

а це означає, що оптимізації часу перебування товарів на терміналі та якості їх матеріального стану забезпечена методами векторної оптимізації параметрів. Автори здійснюють редукцію розмірності технічних параметрів транспортної системи, після чого виконана оптимізація дискретизованих параметрів системи.

Використання результатів досліджень цієї статті для оптимізації транспортних перевезень та термінальної переробки вантажів підвищить продуктивність транспортних перевезень і мінімізує економічні втрати через пошкодження вантажів. Це дозволить вантажовласникам отримати додаткові доходи та підвищить конкурентноспроможність товарів на ринку транспортних послуг.

**транспортні системи, економічна ефективність, математичне моделювання, ймовірнісний підхід, оптимізація параметрів**

*Одержано (Received) 02.09.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.09.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023*

УДК 656.025.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.201-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.201-212)

**С.М. Пашкевич**, ст.викл., **В.М. Никончук**, доц., д-р екон. наук, **М.Є. Кристопчук**, доц., канд. техн. наук

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна*

## Оцінка пропускної спроможності міської дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування

Щоб покращити оцінку пропускної спроможності мережі для певної міської дорожньої системи, передбачається, що в моделі оцінки пропускної здатності мережі слід враховувати вплив стратегій управління паркуванням у місцях призначення. У цьому дослідженні представлена розширена модель пропускної спроможності дорожньої мережі, яка враховує як кількість паркувальних місць, так і тарифи на паркування в кожній зоні руху. Модель пропускної здатності мережі сформульована як дворівнева проблема програмування з максимізацією загальної генерації поїздок на верхньому рівні та проблемою комбінованого розподілу поїздок і призначення трафіку (STDTA) на нижньому рівні. Щоб обґрунтовано охарактеризувати вплив ціноутворення на паркування та затримки паркування через ефект заторів, у моделі STDTA бере участь два класи попиту на подорожі. Надано ефективний і практичний алгоритм розв'язку дворівневої моделі потужності мережі. Чисельні експерименти показують переваги запропонованої моделі, а також демонструють вплив пропозиції та ціноутворення паркувальних місць на результати оцінки пропускної здатності дорожньої мережі.

**пропускна здатність, транспортна мережа, парковка, показники міської маршрутної системи**

**Постановка проблеми.** Швидке зростання попиту на пересування автомобілем у містах призводить до збільшення заторів і дефіциту паркувальних місць. Отже, правильно оцінити пропускну здатність міської дорожньої мережі довгий час було важливою метою транспортного проекту планування та оцінювання інфраструктури. У літературі для дослідження проблеми пропускної спроможності більшість дослідницьких мереж вимірюють лише враховуючи обмеження пропускної спроможності міського транспорту [1, 2]. Однак, деякі дослідження вказують на використання в аналізі дорожньої мережі залучення стратегій управління паркуванням [3, 4], яке матиме значення для належної координації ресурсів паркування та попиту на автомобільні перевезення на рівні дорожньої мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Концепція пропускної спроможності мережі визначається як максимальний попит на пересування, який може бути

розподілений на транспортну мережу без порушення пропускної спроможності будь-якого окремого компоненту (наприклад, зв'язок і перетин) [5]. Пропускна здатність мережі була визнана важливим показником для оцінки ефективності загальномережевої системи міського транспорту. Ця концепція широко використовується в багатьох сферах, таких як аналіз надійності пропускної здатності [6], проблема проектування мережі [7], аналіз гнучкості пропускної здатності [8] і аналіз вразливості пропускної здатності [9]. Максимальна пропускна спроможність оцінювалась шляхом поступового розподілу загального попиту на перевезення пасажирів і вантажів, в якому кожна ділянка завантажується рівноважним розподілом руху [11].

