{N_{TP}} h_{de}$ ;  $HO_d$  – місткість транспортного району  $e$  з прибуття за розглянутий період часу,

$HO_d = \sum_{e=1}^{N_{TP}} h_{de}$ .

Обмеженнями при формуванні МПК виступають звісні та стали місткості транспортних районів (ТР):

$$HO_d = \text{const} = \Psi_d, \quad d \in [1, N_{TP}];$$

$$HP_e = \text{const} = \Omega_e, \quad e \in [1, N_{TP}]. \quad (2)$$

### Формування концепції моделювання МПК

Кількість варіантів МПК при виконанні (2) може приймати різні значення залежно від конкретних значень місткостей. В роботі розглядається найбільш імовірний в реальних умовах випадок, коли вона перевищує  $10^3$  од. При цьому отримання варіанту МПК, який цілком відповідає реальному розподілу кореспонденцій, є настільки малоімовірною подією, що її слід вважати практично неможливою.

Слід також враховувати, що перевірити розрахунковий варіант матриці на достовірність практично неможливо з-за відсутності фактичної МПК, а така ситуація складується завжди, інакше немає сенсу в розрахунку кореспонденцій. При прийнятті рішень відносно варіантів розвитку ММ міста в таких умовах слід використовувати не один варіант МПК, а границі інтервалу можливих значень матриці при заданих місткостях ТР. Ця концепція дозволяє отримати достовірні інтервальні оцінки показників функціонування МПТ, які використовуються в якості критеріїв ефективності ММ.

В рамках такої концепції границі інтервалу можливих значень МПК мають визначатися її екстремальними варіантами, які мінімізують та максимізують деякий показник, що характеризує стан матриці, при заданих місткостях ТР.

Для практичної реалізації концепції спочатку необхідно визначити основну характеристику станів МПК, яка найбільш суттєво впливає на показники якості функціонування МПТ та дозволяє оцінювати розбіжності між різними варіантами матриці.

Пошук такого показника слід засновувати на функціональному призначенні моделі потреб населення у пересуваннях. Це означає, що ступінь суттєвості розбіжностей між різними варіантами МПК необхідно оцінювати впливом відхилень у значеннях матриці на критерій ефективності маршрутної системи.

В якості основного варіанта критерію ефективності маршрутної системи при оцінці точності МПК приймається загальний час пересування. З одного боку, він є найбільш поширеним варіантом критерію при вирішенні задачі маршрутизації з позицій потенційних замовників. З іншого боку, час пересування дозволяє повністю врахувати територіальний фактор при оцінці точності моделі потреб населення у пересуваннях, якщо в якості основної характеристики трудності пересування також використовувати його загальний час, враховуючи всі елементи витрат часу пасажирями на пересування.

З метою підвищення достовірності результатів дослідження цей критерій доповнюється

двома додатковими інтегральними показниками якості обслуговування пасажирів: середнім часом поїздки в транспортному засобі та коефіцієнтом пересадочності.

Побудова методики оцінки розбіжностей варіантів моделі потреб населення у пересуваннях засновується на дослідженні одного варіанта МПК – матриці трудових пересувань м. Суми, отриманої розрахунковим методом за допомогою натурних обстежень пасажиропотоків на ключових ділянках ВДМ міста. Ця матриця описує модель потреб населення 30-ти ТР міста. При таких розмірах повною мірою проявляються особливості цього об'єкту, що забезпечує загальний характер висновків експериментальних досліджень.

Експериментальна оцінка розбіжностей виконується для існуючого варіанта ММ міста, змодельованого кафедрою транспортних технологій ХНАДУ при виконанні роботи «Розробка схеми руху громадського транспорту в місті Суми».

