

УДК 711.11

к.т.н., професор Осетрін М.М.,

Беспалов Д.О., Дорош М.І.,

Київський національний університет будівництва та архітектури

ОСОБЛИВОСТІ ЕТАПУ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЧЬОТИРЬОХСТУПЕНЕВОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МОДЕЛІ МІСТА

Наводяться особливості етапу перерозподілу транспортного попиту при розрахунку чьотирьохступеневої транспортної моделі міста.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа, транспортна модель, перерозподіл індивідуального транспорту, перерозподіл громадського транспорту, послідовний перерозподіл, рівноважний перерозподіл, навчальна процедура.

У світовій практиці класичним підходом до розрахунку транспортного попиту є класична чьотирьохступенева модель. В її роботі, заключним етапом є процес перерозподілу транспортного попиту (Traffic Assignment) [1].

Перерозподіл транспортного попиту - це один з основних методів визначення та аналізу транспортної пропозиції. У містобудівній практиці для оцінки ефективності транспортної мережі, існує принцип рівноважних потоків («user equilibrium model»). Згідно цього принципу, витрати часу на поїздку залежать від величин транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста (ВДМ), отже водії вибирають маршрути руху з урахуванням цих витрат.

Даний підхід дозволяє комплексно оцінити всі особливості існуючої транспортної мережі, а також врахувати затримки у русі, пов'язані з рівнем існуючої завантаженості ВДМ.

При перерозподілі транспортного попиту, моделюються пасажирські поїздки. Користувач індивідуального транспорту (ІТ) вибирає маршрут, який йому є найбільш вигідними, пасажир громадського транспорту (ГТ) для своєї поїздки вибирає час відправлення за розкладом. Перерозподіл відбувається виходячи з вигоди в часі, вигоди в пробігу автомобіля або часу поїздки в громадському транспорті. Чим коротше і менш завантажений шлях між двома районами, тим більша ймовірність того, що ним скористаються для реалізації транспортних потреб.

Перерозподіл транспортних попиту починається з перерозподілу індивідуального транспорту.

В результаті розрахунку трьох попередніх етапів чьотирьохступеневої транспортної моделі, отримані матриці кореспонденцій (МК) шарів попиту, з

розділом за видами транспорту [1]. Наступним кроком розрахунку є перерозподіл отриманих матриць кореспонденцій по ВДМ, для вибору того чи іншого шляху реалізації цих кореспонденцій.

Алгоритм перерозподілу МК по ВДМ для індивідуального транспорту схематично зображений на рис.1.

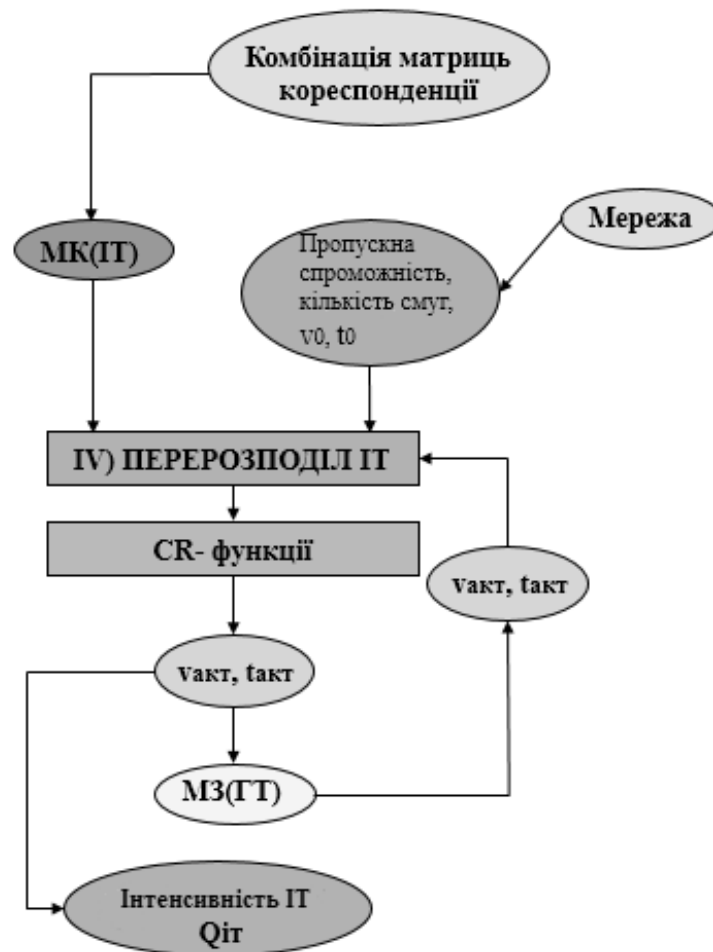


Рис.1. Алгоритм перерозподілу матриць кореспонденцій по ВДМ для індивідуального транспорту

При перерозподілі транспортних потоків по ВДМ враховуються такі фактори, як: наявність світлофорного регулювання, односторонній рух, заборона на проїзд вантажного транспорту по ділянкам ВДМ, заборонені маневри на перехрестях, наявність парковок, що впливають на умови руху транспорту.

