

Г. І. Нестеренко, кандидат технічних наук, доцент
Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
П. О. Яновський, кандидат технічних наук,
доцент Національного авіаційного університету
О. О. Озерова, асистент Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПАСАЖИРІВ У ВЕЛИКИХ МІСТАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дослідження спрямовано на розвиток методів математичного та інформаційного моделювання, відображає певну частину проблеми з удосконалення технологій процесу перевезень. Запропоновано створення моделі (системи моделей) для вдосконалення процесу перевезення пасажирів у великих вузлах.

Ключові слова: математичне моделювання; транспортна мережа; транспортування вузлів; процес транспортування.

This paper aims to develop methods of mathematical modeling and information and reflect some of the problems related to technological improvement process traffic. The article suggests creating a model (the models) for insufficiently process passenger in large nodes.

Key words: mathematical modeling; transport network; transporting node; transportation process.

Постановка проблеми. Транспортна інфраструктура – одна з найважливіших сфер, що забезпечує життя міст і регіонів. В останнє десятиріччя у багатьох великих містах вичерпано чи близькі до вичерпання можливості екстенсивного розвитку транспортних мереж. Тому особливої уваги потребує оптимальне планування мереж, покращання організації руху, оптимізація систем, маршрутів громадського транспорту. Виконання таких завдань неможливо без математичного моделювання транспортних мереж. Головне завдання математичних моделей – визначення і прогноз усіх параметрів функціонування транспортної мережі, таких як інтенсивність руху на всіх елементах мережі, обсяг перевезень мережі громадського транспорту, середня швидкість руху, затримки та втрати часу.

Математичні моделі, прийняті для аналізу транспортних мереж, суттєво відрізняються завданнями, що виконуються, математичним апаратом, даними, які використовуються та ступенем деталізації опису руху. Тому неможливо дати повну класифікацію цих моделей [1, 53].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню транспортної інфраструктури, її значенню в сучасному житті, моделюванню транспортних мереж приділяється досить уваги в наукових працях таких учених, як В. В. Скалозуб, В. Н. Лівшиць, П. А. Стенбринк, П. Н. Розенштейн-Родан, Є. Симоніс, Є. Шотлер, Д. Р. Рей, Є. Л. Логінов, А. М. Ткаченко, А. А. Багдаєв, Р. О. Кожевников, В. Є. Виноградов, А. Н. Перцев, П. О. Андреев, П. Друкер, В. Росту, Дж. Бастіа та ін.

© Г. І. Нестеренко, П. О. Яновський, О. О. Озерова, 2014

Мета статті. Вибір технологічних завдань суб'єктивний, і, перш за все, пов'язаний з визначенням нових наукових завдань, виконання яких може забезпечити вдосконалення управління процесом пасажирських перевезень, що підвищить ефективність роботи галузі.

Виклад основного матеріалу. Структура системи моделей управління процесом перевезення залізничного транспорту багаторівнева й може бути подана в такому вигляді: інформаційно-аналітичне подання процесу перевезення (моніторинг процесів функціонування пасажирського транспорту); економічні, технолого-економічні моделі процесу перевезення; математичне моделювання процесу перевезення пасажирів; моделі для зображення соціально-економічних потреб населення щодо перевезень (оцінка ефективності залізничного транспорту) [2, 110]. Перелік завдань математичного та інформаційного моделювання з удосконалення технологій процесу перевезень пасажирів у містах подовжено через високу складність і масштабність цих процесів та зростання вимог до якості управління.

Особливість завдання вдосконалення технологій процесу перевезень пасажирів у містах полягає в необхідності формування динамічних моделей для оцінки часу використання міського транспорту. Аналізуючи деякі економічні явища, можна виділити системи, мета функціонування яких – задоволення масового випадкового потоку заявок на виконання однотипних дій (на обслуговування). Такі системи отримали назву систем масового обслуговування [3, 135].

Серед характеристик, що досліджуються в системах масового обслуговування, особливе значення мають характеристики вхідного потоку вимог (заяв на обслуговування); характеристики системи, яка обслуговує вимоги, що надходять, та яку часто називають механізмом обслуговування (наприклад, структура механізму, що обслуговує, тривалість обслуговування окремих вимог елементів деякого механізму); прийнятий порядок обслуговування вимог чи дисципліна обслуговування.

