

І. Ю. Леснікова, кандидат технічних наук,
доцент кафедри транспортних систем
та технологій Університету митної
справи та фінансів

Н. В. Халіпова, кандидат технічних наук,
доцент кафедри транспортних систем
та технологій Університету митної
справи та фінансів

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У ВУЗЛАХ МЕГАПОЛІСІВ

Розглянуто проблеми заторів у транспортній системі міста і шляхи їх подолання. Основна увага приділяється саме проблемі громадського пасажирського транспорту і введенню нових заходів, які можуть оптимізувати рух транспорту залежно від потреб населення, що приведе до економії коштів і часу, а також певним чином вплине на заторову ситуацію в місті в цілому.

Ключові слова: проблема заторів міського транспорту; моделювання транспортних потоків; оптимізаційна модель.

The problems of congestion in the transport system of the city and how to overcome them are considered. The focus is the issue of public passenger transport and the introduction of new measures that can optimize traffic depending on the needs of the population, resulting in savings of time and money, and in some way affect traffic situation in the city in general.

Key words: problem of urban transport congestion; modeling of traffic flows; optimization model.

Постановка проблеми. Серед критеріїв, що характеризують якість дорожнього руху, найсуттєвішими можна визначити зменшення надмірного рівня шуму й забруднення навколишнього середовища, мінімізацію витрат палива, а також запобігання утворенню та поширенню транспортних заторів.

Питання моделювання транспортного потоку в транспортних вузлах важливе та перспективне у вирішенні поточних транспортних проблем сучасних міст. Рух транспорту у великих мегаполісах світу зводиться до режиму “стоп-старт” [1]. Це створює проблеми як для водіїв, так і для пасажирів. Моделювання може здійснюватися в межах окремих вузлів (мікрорівень) або ж у масштабі всього міста (макрорівень), а самі рівні взаємопов’язані.

Складність дослідження транспортних потоків міст полягає у впливі різних чинників, серед яких: нестабільність і різноманіття самих потоків, суперечливість критеріїв управління дорожнім рухом і непередбачуваність дорожніх умов, а також складності у прийнятті та виконанні рішень щодо управління.

Удосконалення транспортної системи міста потребує розробки нових підходів з використанням як математичного моделювання, так і інших методів.

© І. Ю. Леснікова, Н. В. Халіпова, 2015

Моделювання як інструмент дослідження має такі цілі та завдання [2].

1. Моделювання транспортних потоків у масштабі міської агломерації спрямоване на виконання таких завдань, як аналіз: змін у роботі транспортної системи з уведенням нових елементів (наприклад, ліній метро, радіальних або кільцевих автомагістралей); змін у транспортній системі міста під час будівництва нового житлового району або утворення центру тяжіння відвідувачів; перерозподілу транспортних і пасажирських потоків у разі змін в елементах транспортної системи; впливу на роботу системи економічних чинників (плата за проїзд по магістралі або за в'їзд у центральну частину міста, введення зонного тарифу в метро тощо); ефекту від упровадження автоматизованих систем управління вуличним рухом.

2. Завдання локального характеру: аналіз ефектів від перепланування окремого перехрестя або групи перехресть, розширення проїжджої частини вулиці, зміни в організації руху на перетинах, оптимізація світлофорного регулювання, зміна умов пересадки пасажирів тощо.

3. Завдання аналізу роботи вулично-дорожньої мережі, пасажирського і вантажного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання транспортної ситуації може проводитися на будь-який розрахунковий строк – від оперативних завдань сьогодення до довгострокової (20–30 років) перспективи [2].

Історичний аналіз моделювання транспортних процесів і транспортної інфраструктури наведений у працях В. В. Семенова [3].

Основи математичного моделювання закономірностей дорожнього руху були закладені в 1912 р. російським ученим, професором Г. Д. Дубеліром [4].

Виділення математичних досліджень транспортних потоків у самостійний розділ прикладної математики та фактично започаткування Traffic Science – математичної теорії транспортних потоків – було здійснено Ф. Хейтом. У 1960 р. видано першу у світовій літературі монографію з теорії транспортних потоків, в якій систематизовано накопичені на той час результати досліджень.