Концепція резервної пропускної спроможності запропонована в [1] і розширена в дослідженні мережі з сигнальним управлінням [12-14]. Оскільки модель резервної пропускної спроможності передбачає незмінний розподіл попиту на РП, що не є практичним для мереж у регіонах, що розвиваються, в оцінці пропускної спроможності мережі було використано змінний попит на РП [2, 5, 15]. З іншого боку, оскільки розподіл загального попиту на пасажирські перевезення (порівняно з попитом на автомобільні перевезення) є відносно стабільним, мультимодальний вибір був розширений на основі концепції резервної пропускної спроможності [16, 17], в якій загальний попит з фіксованим розподілом розбивається на кілька змінних таблиць попиту на перевезення, які окремо пов'язані з різними видами перевезень. Крім того, в інших дослідженнях вивчався вплив проникнення на ринок вдосконаленої системи формування пасажирів (ATIS) на пропускну спроможність дорожньої мережі [18]. Лише обмежена кількість досліджень стосується впливу пропозиції парковок або цін на паркування на пропускну здатність транспортної мережі [3, 4, 19].

При оцінці пропускної здатності міської дорожньої мережі, обмеження паркування є подвійними: (1) пропозиція паркування, яка визначає як верхню межу попиту на паркування, так і час паркування через рівень заторів у кожному пункті призначення поїздки; (2) ціноутворення за паркування, яке визначає плату за паркування в кожній зоні призначення. Зауважимо, що верхню межу попиту на паркування можна розглядати як місткість паркування, яка обмежує зростання попиту на пересування автомобілями, що є такою ж, як і роль пропускної здатності мережі. Передбачається, що час паркування та плата в місцях призначення впливатимуть на вибір пересувань деякими подорожуючих, що призводить до перерозподілу мережі попиту на пересування (O-D) по всій мережі. Згідно з існуючими зарубіжними дослідженнями [19] і [4] розглядають лише вплив місткості паркування на пропускну спроможність всієї мережі, і, таким чином, зміни в структурі попиту на послуги O-D не розглядалися. Незважаючи на те, що [3] враховували як пропускну спроможність парковок, так і вартість паркування в пунктах призначення, було зроблено припущення, що весь розподіл поїздок O-D залежить лише від вартості проїзду (зокрема, від показників доступності) між парою O-D, тобто рівень перевантаженості пунктів призначення не розглядався. Тим не менш, час паркування через рівень завантаженості пункту призначення досліджувався в контексті проблем вибору паркування [20-23]. Час паркування (пошуку) часто визначається як збільшена функція від попиту на паркування, поділена на пропускну спроможність паркінгу в зоні призначення. [24]

Таким чином, існуючі дослідження пропускної здатності дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування та цін на паркування мають наступні недоліки: (1) лише деякі фактори були залучені до оцінки пропускної здатності мережі, тому вплив стратегій управління міським паркуванням не може бути оцінений всебічно [19]; (2) недостатньо повно характеризують вплив заторів у пунктах призначення на всю мережу структури попиту на поїздки [3], що може призвести до непрактичної

структури попиту на поїздки для максимальної пропускної спроможності мережі; (3) не враховує різницю між автотуристами і, таким чином, призводить до недооцінки [4] або переоцінки [24] загальної пропускної здатності мережі.

**Результати дослідження.** У даному дослідженні було охарактеризовано пропозицію паркувальних місць, так і ціноутворення на паркування що було включено до комбінованої моделі розподілу поїздок і розподілу транспортних потоків (STDTA) [25], яка включає два класи попиту на автомобільні пересування, тобто попит на вільні автомобільні пересування та змінний попит. Під фіксованим попитом ми розуміємо водіїв, які приїжджають на роботу, і мають стабільну схему руху під впливом вартості паркування в місці призначення, а під змінним попитом - водіїв, які не приїжджають на роботу, і мають змінну схему руху в залежності від рівня заторів як на дорогах, так і в районах призначення.