Для створення математичної моделі роботи транспортного вузла потрібно визначення таких показників, як математичне сподівання, дисперсія та середньоквадратичне відхилення. Добовий пасажиропотік у Київському транспортному вузлі не є постійною величиною. Ця величина коливається у межах від 84 до 147 млн пас. за добу [4]. На основі даних про пасажирів, які щодоби прибували до Київського транспортного вузла впродовж 2013 р., виконано статистичну обробку, побудовано статистичний ряд і визначено числові характеристики добової інтенсивності загального пасажиропотоку Київського транспортного вузла. Гістограма розподілу випадкової величини інтенсивності пасажиропотоку зображено на рис. 1.

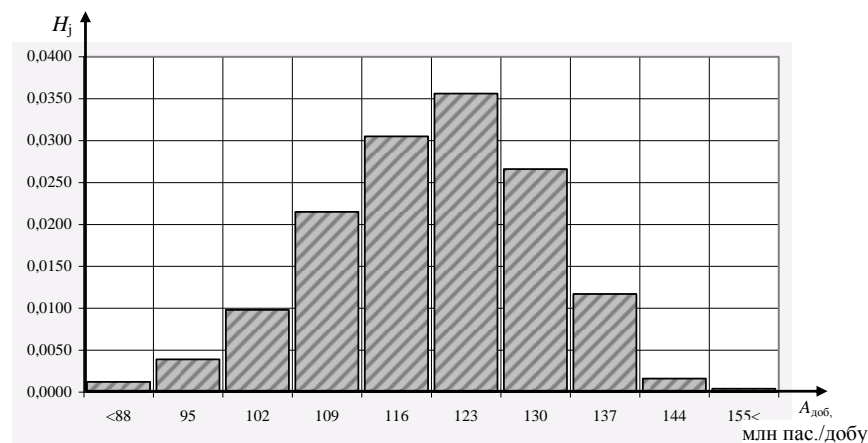


Рис. 1. Гістограма розподілу величини пасажиропотоку Київського транспортного вузла

Числові характеристики випадкової величини добової інтенсивності пасажиропотоку: математичне сподівання $M[N] = 119,163$ млн пас./добу, дисперсія $D[N] = 122,851$ (млн пас./добу)², середнє квадратичне відхилення $\sigma[N] = 11,084$ млн пас./добу.

Інтенсивність вхідного пасажиропотоку характеризується середньою величиною інтервалу надходження пасажирів до вузла. Інтервал між пасажирами, що приїждять до Київського транспортного вузла з кожного напрямку, є випадковою величиною з деяким законом розподілу.

Аналіз інтенсивності вхідного пасажиропотоку встановив, що інтервали мають показниковий розподіл. Установлено, що кількість пасажирів розподілено за нормальними законами, отримано диференційні функції розподілу пасажиропотоків. Знання характеру розподілу дозволить виконати техніко-економічні розрахунки з визначення раціональних варіантів перерозподілу пасажиропотоків у Київському транспортному вузлі, а також визначити економічний ефект, пов'язаний, з одного боку, з раціональним пропуском транспортних засобів, з іншого – з позицією користувачів транспортних послуг.

Під час розв'язання проблеми вибору виду міського пасажирського транспорту (МПТ) слід визначати необхідні умови. Загальну характеристику організаційно-технологічних підсистем наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Загальна характеристика підсистем, з яких складаються
організаційно-технологічні варіанти обслуговування пасажиропотоків
у транспортному вузлі**

a – спорудження та пристрої МПТ	b – послуги МПТ	c – вартість послуг на транспорті
a_{11} – залізничний транспорт	b_{21} – послуги на залізничному транспорті	c_{31} – вартість послуг на залізничному транспорті
a_{12} – автомобільний транспорт	b_{22} – послуги на автомобільному транспорті	c_{32} – вартість послуг на автомобільному транспорті
a_{13} – електротранспорт	b_{23} – послуги на електротранспорті	c_{33} – вартість послуг на електротранспорті

Після визначення характеристик підсистем можна отримати матрицю, яка містить усі варіанти обслуговування пасажирів у вузлі.

$$X = \begin{vmatrix} a_{11} & b_{21} & c_{31} \\ a_{12} & b_{22} & c_{32} \\ a_{13} & b_{23} & c_{33} \end{vmatrix}$$

Завантаження транспортної мережі визначається кількістю транспортних засобів чи пасажирів, які використовують для руху кожний елемент мережі (дугу, поворот, перегін на мережі громадського транспорту). Моделювання завантаження полягає в розподілі міжрайонних кореспонденцій по конкретних шляхах, які з'єднують пари районів. Входом до моделі завантаження є матриця кореспонденцій або в загальному випадку набір матриць, які належать до пересувань чи різних класів користувачів. Мета моделювання – це визначення для кожної пари районів прибуття-відправлення: набору шляхів, які використовуються для пересувань між цими районами; коефіцієнтів розподілення кореспонденцій між цими шляхами.