Питання моделювання транспортних потоків докладно викладено в багатьох статтях, монографіях і навчальних посібниках вітчизняних та закордонних учених. Дослідженню транспортної інфраструктури, впливу транспортних потоків на різні аспекти сучасного життя, оптимізації транспортних мереж, прийняття управлінських рішень приділяється увага в наукових працях таких учених, як Т. В. Бутько, В. В. Скалозуб, В. Н. Лівшиць, П. А. Стенбринк, П. Н. Розенштейн-Родан, Є. Симоніс, П. Друкер, В. Ростоу, Дж. Бастіа, К. Ф. Даганзо та ін. [5–8]. Питання моделювання та оптимізації транспортних потоків висвітлено в [9–11]. Питання автоматизації управління рухом, використання навігаційно-інформаційних систем, розробки та впровадження системи автоматизованого контролю транспортних потоків з метою зведення до мінімуму кількості заторових ситуацій наведено в [12].

У моделюванні дорожнього руху історично склались два основних підходи – детерміністичний і стохастичний. В основі детермінованих моделей лежить функціональна залежність між окремими показниками, що характеризують рух автомобілів у потоці. Вони будуються за середніми значеннями та є простішими. Стохастичні моделі будуються з урахуванням випадкового розподілу показників, які характеризують окремі елементи прийнятого математичного опису процесу руху й можуть забезпечити

об'єктивніше відтворення різноманітних фрагментів дорожнього руху. В моделюванні використовують ЕОМ, що прискорює процес дослідження та дозволяє використовувати великі масиви вихідних даних.

Усі моделі транспортних потоків можна розбити на три класи: моделі-аналоги, моделі проходження за лідером, імовірнісні моделі.

У моделях-аналогах (макроскопічні моделі) рух транспортного засобу вподібнюється фізичному потоку (гідро- й газодинамічні моделі). У моделях проходження за лідером (мікроскопічні моделі) існує припущення про наявність зв'язку між переміщенням автомобілів і веденого головного в потоці.

У стохастичних моделях транспортний потік розглядається як результат взаємодії транспортних засобів на елементах транспортної мережі. Закономірності формування черг, інтервалів, завантажень тощо на смугах дороги мають імовірнісний характер.

Останнім часом у дослідженнях транспортних потоків стали застосовувати між-дисциплінарні математичні ідеї, методи й алгоритми нелінійної динаміки. Їхня доцільність обґрунтована наявністю в транспортному потоці стійких і нестійких режимів руху, втрат стабільності зі зміною умов руху, нелінійних зворотних зв'язків, необхідністю великої кількості змінних для адекватного опису системи [13–17]. Зміна напрямку транспортних потоків має дві фази:

- перша – виявлення передзаторових і заторових ситуацій;
- друга – включення відповідних позицій керованих знаків для обминання транспортом заторних ділянок.

Перша операція базується на визначенні середнього часу наявності автомобілів T_{np} у контрольованих перетинах, що розташовуються в зоні перехресть, де існує висока ймовірність затору.

Сама операція виявлення затору ґрунтується на перевірці співвідношення:

$$\frac{\sum_{i=1}^r \tau_{np}}{r} \geq C,$$

де τ_{np} – сумарний час наявності автомобілів протягом циклу, наведений в одній смузі;

r – кількість контрольованих циклів (3–5);

C – емпірична константа.

У разі рівності ідентифікується передзаторовий стан, за стійкого перевищення – заторовий. Перед початком другої операції – перемикання позицій керованих дорожніх знаків – робиться спроба розсмоктати затор збільшенням циклу до максимально можливого і виділенням максимального зеленого сигналу для заторових напрямків. Якщо спроба невдала, то на попередньому перехресті вмикається позиція керованого дорожнього знака, що відгалужує потік (частину потоку) на об'їзні шляхи.

Сучасні підходи, які використовуються для підтримки прийняття рішень у проектуванні та управлінні транспортними потоками в мегаполісах, поки що не вирішують питань взаємозв'язку міської агломерації та транспортної системи, координації власне транспортної системи з іншими аспектами функціонування міста, скажімо, розселення, екологія, економіка. Розвиток наукових підходів у даному напрямі потребує детальнішого дослідження й розвитку алгоритмів моделювання та розрахунку транспортних потоків в умовах взаємодії різних видів транспорту з урахуванням різних за своїм змістом критеріїв в оптимізації.

Мета статті – розвиток підходів для вдосконалення транспортної системи мегаполіса з використанням математичного моделювання взаємодії залізничного транспорту з наземними видами міського пасажирського транспорту. Критеріями оптимізації мають слугувати витрати на очікування пасажирами машин міського пасажирського транспорту (МПС), з одного боку, та витрати на експлуатацію цих машин – з іншого.