Для перерозподілу індивідуального транспорту в сучасних програмних продуктах для моделювання транспортних потоків реалізовано багато процедур, що дозволяють прогнозувати перерозподіл потоків індивідуального транспорту по ВДМ міста.

В програмному комплексі PTV Visum реалізовано 8 процедур перерозподілу [6]. До розгляду пропонується 3 найбільш часто застосовувані процедури.

1. Процедура послідовного перерозподілу (*Incremental assignment*) – моделює послідовне заповнення вулично-дорожньої мережі (матриця кореспонденції ділиться в процентному відношенні на кілька часткових матриць). Спочатку учасники руху знаходяться у вільній дорожній мережі, в якій для кожної кореспонденції «джерело-мета» існує тільки один найкоротший шлях. Потім у кожному новому кроці розрахунку, ВДМ отримує додаткове навантаження (частку матриці), тим самим підвищується опір на навантажених відрізках і вузлах. У результаті зміни опору, в наступному кроці можуть бути визначені інші найкоротші шляхи. Процедура триває, поки вся матриця кореспонденції не буде перерозподілена на мережу.

2. Процедура рівноважного перерозподілу (*Equilibrium assignment*) – поділяє попит відповідно першому принципу Вардропа: «Кожен окремий учасник транспортного руху вибирає свій маршрут так, що тривалість поїздки на всіх альтернативних шляхах в кінцевому результаті рівні і кожна зміна на інший шлях збільшила б особистий час у дорозі».

Виходячи з послідовного перерозподілу потоків як початкового рішення утворюється рівноважний стан в багатоступінчастій ітерації. У внутрішньому кроці ітерації, шляхи однієї кореспонденції переміщенням транспортних засобів приводяться в рівновагу. У зовнішній ітерації перевіряється, чи є при новому актуальному стані мережі нові шляхи з меншим опором.

3. Навчальна процедура (*Equilibrium Lohse*) – була розроблена професором Лозе. Процедура відображає «навчальний процес» учасників транспортного руху під час переміщення по мережі. Виходячи з принципу «все або нічого», водії враховують інформацію останньої поїздки для нового пошуку шляхів.

Навчальна процедура являє собою модель процесу адаптації учасників автомобільного руху під час переміщення по мережі. На кожній наступній ітерації водії враховують інформацію останньої поїздки для пошуку нових шляхів. [4].

В кожній із зазначених процедур, оцінка затрат часу відбувається на основі CR-функції (функції опору) – яка вказує залежність часу витраченого на проходження ділянок мережі від завантаженості і пропускної спроможності [6].

Для перерозподілу ІТ в транспортній моделі (ТМ) Києва використовується «навчальна процедура» (*Equilibrium Lohse*), так як вона забезпечує найбільш реалістичний результат розрахунку.

В табл. 1 наведені результати порівняння якості розрахунку різних процедур перерозподілу транспортних потоків на прикладі ТМ Києва.

Табл. 1.

Результати порівняння якості розрахунку різних процедур перерозподілу на прикладі ТМ Києва

Процедура перерозподілу	Коефіцієнт кореляції	Середня абсолютна помилка	Середня відносна похибка, %
Рівноважний перерозподіл	0,394	10384,5	82,0
Послідовний перерозподіл	0,734	5564,7	353,2
Навчальна процедура	0,823	4338,2	30,5

В результаті перерозподілу ІТ розраховуються такі показники як: інтенсивність ІТ, коефіцієнт завантаженості (відношення інтенсивності руху до пропускної спроможності), розподіл інтенсивностей на вузлах за напрямками (рис.2), сумарний пробіг всіх автомобілів в мережі, середній час реалізації транспортних кореспонденцій, середня швидкість в мережі.