Після розрахунку всієї системи шляхів завантаження елементів мережі було отримано шляхом додавання вкладів усіх кореспонденцій, які використовують даний елемент. Таким чином, моделювання завантаження передбачає детальніший опис руху, ніж звичайне визначення завантаження всіх елементів. В іноземній літературі моделі розподілення кореспонденцій по транспортній мережі об'єднуються загальним терміном Traffic assignment [5, 9].

Дослідженням, проведеним на базі Київського вузла, передбачається, що всі вихідні дані про перевезення пасажирів у транспортному вузлі на мережі й техніко-експлуатаційні характеристики її елементів повністю відомі та не змінюються з часом.

Безпосередньо відомі такі незмінні дані: кількість зупинок кільцевої електрички – 15 (Лівобережна, Тросщина 1, 2, Київ–Петрівка, Zenit, Вишгородська, Сирець, Рубежівська, Борцагівка, Київ–Волинський, Караваєві Дачі, Київ–Пасажирський (Московський), Видубичі, Лівий берег, Дарниця), кількість зупинок метрополітену поблизу залізничного кільця – 6 (Берестейська, Сирецька, Петрівка, Лівобережна, Видубичі, Вокзальна) (рис. 2). Дані, що мають зміни за періодами, – кількість перевезених пасажирів з початкового пункту в кінцевий.

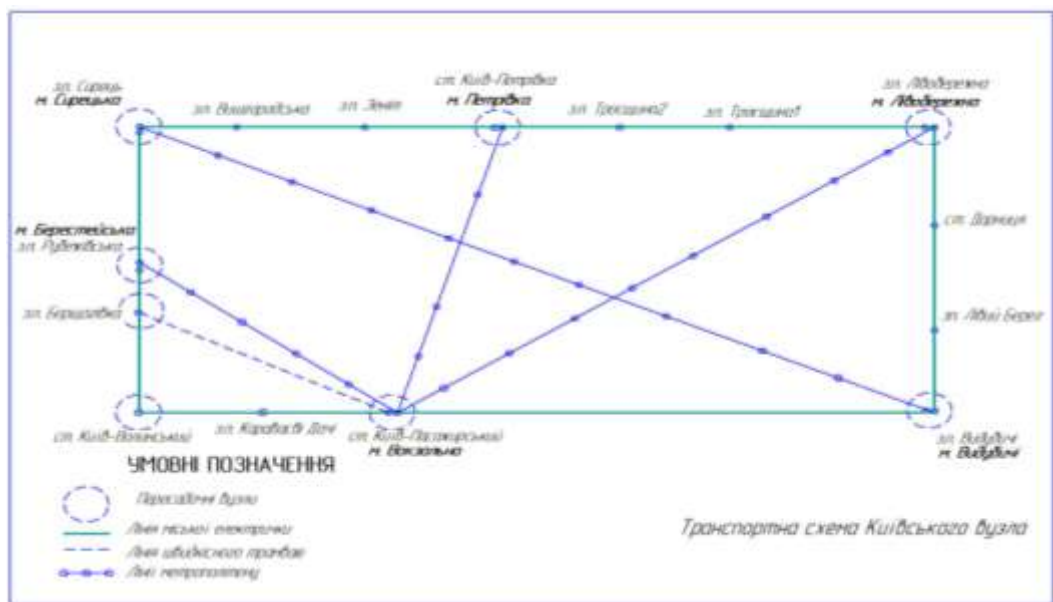


Рис. 2. Схема Київського транспортного вузла

Для зручності пасажирів, що прямують від вокзалу до поїздів, а також пасажирів, що прибули на станцію і прямують від платформ до вокзалу, необхідно під час прийому поїздів забезпечити якомога меншу відстань проходу пасажирів між пасажирськими платформами і вокзалом. Таким чином, у даній статті поставлено завдання з використанням сучасних математичних методів розробити такий графік заняття пасажирських платформ (ГЗП) потягами, який би мінімізував відстань, що проходять пасажирів від поїздів до вокзалу і навпаки. Для розв'язання даної задачі доцільно скористатися методами динамічного програмування.