Виклад основного матеріалу. Для розв’язання поставлених задач були використані математичні методи, що дозволяють оптимізувати рух громадського транспорту в місті, сприяючи тим самим не тільки розвантаженню транспортної системи міста, але й отриманню позитивних економічних результатів, що виражається в економії коштів шляхом оптимізації руху громадського транспорту і взаємодії різних видів транспорту.

Особливістю більшості задач подібного типу є векторний характер показника ефективності i -го варіанта взаємодії, який можна привести до скалярного, використовуючи можливості експертної системи. Оптимальне рішення досягається за виконання умов:

$$E_i^* = a_1 X_{i1}^* \pm a_2 X_{i2}^* \pm \dots \pm a_r X_{ir}^* \pm \dots \pm a_p X_{ip}^* \rightarrow \min \quad (1)$$

та

$$\sum_{r=1}^p a_r = 1, X_{ir}^* = \frac{X_{ir}^e}{X_{ir}^e}, \quad (2)$$

де a_r – коефіцієнт, що визначає відносну важливість r -го параметра стосовно інших; X_{ir}^* , X_{ir}^e – значення r -го параметра відповідно для i -го та базисного (вихідного) варіантів взаємодії двох і більше видів транспорту.

Особливе значення у виборі варіанта взаємодії різних видів транспорту має врахування умов поїздки пасажирів. Для цього використовується таке поняття, як приведена довжина поїздки за ребром ij транспортного графу, тобто:

$$t_{ij} = t_{ij}^e \varphi_s$$

де φ_s – коефіцієнт, що враховує регулярність руху, зручність поїздки, посадки та висадки пасажирів та інші фактори з використанням s -го виду транспорту. Значення коефіцієнта φ_s для різних видів транспорту: тролейбус – 1,25; залізничний транспорт – 1,17; автобус – 1,48.

Для вивезення пасажирів, що прибувають до міста магістральними видами транспорту, необхідно розрахувати потрібний парк машин міського пасажирського транспорту (МПТ). В основу розрахунку покладено принцип надійності обслуговування пасажирів. У разі збільшення парку машин черги пасажирів у години пік можна ліквідувати, однак це пов’язано з великими витратами. Тому, використовуючи теорію масового обслуговування, визначають парк машин МПТ, що забезпечуватиме мінімум витрат і при цьому не перевищуватиме допустимий рівень очікування пасажирами МПТ.

Оптимізація режимів взаємодії залізничного та міського транспорту

Необхідно обрати оптимальний режим взаємодії залізничного та наземних видів міського пасажирського транспорту на головній станції в робочі дні. Середньодобова кількість пасажирів, що прибувають залізницею, дорівнює 12 000. Вивезення пасажирів

рів з привокзального майданчика здійснюється автобусом, тролейбусом і трамваєм. Середня місткість однієї одиниці міського транспорту – 70 пасажирів, середня вартість однієї машино-години – 5,6 у.г.о., а однієї пасажиро-години – 0,2 у.г.о.

Погодинний розподіл потоку пасажирів, що прибувають у місто залізницею, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Години доби	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12
% добового прибуття	8,2	14,3	14,1	8,0	4,5	4,0
Прибуття пасажирів	984	1716	1692	960	540	480

З 6 до 12 годин прибуває 6372 пасажирів, 53,1 % добового прибуття.

Оптимальна взаємодія міського транспорту із залізничним досягається, якщо сумарні приведені витрати, пов'язані з роботою міського пасажирського транспорту (МПТ) і чеканням пасажирів, мінімальні, тобто:

$$E = E_{ек} + E_{оч} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $E_{ек}$ – приведені витрати, пов'язані з роботою МПТ;

$E_{оч}$ – витрати, пов'язані з чеканням пасажирами вивезення з привокзальної площі.

Витрати, пов'язані зі зміною парку машин МПТ:

$$E_{ек} = B_{н-г} M T,$$

де $B_{н-г}$ – вартість однієї машино-години, у.г.о.;

M – парк машин МПТ.

Витрати, пов'язані з очікуванням вивезення пасажирів:

$$E_{оч} = B_{н-г} t_{оч} N(t),$$

де $B_{н-г}$ – вартість однієї пасажиро-години;

$t_{оч}$ – середній час очікування пасажиром машини МПТ під час вивезення з привокзальної площі;

$N(t)$ – середня кількість пасажирів, що вивозяться за період часу T .