В якості факторів експерименту, тобто потенційних оцінних показників розбіжностей МПК, прийнято різницю в мінімальній транспортній роботі по реалізації матриць  $\Delta W$  та відносне відхилення значень кореспонденцій в матрицях  $\Delta H$ :

$$\Delta W = \sum_{d=1}^{N_{TP}} \sum_{e=1}^{N_{TP}} h_{de} \cdot L_{de} - \sum_{d=1}^{N_{TP}} \sum_{e=1}^{N_{TP}} h'_{de} \cdot L_{de}, \quad (3)$$

де  $h_{de}$  – величина кореспонденції між районами  $d$  та  $e$  у вихідній (базовій) матриці, пас.;  $h'_{de}$  – величина кореспонденції між районами  $d$  та  $e$ , в експериментальній (новій) матриці, пас.;  $L_{de}$  – мінімальна відстань між районами  $d$  та  $e$ , км.

З урахуванням умови сталості місткостей ТР (2) сумарна зміна значення кореспонденцій завжди буде дорівнювати 0, тому для оцінки відносного відхилення значень кореспонденцій в матрицях  $\Delta H$  необхідно використовувати інший показник. За аналогією із середньоквадратичним відхиленням, різниця кореспонденцій розраховується наступним чином:

$$\Delta H = \sqrt{\sum_{d=1}^{N_{TP}} \sum_{e=1}^{N_{TP}} (h_{de} - h'_{de})^2}. \quad (4)$$

Сам експеримент проводиться у два етапи. На першому, пошуковому етапі в кожному експерименті змінюється значення однієї кореспонденції та оцінюються результати такої зміни. Зміна значення кожної кореспонденції приводить до необхідності відповідних змін інших

кореспонденцій з метою збереження значень місткостей ТР по відправленню та прибуттю. За аналогією з транспортною задачею такі зміни називаються циклами. В пошуковому експерименті приймаються мінімальні, квадратні цикли, за яких в експериментальній (новій) матриці змінюються значення чотирьох кореспонденцій. У двох з них, в тому числі джерела зміни матриці та кореспонденції, яка є діагональною відносно нього, значення кореспонденції зменшуються на величину  $\Delta h$ . Два інших елемента квадратного циклу збільшуються на величину  $\Delta h$ .

Для проведення пошукового експерименту були прийняті екстремальні умови, за яких величина зміни кореспонденцій  $\Delta h$  має максимально можливу величину з врахуванням невід'ємності значень кореспонденцій:

$$h_{de} \geq 0; \quad \forall d, e [1, N_{TP}]. \quad (5)$$

Тоді

$$\Delta h = \min(h_{de}, h_{fg}), \quad (6)$$

де  $\Delta h$  – величина зміни кореспонденцій, пас.;  $h_{de}$  – величина кореспонденції між районами  $d$  та  $e$  – джерело змін у вихідній (базовій) матриці, пас.;  $h_{fg}$  – величина кореспонденції між районами  $g$  та  $f$  – елементу, діагонального відносно джерела змін  $h_{de}$ .

За прийнятих в пошуковому експерименті умов зміни МПК по квадратному циклу залежність для визначення відносного відхилення значень кореспонденцій в матрицях (4) може бути перетворена у подвоєну величину зміни кореспонденції  $\Delta h$ :

$$\Delta H = \sqrt{4 \cdot (h_{de} - h'_{de})^2} = \sqrt{4 \cdot \Delta h^2} = 2 \cdot \Delta h. \quad (7)$$

Тому для аналізу результатів пошукового експерименту в подальшому використовується величина лінійної зміни кореспонденцій  $\Delta h$ .

Величина різниці в мінімальній транспортній роботі по реалізації матриць  $\Delta W$  має абсолютний характер та складно сприймається, тому вона також замінюється на більш простий та зрозумілий показник – зміну середньої дальності пересування

$$\Delta l = \frac{\Delta W}{\sum_{d=1}^{N_{TP}} \sum_{e=1}^{N_{TP}} h_{de}}, \quad (8)$$

де  $\Delta l$  – величина зміни середньої дальності пересування, км.

Після визначення умов проведення експерименту необхідно сформулювати його план. В даному випадку кожний дослід експерименту обумовлюється номерами двох кореспонденцій: джерела змін у вихідній (базовій) матриці та елементі, діагональному відносно джерела змін. З врахуванням того, що значення кореспонденцій носять випадковий характер, а пошуковий експеримент має характер вибіркового дослідження, для формування плану був прийнятий власно випадковий метод відбору одиниць у вибірку сукупність [6]. При цьому номери кореспонденцій визначаються за допомогою генератора випадкових чисел, вбудованого в Microsoft Excel. Для кожного дослідження генерується два випадкових числа в межах від 1 до 900, а на їх основі визначаються індекси відповідних елементів матриці.