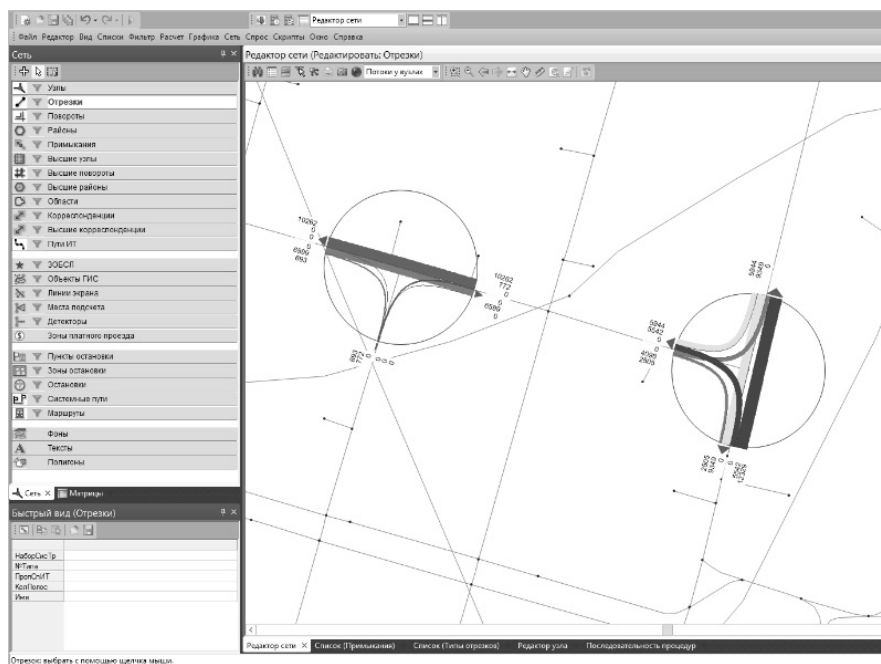


Рис.2. Розподіл інтенсивностей транспортних потоків за напрямками на вузлах вулично-дорожньої мережі

Ці показники використовуються для встановлення загального показника оцінки ефективності роботи як ВДМ в цілому так і окремих вузлів, а також інженерно планувальних рішень.

Процедура моделювання перерозподілу громадського транспорту (ГТ) відрізняється від процедури моделювання індивідуального транспорту.

Основна відмінність заключається в тому, що при перерозподілі кореспонденцій громадського транспорту, затрати часу оцінюються виходячи із розкладу руху транспорту, який являється фіксованим. В той же час для індивідуального транспорту значення функції опору змінюється в залежності від інтенсивності руху.

В програмному комплексі PTV Visum передбачені три процедури перерозподілу ГТ [3]:

- **за системою транспорту** (transport system based). Перерозподіл відбувається без урахування маршрутів і розкладів по всіх ділянках мережі, де дозволений рух тієї або іншої системи громадського транспорту;
- **за інтервалами** (headway based). Перерозподіл відбувається строго у відповідності зі середнім інтервалом руху для кожного маршруту;
- **за розкладом** (time table based). Перерозподіл відбувається строго у відповідності з розкладом руху.

Алгоритм перерозподілу матриць кореспонденцій по транспортній пропозиції для ГТ схематично зображений на рис.3 [1].

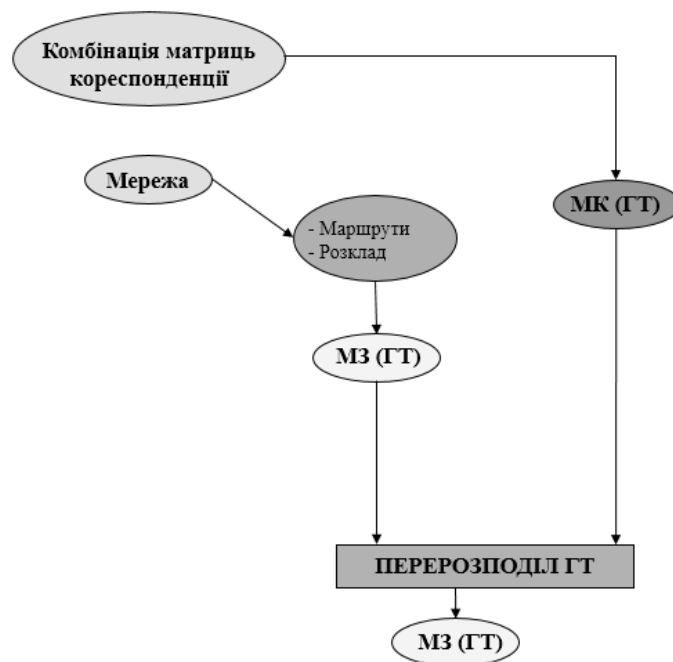


Рис.3. Алгоритм перерозподілу матриць кореспонденцій по транспортній пропозиції для громадського транспорту за розкладом

Найбільш точною і досконалою являється процедура перерозподілу транспортних потоків ГТ за розкладом, оскільки включає значення вмістимості рухомого складу для кожного маршруту ГТ [3].