Ураховуючи, що МПТ працює в умовах значних коливань пасажиропотоків, можуть виникати періоди, коли завантаження машин перевищує одиницю, тобто $p > 1$. Тому час очікування машини МПТ слід визначати за формулами:

$$\tau_{оч} = \beta \bar{T}, (p < 1),$$

$$\tau_{оч} = \beta \bar{T} + \frac{t}{2}(p - 1), (p > 1),$$

де β – параметр, що дорівнює 0,6 – 0,8;

\bar{T} – середній інтервал прибуття машин на площу;

p – рівень завантаження парку машин МПТ;

t – протяжність пікового періоду, коли завантаженість машин МПТ ($p > 1$).

Після підстановки значень $E_{ек}$ та $E_{оч}$ у формулу (3) отримаємо явне вираження показника ефективності режиму взаємодії МПТ і залізничного транспорту:

$$E = B_{n-r}MT + B_{n-r} \left\{ \beta \sum_{i=1}^k \frac{1}{M} N_i + \sum_{j=1}^n \left[\beta \frac{1}{M} + \frac{t_j}{2}(p_m - 1) \right] N_j \right\}, \quad (4)$$

де N_i, N_j – відповідно кількість пасажирів, що вивозяться з привокзальної площі у міжпікові та пікові періоди.

Очевидно, що показник ефективності залежить від парку машин МПТ і протяжності періоду T , що розраховується як:

$$T = \sum_{i=1}^k t_i + \sum_{j=1}^n t_j.$$

Аналітичні вирази для розрахунку оптимальних значень M і T дуже важкі, тому пошук M і T відбувається за допомогою перебирання варіантів.

Мінімальна кількість машин МПТ, що забезпечує вивезення пасажирів з привокзальної площі за період T , визначається за формулою:

$$M_{\min} = \frac{Nt}{T \beta_m},$$

де Nt – кількість пасажирів, що прибувають на привокзальну площу залізничним транспортом за період T ;

β_m – середня пасажиромісткість однієї машини МПТ.

На першому етапі розрахунків період T триває з 6:00 до 10:00, тобто $T = 4$ год, а $N_t = 5532$. Для цього періоду $M_{\min} \approx 19$ машин.