Сформований таким чином повний план пошукового експерименту складається зі 100 дослідів. Більша кількість змін кореспонденцій в цьому плані дорівнює  $\Delta h = 0$ , а значущими виявилися 27 дослідів

Для кожного дослідів відповідно плану вручну змінювалась матриця трудових пересувань. На основі отриманої МПК розраховувались матриці відстаней між ТР, часу пересування пасажирів, часу поїздки в транспортному засобі та кількості пересадок. Ці розрахунки проводилися за допомогою транспортної моделі м. Сумі в середовищі VISUM.

Результати розрахунків дали змогу визначитись із потрібною кількістю дослідів на основі залежності чисельності вибірки для середньої при власно-випадковому, повторному відборі одиниць у вибірку сукупність, наведену в [6]:

$$N_b = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (9)$$

де  $t$  – розрахункове значення критерію Стюдента,  $t = 3 + \frac{6}{n_b - 4}$  [9];  $n_b$  – кількість спостережень у початковій вибірці,  $n_b = 27$  од.;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення показника, приймається по вибірці;  $\Delta$  – гранична помилка вибірки, приймається  $\Delta = 0,005 \cdot \bar{x}$ ;  $\bar{x}$  – середнє значення показника в початковій вибірці.

Навіть за таких жорстких умов, коли гранична помилка вибірки приймається на рівні 0,5 % від середньої, необхідний обсяг вибірки по всіх розрахункових показниках не перевищив 3 од. Тобто проведена серія дослідів має надлишковий обсяг, який гарантує, що ймовірність перевищення потрібної середньої помилки вибірки не перевищує 0,001. Це дозволило за

отриманими в експерименті даними провести статистичну оцінку ступеню впливу обраних показників розбіжностей матриць на підсумкові показники функціонування ММ, результати якої наведені в табл. 1 – 2.

Таблиця 1

**Залежність показників якості обслуговування пасажирів від величини зміни кореспонденцій для існуючого варіанту**

Статистична характеристика залежності	Назва показника якості		
	Час пересування, хв.	Час поїздки, хв.	Коефіцієнт пересадочності
Множинний коефіцієнт кореляції	0,695	0,718	0,578
Коефіцієнт детермінації	0,483	0,516	0,334
Стандартна помилка	0,041	0,034	0,001
Критерій Фішера	23	27	13
Значимість критерію	5,75E-05	2,45E-05	0,002

Таблиця 2

**Залежність показників якості обслуговування пасажирів від середньої дальності пересування для існуючого варіанту**

Статистична характеристика залежності	Назва показника якості		
	Час пересування, хв.	Час поїздки, хв.	Коефіцієнт пересадочності
Множинний коефіцієнт кореляції	0,9989	1	0,9123
Коефіцієнт детермінації	0,9979	0,9999	0,8323
Стандартна помилка	0,0027	0,0004	0,0006
Критерій Фішера	11735,83	305394,6	124,086

Наведені в таблицях статистичні характеристики свідчать про можливість інтегральної оцінки розбіжностей у матрицях кореспонденцій за допомогою обох показників: різниці в мінімальній транспортній роботі по реалізації матриць та відносного відхилення значень кореспонденцій. Але суттєво більшу значимість має перший показник, так, середня дальність пересування здійснює практично функціональний вплив на часові показники якості обслуго-

вування пасажирів та достатньо вагомий вплив на коефіцієнт пересадочності в маршрутній мережі міста. Тому саме різницю в мінімальній транспортній роботі доцільно використовувати в якості основного показника розбіжностей між матрицями кореспонденцій або основної характеристики МПК.