Основна ідея цієї процедури полягає в тому, що при визначенні величини пасажиропотоку громадського транспорту до уваги беруться всі маршрути ГТ і

розклад руху по ним. При цьому враховується не тільки час в дорозі для кожного варіанту маршруту, але і час очікування на зупинці, час очікування при пересадці, час пішохідного переходу при пересадці а також час витрачений на шлях від центру тяжіння району-джерела до зупинки і від зупинки до центру тяжіння району-цілі, та вмістимість одиниць рухомого складу.

Оцінка ймовірності вибору шляху здійснюється за допомогою однієї з вибраних функції [6]:

$$\text{BoxCox } P(R) = \exp^{-\beta \frac{R^{\tau}-1}{\tau}} \quad (1)$$

$$\text{Kirgoff } P(R) = R^{-\beta} \quad (2)$$

$$\text{Logit } P(R) = \exp^{-\beta R} \quad (3)$$

$$\text{Lohse } P(R) = \exp^{-\left(\beta \left(\frac{R}{R_{\min}} - 1\right)\right)^2} \quad (4)$$

де R – опір конкретного шляху слідування, $R_{\min}$ – мінімальний опір з усіх сполучень.

Для обмеження пропускної спроможності маршрутів громадського транспорту використовуються функції опору (рис.4).

Ограничение пропускной способности Зависимое от загрузки сопротивление Экспорт < >

Используемая функция сопротивления: SBB

Зависимое от загрузки сопротивление W элемента SBB рассчитывается из его загрузки A посредством: Линейно

$$W_v = \begin{cases} a \cdot A_v^b & , A_v \leq l_1 \\ r + \alpha \cdot A_v + \beta \cdot A_v^2 + \gamma \cdot A_v^3 & , l_1 < A_v < l_2 \\ c & , A_v \geq l_2 \end{cases}$$

$a =$ 0.5000 Указанные в формуле параметры
 $b =$ 3.0000 r, α, β, γ
 $c =$ 2.0000 рассчитываются на основе других параметров.
 $l_1 =$ 1.0000
 $l_2 =$ 2.0000

Зависимое от загрузки сопротивление W того или иного пути следования V рассчитывается из сопротивления W и времени движения F отдельных элементов маршрута по следующей формуле:

$$W_V = \sum_{v \in V} W_v \cdot F_v$$

Рис.4. Функції обмеження пропускної спроможності маршрутів громадського транспорту

В якості виду функції обмеження, рекомендується використовувати функцію SBB (з нім. Schweizerische Bundesbahne), розроблену для швейцарських залізниць [5].

Маршрут: К-223 ☒ Показать только активные маршрут Направление: < Зворотний

Имя: К-223_зворотний

База: Ход и профили времени движения | Опр. пользов. атр. Вариант маршрута | Опр. пользов. атр. Профили времени движения

Индекс	ПунктОст№	ПунктОст\Имя	Длина отрезка	ПунктПроф	<>	Входящие(ПА)	Выходящие(ПА)	Проезжающие(ПА)	ПрофВрДвиж\Vср
10	113138	вул. Миколи Лукашевича	0.372kl	☒	!	67	6	1347	26km/h
16	113136	вул. Фучика	0.582kl	☒	!	145	46	1367	26km/h
22	113135	вул. Курська	0.401kl	☒	!	288	111	1401	26km/h
27	113133	вул. Солом'янська	0.368kl	☒	!	1109	203	1486	26km/h
34	113131	вул. Освіт	0.651kl	☒	=	253	187	2409	26km/h
40	112716	бульв. Чоколевський	0.541kl	☒	=	208	201	2361	26km/h
48	112717	пл. Космонавтов	0.541kl	☒	=	168	215	2354	26km/h
53	112718	вул. Птерська	0.333kl	☒	=	130	140	2381	26km/h
58	114570	вул. Адама Міцкевича	0.379kl	☒	=	149	128	2383	26km/h
65	112719	Караваєві дачі	0.314kl	☒	=	176	48	2484	26km/h
68	112720	вул. Лебедева-Кумача	0.465kl	☒	=	152	28	2632	26km/h
76	112534	вул. Борщагівська	0.456kl	☒	=	70	28	2755	26km/h
81	112536	вул. Виборзька	0.384kl	☒	=	56	45	2781	26km/h
87	3230	завод Білшовик	0.589kl	☒	=	27	100	2737	26km/h
93	112539	ст. м. Шулявська	0.471kl	☒	=	33	70	2694	26km/h
101	4282	вул. Патріархальська		☒	=	11	64	2664	26km/h