Використовуючи транспортний граф міста і намітивши можливі варіанти розташування станцій пересадки, складається матриця найкоротших затрат часу на поїздку від краю міста в розрахункові райони.

$$t_{ij} = \begin{vmatrix} t_{11}t_{12}t_{13}\dots t_{1j}\dots t_{1m} \\ t_{21}t_{22}t_{23}\dots t_{2j}\dots t_{2n} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ t_{i1}t_{i2}t_{i3}\dots t_{ij}\dots t_{in} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ t_{m1}t_{m2}t_{m3}\dots t_{mj}\dots t_{mn} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де j – номер району міста ($j = 1, 2, 3 \dots, n$);

i – номер майданчика для розміщення станції пересадки ($j = 1, 2, \dots, n$).

Пасажирам, що прибувають до міста залізницею, в поїзді на j -й мікрорайон міста часто доводиться користуватися декількома видами транспорту. В цьому разі:

$$t_{ij} = \min(t_{il}^{sal} \xi + t_{lk}^M \xi + t_{kj}^{nm} \xi) \quad (2)$$

де t_{il}^{sal} – витрати часу пасажиром на проїзд залізницею від краю міста до i -ї станції пересадки на метрополітен чи наземний пасажирський транспорт;

t_{lk}^M – витрати часу пасажиром на проїзд на метрополітені між l -м і k -м вершинами транспортного графа;

t_{kj}^{nm} – те ж саме на наземному транспорті;

$\xi = 1$, коли пасажир користується s -м видом транспорту;

$\xi = 0$, коли не користується.

У результаті проведених розрахунків отримано інформацію про кількість пасажирів, які прямують від залізничного переходу в певний район міста; витрати часу пасажиром на пересування від межі міста в транспортний район найкоротшим шляхом, відповідно, залізницею, метрополітеном і наземним транспортом (год); сумарні витрати на поїздку, відповідно, залізничним транспортом, метрополітеном наземним транспортом (пасажиро-год); загальні витрати на всю поїздку від межі міста в даний район (пасажиро-год).

Отриманий результат показав, що в ряді випадків спорудження станції пересадки не призводить до зміни маршруту проїзду пасажирів, тобто для пасажирів, що їдуть у ці райони, “старий” маршрут (через головний вокзал) за витратами часу залишається основним. За результатами визначаються сумарні затрати часу на пересування під час побудови станції пересадки в будь-якому з намічених пунктів.

Варіант взаємодії залізничного транспорту і метрополітену однозначно не оцінюється за затратами часу пасажирів на поїздку. У цьому разі не враховано додаткові капітальні вкладення й експлуатаційні витрати, викликані спорудженням станції пересадки на залізничному підході до вузла, тому вибір режиму взаємодії великою мірою визначає наведені витрати:

$$X_{i2} = E_n K_{nyi} + K_{nci} + E_i, \quad (3)$$

де K_{nyi} – капітальні вкладення в постійні пристрої при i -му розміщенні станції пересадки;

K_{nci} – витрати на придбання рухомого складу;

E_i – експлуатаційні витрати на виконання пасажирських перевезень при i -му варіанті взаємодії.

До капітальних витрат на постійні пристрої входять витрати на прокладку лінії метрополітену до станції пересадки. Обчислюючи капітальні вкладення в постійні пристрої, слід ураховувати ефект від віддалення витрат на розвиток головної пасажирської станції, вокзалу і приміської ділянки під час спорудження станції пересадки. Урахування цього ефекту особливо важливо для вирішення питання розвитку пристроїв залізничного транспорту у великих містах.

Спорудження станції пересадки на залізничному підході призводить до перерозподілу пасажиропотоків і зниження завантаження головної ділянки між станцією пересадки і вокзалом. Станціями пересадки вирішено зробити станцію Київ – Петрівка (А), зупинкові пункти Лівобережна (Б) та Видубичі (В), станція Київ – Пасажирський – це головний вокзал.

Для визначення ефекту від віддалення витрат на розвиток залізничних пристроїв розробляється графічна модель взаємодії метрополітену і залізничного транспорту. Аналіз показав, що після введення в експлуатацію станції пересадки завантаження головної ділянки скоротилось майже в 2,5 раза, а потік пасажирів, які пересаджуються на головному вокзалі, зменшився на

$$\Delta \bar{N} = \frac{16\,556}{11\,260} = 1,47. \quad (4)$$

Таким чином, в окремих випадках будівництво станції пересадки зменшує пробіг не тільки залізничного і наземного видів транспорту, але й поїздів метрополітену. Пов'язано це з розвантаженням пікових перегонів ліній метрополітену, які розміщуються, як правило, в районі головного залізничного вокзалу. Будівництво станції пересадки ліквідує перевантаження центральних вузлів пересадки і дасть можливість рівномірніше розподілити навантаження на всій лінії метрополітену.