Але для визначення виду залежності часу пересування отриманих результатів недостатньо. Масштаби змін в МПК м. Суми в рамках пошукового експерименту є малозначущими з точки зору показників якості обслуговування пасажирів. Максимальної зміни, лише  $\approx 1,4\%$ , дістав час руху у транспорті. Це диктує необхідність продовження експерименту з метою отримання більш суттєвих змін у матриці.

Основною проблемою при поширенні експерименту є спосіб проведення змін у значеннях кореспонденцій. Надмірна кількість можливих варіантів матриці обумовлює повну відсутність будь-яких вказівок до бажаних напрямів таких змін. Тому було прийняте рішення про поступове об'єднання змін матриці з плану пошукового експерименту. Спочатку з результатами пошукового експерименту були відібрані 6 найбільш значущих дослідів, 3 з позитивним та 3 з негативним впливом на критерій. З цих змін МПК були складені 14 з 15 можливих дослідів з парними змінами. Одна парна зміна виявилась неможливою із-за участі в них загальної кореспонденції.

Потім були сформовані дві матриці, в яких були об'єднані всі «позитивні» та «негативні» зміни кореспонденцій, та ще одна матриця, яка об'єднує два попередніх варіанти. Додатково була сформована ще одна МПК, у якій були змінені дві нові кореспонденції з найбільшими впливом на середню дальність пересування пасажирів.

Окремо, для отримання максимальних змін кореспонденцій відносно базового варіанту, були сформовані два варіанти МПК м. Суми, які мінімізують та максимізують транспортну роботу по матриці. Пошук екстремальних станів МПК виконувався за допомогою програми **Mercs.exe**, яка є частиною пакету прикладних програм кафедри транспортних технологій ХНАДУ.

Статистичний аналіз результатів показав, що коефіцієнт регресійної моделі при середньої дальності пересування пасажирів дорівнює  $\approx 3$ , це означає, що  $5\%$  зміна критерію, яку доцільно прийняти в якості межі значущості, забезпечується  $1,7\%$  зміни середньої дальності поїздки пасажирів.

Однак необхідно відзначити, що отримані в експерименті екстремальні варіанти МПК мають малореальний характер внаслідок низької кількості завантажених клітинок.

## Висновки

Запропонована інтервальна концепція моделювання потреб населення у пересуваннях дозволяє адекватно оцінити межі інтервалу, в якому знаходиться фактичний розподіл трудових кореспонденцій міста.

Інтегральну оцінку розбіжностей в матрицях кореспонденцій слід проводити за різницею в мінімальній транспортній роботі по реалізації матриць.

Для отримання практично придатних до застосування варіантів МПК, які обмежують найбільш імовірні варіанти розподілу кореспонденцій, в умови транспортної задачі необхідно ввести додаткові обмеження на відповідність розподілу кореспонденцій пасажиропотокам на ділянках ВДМ при пошуку границь інтервалу.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Доля, В. К. Теоретические основы и методы организации маршрутных автобусных перевозок пассажиров в крупных городах [Текст] : В 2 т.: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / В. К. Доля. – М., 1993. – 301 с. (Т. 2. – 52 л.)
2. Ortúzar, J. de D. and Willumsen, L.G. Modelling Transport [Текст]. Third Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 499 p.
3. Грановский, Б. И. Моделирование пассажирских потоков в транспортных системах [Текст] / Б. И. Грановский // Автомобильный и городской транспорт (Итоги науки и техники). – т. 11. – М.: ВИНТИ, 1986. – С. 67-105.
4. Лозе, Д. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского и служебного транспорта – обзор теории моделирования [Текст] / Д. Лозе // Сб. докл. 7-й межд. конф. «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах». – СПб: СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 2006. – С. 170-186.
5. Горбачов, П. Ф. Оцінка впливу транспортних факторів на результати вибору людиною робочого місця [Текст] // Вестник Харьковского нац. автомобильно-дорожного ун-та. Сб. науч. тр. – Вып. № 43. – Х.: Изд-во ХНАДУ, 2008. – С. 86-91.
6. Венецкий, И. Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе [Текст] / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – М.: Статистика, 1975. – 264 с.

Надійшла до редколегії 25.03.2009.