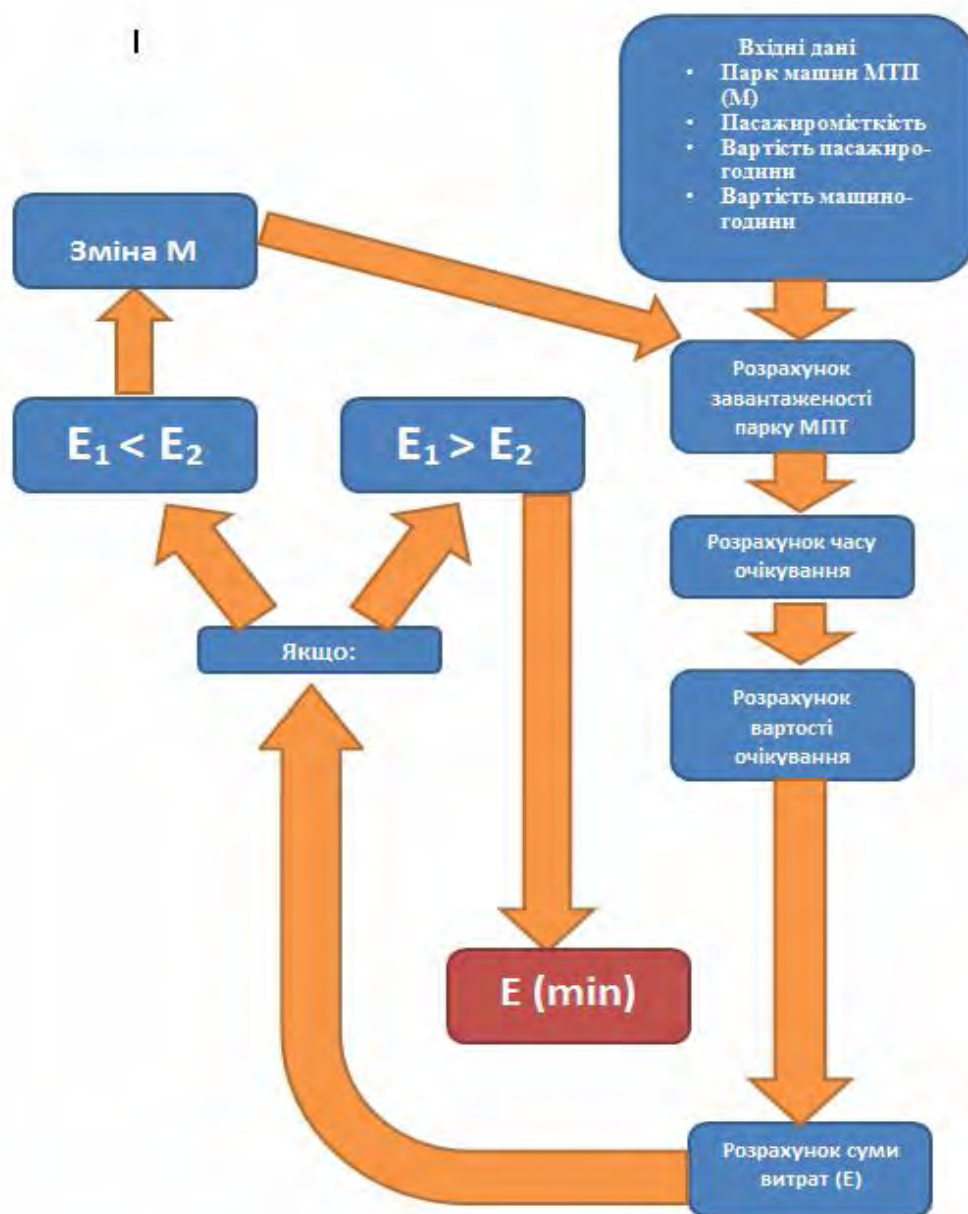


Рис. 1. Алгоритм розрахунку параметра ефективності

Проведемо розрахунок параметра ефективності за формулою (4), якщо $M = 19$ машин. Результати розрахунків наведено в табл. 2.

У процесі обробки інформації і проведення розрахунків використовуватиметься програмування функцій, що дозволить робити нові розрахунки з новими вхідними даними автоматично.

1	М (парк машин)=	24	<== Вхідні дані ==>	Пасажиромісткість b_m =	70
2					
3	Години доби	Прибуття пасажирів	Рівень завантаженості МТП	$t_{оч}$, год	$E_{оч}$, у.г.о.
4	6-7	984			
5	7-8	1716			
6	8-9	1692			
7	9-10	960			
8	Всього	5352	-	-	0,00
9					
10	β (коефіцієнт завантаження)=	0,7	<=====	Вхідні дані	
11	Вартість пасажиро-години=	0,2			
12	Вартість машино-години=	5,6			
13					
14	Е (економічна ефективність)=		<=====	Результати розрахунку	
15					

Рис. 2. Вхідні дані для роз'язку задачі

Рівень завантаженості парку машин МТП

$$p = N(t) / (M b_m)$$

За результатами попередніх розрахунків можна побачити, що деякі періоди часу завантаженість МТП становить $p > 1$. Розрахунки часу очікування в такому разі проводяться за формулою:

$$t_{оч} = \beta \bar{t} + \frac{t}{2} (p - 1), (p > 1),$$

З 9:00 починається період розсмоктування черги. Як показали спостереження за роботою привокзальних площ, у цей період

$$t'_{оч} = \frac{(t_{оч}^{\pi} + t_{оч}^{\text{H}})}{2},$$

де $t_{оч}^{\pi}$ – час очікування МТП в останню годину пікового періоду;
 $t_{оч}^{\text{H}}$ – середній час очікування в першу годину після пікового періоду.

Використовуючи дані з табл. 2 легко визначити загальні витрати, пов'язані з експлуатацією парку машин МТП та очікуванням пасажирів ($M=19$),

$$E(M) = E_{\text{ек}} + E_{\text{оч}}$$

$$E(19) = 5,6 \times 19 \times 4 + 211,39 = 636,99 \text{ у.г.о.}$$

Таблиця 2

Години доби	Прибуття пасажирів	Рівень завантаженості МТП	$t_{\text{оч}}$, год	$E_{\text{оч}}$, у.г.о.
6–7	984	0,74	0,037	7,25
7–8	1716	1,29	0,182	62,45
8–9	1692	1,27	0,318	107,63
9–10	960	0,72	0,177	34,07
Усього	5352	–	–	211,39

Збільшимо парк машин на 2 ($M = 21$) та виконаємо новий крок розрахунків. Результати розрахунків наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Години доби	Прибуття пасажирів	Рівень завантаженості МТП (p_{M-21})	$t_{\text{оч}}$, год	$E_{\text{оч}}$, у.г.о.
6–7	984	0,67	0,033	6,49
7–8	1716	1,17	0,117	40,49
8–9	1692	1,15	0,193	65,31
9–10	960	0,65	0,113	21,7
Усього	5352	–	–	133,55