Для комплексної оцінки варіантів взаємодії залізничного транспорту і метрополітену експертним шляхом оцінено зручності пасажирів, викликані підвищенням надійності X_{i3}^* і регулярності роботи X_{i4}^* транспортної системи. Значення параметрів, коефіцієнти їх відносної важливості подано в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння параметрів і коефіцієнтів, які впливають на вибір варіанта взаємодії

Місце розміщення станції пересадки	Капітальні вкладення, млн грн		Експлуатаційні витрати, грн	Приведені витрати	Параметр X_{i2}^*
	У постійні пристрої	У рухомий склад			
Головний вокзал	0	4,2	2,971	3,475	1,00
А	26,2	0,8	0,269	3,509	1,01
Б	20,6	1,2	0,832	3,448	0,992
В	16,8	1,7	1,447	3,667	1,06

Порівняння параметрів і коефіцієнтів, які впливають на вибір варіанта взаємодії, подано в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняння показників ефективності

Найменування параметрів	Розміщення станції пересадки				Коефіцієнт важливості α_r
	Головний вокзал	А	Б	В	
Затрати часу пасажиром на поїздку (X_{i1}^*)	1,0	0,936	0,948	1,001	0,36
Приведені витрати (X_{i2}^*)	1,0	1,001	0,992	1,060	0,31
Зручності для пасажирів, викликано:					
Покращанням надійності транспортної системи (X_{i3}^*)	1,0	0,996	0,997	0,990	0,10
Регулярністю роботи (X_{i4}^*)	1,0	0,998	0,990	0,996	0,23

Під час розміщення станції пересадки в А

$$E_A^* = 0,36 \times 0,936 + 0,31 \times 1,01 + 0,996 + 0,23 \times 0,988 = 0,9766.$$

Аналогічно: $E_B^* = 0,9761$; $E_B^* = 1,0179$.

Таким чином, за інтегральним показником ефективності оптимальний варіант взаємодії метрополітену і залізниці досягається під час розміщення станції пересадки в пункті Б. Відносне скорочення показника ефективності щодо базового варіанта становить 2,4 %.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Одне із завдань удосконалення технологій процесу перевезень – створення моделі (системи моделей) процесу перевезення пасажирів у великих вузлах. Найважливішими умовами сучасного етапу розвитку методів управління перевезеннями є підвищення наукоємності та комплексності завдань, що потребують виконання.

Розробка і створення системи моделей процесу перевезення – складна й актуальна науково-технічна проблема в галузі пасажирського міського транспорту. Для покращання ефективності роботи міського громадського транспорту запропоновано будівництво станції пересадки пасажирів з одного виду транспорту на інший на головному вокзалі та ще в 3 пунктах міста.

Спорудження станції пересадки на залізничному підході призводить до перерозподілу пасажиропотоків і зниження завантаження головної ділянки між станцією пересадки і вокзалом. Аналіз показав, що після введення в експлуатацію станції пересадки завантаження головної ділянки скоротилось майже в 2,5 раза, а потік людей, які пересаджуються на головному вокзалі, зменшився в 1,47 раза; також отримано результати розрахунків капітальних вкладень та експлуатаційних витрат; для комплексної оцінки варіантів взаємодії залізничного транспорту і метрополітену експертним шляхом оцінено зручності пасажирів, викликані підвищенням надійності та регулярності роботи транспортної системи; за інтегральним показником ефективності оптимальний варіант взаємодії метрополітену і залізниці досягається під час розміщення станції пересадки в пункті Б, відносне скорочення показника ефективності щодо базового варіанта становить 2,4 %.

Список використаних джерел:

1. Скалозуб В. В. Процедуры многокритериальной оптимизации в задачах с совокупно противоречивыми критериями / В. В. Скалозуб // Алгоритмизация решения задач оптимального проектирования : сб. науч. тр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. – К., 1997. – С. 53–56.
2. Гольдштейн Е. Г. Задачи линейного программирования транспортного типа : учеб. пособие / Гольдштейн Е. Г. – М. : Наука, 1969.
3. Бек Н. Н. Статистические методы оптимизации в экономических исследованиях / Н. Н. Бек, Д. И. Голенко. – М., 1971.
4. Статистичний щорічник України / Державна служба статистики України. – К. : ТОВ “Август Трейд”, 2012.
5. Ткаченко А. М. Логістика і територіальний розвиток / А. М. Ткаченко // Управління сучасним містом. – 2003. – № 13 (9). – С. 9–17.