☐ Авт. корректировать ПрофВрДвиж

Базовая поездка: Нет базовой поездки

Подогнать

Рис.5. Час руху між зупинками ГТ, та пасажиропотік на маршруті

В результаті розрахунку перерозподілу ГТ розраховуються такі показники як: середній час поїздки, кількість пасажирів що зайшли, вийшли на зупинці чи проїхали транзитом, сумарна кількість перевезених пасажирів по маршруту, та ін. (рис.5).



Рис.6. Порівняльна картограма ГТ поточного стану та перспективи

Данні показники дозволяють оцінити ефективність роботи існуючої маршрутної мережі громадського транспорту, розрахувати ефект від впровадження нових маршрутів чи реорганізації існуючих.

За допомогою розробленої транспортної моделі міста Києва було змодельовано 3 нових автобусних маршрути ГТ:

- R1 «вул. Милославська – Залізничний Вокзал»;
- R2 «вул. Милославська – ст. м. Либідська»;
- R3 «вул. Милославська – ст. м. Нивки»;

та змінені тролейбусний маршрут №30 (продовжено до залізничної станції Київ-Волинський) та №31 (продовжено до вул. Кадетський гай).

В результаті моделювання нових маршрутів спостерігається зменшення на 86870 кількості поїздок у громадському транспорті протягом доби за рахунок зменшення кількості пересадок. При цьому, зростає кількість пасажироперевезень автобусом, а навантаження на Святошинсько-Броварській лінії метрополітену від ст. м. Дарниця до ст. м. Шулявська та на Куренівсько-Червоноармійській лінії від ст. м. Петрівка до ст. м. Олімпійська зменшується рис.6 (табл.2, 3).

Табл.2

Порівняння параметрів роботи ГТ

Система транспорту	Поточний стан (к-ть поїздок)	Перспектива (к-ть поїздок)	Динаміка
Міська електричка	19 451	17 512	-9.97%
Метро	1 379 201	1 292 023	-6.32%
Маршрутне таксі	986 092	890 516	-9.69%
Приміський автобус	390 404	391 355	0.24%
Швидкісний трамвай	137 318	147 074	7.10%
Трамвай	205 646	190 702	-7.27%
Тролейбус	647 265	644 835	-0.38%
Автобус	533 749	638 239	19.58%

Табл.3

Витрати часу на поїздки в ГТ

Витрати часу	Поточний стан	Перспектива
Середній час поїздки	38хв.54с.	35хв.9с.

Впровадження даних маршрутів в цілому для системи громадського транспорту можна оцінити позитивно, що призведуть до зменшення кількості пересадок і середнього часу витраченого на поїздки в ГТ.

Отже можна зробити висновок, що перерозподіл транспортного попиту є одним з основних етапів при розрахунку існуючих і прогнозних значень транспортних потоків.

Література

1. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / Якимов М.Р. – М.: Логос, 2013. – 188 с.
2. Математическое моделирование распределения транспортного спроса в транспортной системе города. Якимов М.Р. / Транспорт: наука, техника, управление. 2010. – №10. С. 7–13.
3. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Visum: монография / Якимов М.Р., Попов Ю.А. – М.: Логос, 2014. – 200 с.
4. Лозе Д. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского служебного транспорта – Обзор теории моделирования. Джерело електронного доступу: <http://old.ptv-vision.ru/assets/Uploads/data/publication-Lohse-Obsor-teorii-modelivrovaniya.pdf>
5. Ortúzar, J./ Willamsen, G.: «Modelling Transport», 3 Edition, published by Wiley, ISBN 0-471-86110-3
6. VISUM 14 Fundamentals, VISUM 14 Manual, 2014 PTV AG, Karlsruhe.

Аннотация

В статье приводятся особенности этапа перераспределения транспортного спроса при расчёте четырёхступенчатой транспортной модели города.

Annotation

This article features «Traffic Assignment» stage of the 4-step city transport model.