Витрати зменшилися. Тому виконаємо новий крок розрахунків для парку машин $M = 24$. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Години доби	Прибуття пасажирів	Рівень завантаженості МТП (p_{M-24})	$t_{\text{оч}}$, год	$E_{\text{оч}}$, у.г.о.
6–7	984	0,59	0,029	5,74
7–8	1716	1,02	0,040	13,69
8–9	1692	1,01	0,043	14,70
9–10	960	0,57	0,036	6,97
Усього	5352	–	–	41,10

Витрати зменшилися. Виконаємо новий крок розрахунків для парку машин $M = 27$. Результати розрахунків наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Години доби	Прибуття пасажирів	Рівень завантаженості МТП (p_{M-24})	$t_{оч}$, год	$E_{оч}$, у.г.о.
6–7	984	0,52	0,026	5,10
7–8	1716	0,91	0,026	8,90
8–9	1692	0,90	0,026	8,77
9–10	960	0,51	0,026	4,98
Усього	5352	–	–	27,75

Подальше збільшення парку машин МПТ зменшує час очікування майже до 2 хв. Але такий режим взаємодії економічно не вигідний. Показник ефективності $E(27) = 632,55$ у.г.о. значно перевищує досягнутий на попередньому кроці його рівень. Таким чином, оптимальний режим взаємодії залізничного транспорту з МПТ забезпечується підведенням на привокзальну площу 24 машин за 1 год.

Визначення оптимальних інтервалів прямування машин МПТ

Оптимальні значення інтервалів прямування машин МПТ визначаються на одинадцяти маршрутах, з яких 1, 3, 5, 11 обслуговують привокзальну площу. Робочий парк машин МПТ становить 203 машини, час обороту та розміри пасажиропотоків наведено в табл. 6. Важливим резервом підвищення ефективності роботи міського пасажирського транспорту та його взаємодії із залізничним є оптимізація розподілу парку рухомого складу за окремими маршрутами.

Позначимо кількість пасажирів на i -му маршруті протягом періоду часу t через Π_i , час обороту машини на маршруті – t_i , місткість машини – B , витрати на кожен рейс – C_i , вартість однієї пасажиро-години – C_{n-2} , а робочий парк машин через – N .

$$\sum_{i=1}^m t_i x_i = Nt,$$

де m – кількість маршрутів;

x_i – кількість рейсів на i -му маршруті.

Таблиця 6

Номер маршруту	Час обороту, год	Кількість пасажирів, що перевозяться i -м маршрутом за 1 год
1	0,57	2500
2	0,50	320
3	0,92	1600
4	0,98	2500
5	1,17	3000
6	1,21	1200
7	1,23	1360
8	0,78	1360
9	0,93	1500
10	9,78	1040
11	0,93	1560

Витрати на перевезення пасажирів включатимуть витрати на виконання рейсів і витрати, пов'язані з очікуванням пасажирів.

З інтервалом руху $t : x_i$ середній час очікування становить $t : 2x_i$ (взято припущення про рівномірний потік машин), а витрати, пов'язані з очікуванням, дорівнюють

$$E_{очі} = C_{п-т} \Pi_i \frac{t}{2x_i}$$

Витрати за всіма маршрутами:

$$E = \sum_{i=1}^m C_i x_i + \frac{C_{п-т} t}{2} \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_i}{x_i} \quad (5)$$

Обмеження

$$\sum_{i=1}^m t_i x_i = Nt \sum_{i=1}^m \Pi_i = \Pi; \sum_{i=1}^m x_i \geq \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_i}{B} \quad (6)$$

Функцію (5) подамо в іншому вигляді, вважаючи, що витрати на експлуатацію однієї машини становлять

$$E = BtN + \frac{C_{п-т} t}{2} \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_i}{x_i} \quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що витрати на виконання рейсів не залежать від x_i , тобто розподілу рухомого складу за маршрутами, отже, для визначення мінімуму функції (7) досить мінімізувати витрати з очікування пасажирів, а саме:

$$T = \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_i}{\Pi} t_{очі} \rightarrow \min \quad (8)$$

де $t_{очі}$ – середній час очікування пасажиром машини на i -му маршруті.

Для визначення мінімуму функції (3.8) за наявності обмежень (6) складемо функцію Лагранжа:

$$F = \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_i}{\Pi} \frac{t}{2x_i} + \alpha \left(\sum_{i=1}^m t_i x_i - Nt \right), \quad (9)$$

де α – невизначений множник Лагранжа.

Досліджуючи функцію (9) на мінімум, знаходимо

$$x_i = \sqrt{\frac{\Pi_i t_i}{t_i} \frac{Nt}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\Pi_i t_i}}}$$

Тоді оптимальне значення інтервалу на i -му маршруті

$$I_i = \frac{60 \sum_{i=1}^m \sqrt{\Pi_i t_i}}{N \sqrt{\frac{\Pi_i}{t_i}}}$$

Середні витрати часу пасажирів на очікування з оптимальним розподілом парку машин

$$T = \sum_{i=1}^m \frac{\pi_i \sum_{l=1}^m \sqrt{\pi_l \tau_l}}{2N \sqrt{\frac{\pi_i}{\tau_i}}}$$

Таким чином, для скорочення втрат часу пасажирів в очікуванні машин міського пасажирського транспорту на маршрутах 1, 3, 5, 11 інтервали мають становити 3,8; 3,7; 2,4; 3,8 хв.

17	Номер маршруту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
18	Час обороту, год.	0,57	0,5	0,92	0,98	1,17	1,21	1,23	0,78	0,93	9,78	0,93
19	Кількість пасажирів, що перевозяться і-м маршрутом за 1 годину	2500	320	1600	2500	3000	1200	1360	1360	1500	1040	1560
20												
21												
22	Парк машин=	203										
23												
24												
25	I (інтервал руху)=	3,8	11,3	3,7	2,9	2,4	3,8	3,5	4,4	3,8	1,4	3,8
26												

Рис. 3. Результати розрахунку інтервалів спрямування на маршрутах

Необхідно провести оцінку відносного скорочення часу очікування пасажирів від оптимального розподілу машин МПТ порівняно з пропорційним розподілом ресурсу машино-годин.

Зазвичай розподіл ресурсу машино-годин парку МПТ ведеться прямопропорційно витратам пасажиро-годин на і-му маршруті, тобто

$$x_{mi} = N \frac{\pi_i \tau_i}{\sum \pi_i \tau_i}$$

Таблиця 7

Маршрут	Кількість необхідних рейсів	Інтервал руху на кожному маршруті
1	$x_{n1} = 17,16$	$I_{n1} = 3,5$ хв
2	$x_{n2} = 1,93$	$I_{n2} = 31$ хв
3	$x_{n3} = 17,6$	$I_{n3} = 3,4$ хв
4	$x_{n4} = 30$	$I_{n4} = 2$ хв
5	$x_{n5} = 42,8$	$I_{n5} = 1,4$ хв
6	$x_{n6} = 17,6$	$I_{n1} = 3,4$ хв
7	$x_{n7} = 17,16$	$I_{n7} = 3$ хв
8	$x_{n8} = 17,16$	$I_{n8} = 4,7$ хв
9	$x_{n9} = 17,16$	$I_{n1} = 3,6$ хв
10	$x_{n10} = 9,23$	$I_{n10} = 6,5$ хв
11	$x_{n11} = 17,6$	$I_{n11} = 3,4$ хв

У разі оптимального розподілу парку машин МПТ час очікування пасажирами $T_0 = 466$ пасажиро-годин.

Із пропорційним розподілом: $T_n = 544$ пасажиро-годин.

Відносне скорочення часу очікування пасажирами машин МПТ становить:

$$\Delta = \frac{T_n - T_0}{T_0} 100 \% ; \Delta = 16,7 \% .$$

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. В статті розглянуто актуальні питання організації та управління процесами функціонування транспортної мережі міста, наведено приклад розрахунку оптимальної роботи транспортного комплексу, що функціонує у місті.

Запропоновано модель взаємодії залізничного та міського пасажирського транспорту для оптимізації ввезення пасажирів із привокзальної площі в години пік. Оптимізація даної операції містить у собі ідею, що витрати на очікування пасажирами машин МПТ і витрати на експлуатацію цих машин мають зводитися до мінімуму.

На основі запропонованого алгоритму з метою отримання ефективного розв'язку з урахуванням заданих вхідних даних визначається парк машин МПТ, за якого забезпечуються оптимальні (мінімальні) витрати на очікування міського транспорту і його експлуатацію.

У ході проведення розрахунків було визначено, що найбільшій економічній ефективності із заданими вхідними даними можна досягти з парком машин МПТ, що становить 24 машини, тоді витрати на очікування транспорту та його експлуатацію будуть мінімальними. Також з'ясовано, що інтервали прямування машин МПТ за такого розподілу для скорочення витрат часу пасажирів в очікуванні машин міського пасажирського транспорту на маршрутах 1, 3, 5, 11, що обслуговують привокзальну площу, мають становити 3,8; 3,7; 2,4; 3,8 хв. Додатково визначено інший (оптимальний) тип розподілу парку машин МПТ, що може дати більшу ефективність на цих маршрутах. Порівнюючи результати, отримані з пропорційним та оптимальним розподілами, відносне скорочення часу очікування пасажирами машин МПТ становить 16,7 %.

У статті проаналізовано проблеми створення заторів у транспортній системі міст і шляхи їх подолання на підставі оптимізації взаємодії різних видів транспорту. Основна увага приділяється саме проблемі громадського пасажирського транспорту і введенню нових заходів, які можуть оптимізувати рух транспорту залежно від потреб населення, що приведе до економії коштів і часу, а також певним чином вплине на ситуацію з утворенням заторів у місті в цілому. Аналіз основних причин виникнення заторів на дорогах та шляхів їх подолання, закладені основи для розробки математичних моделей, алгоритмів і методів розподілу пасажирських потоків у містах, мінімізації кількості пасажирських транспортних засобів на маршрутах, визначення раціональних параметрів маршрутної мережі міського транспорту мають служити підґрунтям для створення гнучких графіків руху громадського транспорту.

Список використаних джерел:

1. Sipress A. Studying the ebb and flow of stop-and-go; Los Alamos Lab using cold war tools to scrutinize traffic patterns / A. Sipress // Washington post. – Thursday, August 5, 1999.

-
2. Осетрін М. М. Основні принципи створення транспортної моделі міста [Електронний ресурс] / Осетрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І. – Режим доступу : <https://www.bespalov.me>
 3. Семёнов В. В. Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры [Электронный ресурс] / В. В. Семёнов, А. В. Ермаков // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2015. – № 3. – Режим доступа : <http://www.library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>
 4. Дубелир Г. Д. Планировка городов / Дубелир Г. Д. – Петербург, 1910.
 5. Бутько Т. В. Формування моделі організації пасажиропотоків при здійсненні пересадок на залізничному вокзалі з використанням колективного інтелекту / Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 2. – С. 57–67.
 6. Скалозуб В. В. Многокритериальные модели задачи анализа транспортных сетей с учетом специализированных свойств носителей потоков / В. В. Скалозуб, Л. А. Паник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 15–21.
 7. Daganzo C. F. Remarks on Traffic Flow Modeling and its Applications / C. F. Daganzo // Dept. of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley, N. Y., 1999.
 8. Daganzo C. F. Macroscopic Relations of Urban Traffic Variables: Bifurcations, Multivaluedness and Instability / C. F. Daganzo, V. Gayah, E. Gonzales // Transportation Research Part B: Methodological. – 2011. – № 45 (1). – 278–288.
 9. Оптимальное регулирование автотранспортных потоков / А. Б. Киселев и др. // Ломоносовские чтения : научная конф. Секция механики. Апрель 2005 года. Тезисы докладов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – С. 115–116.
 10. Моделирование автотранспортных потоков методами механики сплошной среды / А. Б. Киселев и др. // Ломоносовские чтения : научная конф. Секция механики. Апрель 2007 года. Тезисы докладов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2007.
 11. Регирер С. А. Математическая модель взаимодействия движущихся коллективов: общественного транспорта и пассажиров / С. А. Регирер, Н. Н. Смирнов, А. Е. Ченчик // Автоматика и телемеханика. – 2007. – Вып. 7. – С. 116–131.
 12. Приходько В. М. Современные системы управления дорожным движением в мегаполисах [Электронный ресурс] / В. М. Приходько // Интеллектуальные и телематические автоматизированные системы управления дорожным движением : сборник докладов 7-й Международной конференции. – 2006. – Режим доступа : http://www.adf.spbgasu.ru/Conference2006/section_3.pdf
 13. Фролов К. В. Формирование показателей и нормативов качества городских автобусных перевозок : дисс. ... канд. экон. наук : спец. 08.00.05 / К. В. Фролов. – М., 2005. – 156 с.
 14. Сорокин А. А. Моделирование городских пассажирских перевозок : дисс. ... канд. экон. наук : спец. 08.00.13 / А. А. Сорокин. – Ставрополь, 2005. – 198 с.
 15. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков / В. И. Швецов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3–46.
 16. Моделювання параметрів транспортної мережі в середовищі автоматизованої системи пошуку оптимальних рішень / В. Б. Мокін та ін. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : міжнародний науково-технічний журнал. – 2010. – № 2 (18). – С. 20–24.
 17. Прокудін Г. С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах : монографія / Г. С. Прокудін. – К. : НТУ, 2006. – 224 с.