Для полегшення представлення основних ідей у даному дослідженні зроблено наступні припущення:

(а) Задіяні два класи попиту на подорожі з боку автомобільних пересувань, тобто постійний попит і змінний попит. Фіксований попит пов'язаний із щоденним попитом на подорожі, які мають заздалегідь визначені пункти відправлення та призначення, наприклад, рух на роботу й назад. Структура (кількість поїздок і просторовий розподіл) фіксованого попиту буде стабільною незалежно від зміни перешкод для пересування або вартості проїзду від пункту відправлення до пункту призначення. Навпаки, пункти призначення змінного попиту є взаємозамінними з точки зору завантаженості та вартості перевезень, а отже, такий вид попиту (наприклад, шопінг та відпочинок) демонструє гнучку структуру попиту.

(б) Пасажири з фіксованим попитом можуть змінювати лише маршрути для мінімізації індивідуальних витрат на поїздки, що характеризується принципом рівноваги користувача. Пасажири зі змінним попитом можуть змінювати як маршрути, так і пункти призначення для мінімізації загальних витрат на поїздки, що характеризується комбінованою моделлю розподілу поїздок і розподілу трафіку.

(с) Попит на паркування є відношенням загального попиту на місце призначення в зоні призначення, і він обмежений простором паркувальних засобів.

(д) Пасажири мають достатню мережеву інформацію, щоб вибирати маршрути подорожей у спосіб рівноваги користувача.

(е) Через статичну природу моделі транспортний потік вважається в стаціонарному стані, а період дослідження вважається одна година, наприклад, ранковий пік.

Оскільки як рівень, так і розподіл змінного попиту змінюються залежно від транспортної ситуації в транспортній мережі, корисність між пунктами відправлення та призначення буде використана для отримання схеми потоку змінного попиту.

$$P(j|i) = \frac{\exp\{-\theta(\tau_{ij} + M_j)\}}{\sum_{n \in J} \exp\{-\theta(\tau_{in} + M_n)\}}, \quad \forall i \in I, \quad (1)$$

де  $\theta$  – дисперсійний параметр, який відображає траєкторію руху

У рівнянні (1) мінімальна вартість проїзду  $\tau_{ij}$  визначається структурою транспортного потоку по всій мережі в контексті заторів. Яка отримана за допомогою рівноважної комбінованої моделі розподілу поїздок і розподілу транспортних потоків.

Пропозиція паркомісць та ціноутворення на паркування. Нехай  $q_j$  – загальна кількість місць на парковці  $j \in J$  в умовах рівноваги, а  $k_j$  – пропускна спроможність

парковки  $j$ . Кількість місць на парковці  $q_j$  визначається множенням загального попиту на проїзд,  $D_j$ , на ділянці  $j$  на тариф за паркування  $\rho_j$ , тобто,

$$q_j = \rho_j \cdot D_j, \forall j \in J. \tag{2}$$

Крім того, час пошуку парковки становить опукла функція заповнюваності паркінгу  $q_j$  та пропускної здатності паркінгу  $k_j$  [26]. Таким чином, функція часу пошуку парковки  $S_j(q_j)$  становить:

$$S_j(q_j) = \frac{\mu_j S_j}{1 - q_j / k_j}, \forall j \in J, \tag{3}$$

де  $s_j$  – середній час пошуку в зоні призначення  $j$  при низькій заповнюваності паркінгу, який називається часом пошуку при низькій заповнюваності.  $\mu_j$  – константа, що показує, як водії ставляться до інформації про заповнюваність паркінгу.

Погодинна вартість паркування на ділянці  $5j$  позначається  $\pi_j$ . Таким чином, водії, які обирають ділянку  $j$  як місце призначення, платитимуть  $\pi_j$  доларів за годину. Таким чином, узагальнені витрати в пункті призначення,  $M_j$ , для мандрівників, які обирають район  $j$  як пункт призначення, задаються формулою

$$M_j = \pi_j + \eta \cdot S_j(q_j), \tag{4}$$

де  $\eta$  - цінність часу для пасажирів. З точки зору обмеження пропозиції парковок, заповнюваність парковок не повинна перевищувати місткість парковок в зоні  $i$ .

Для відображення поведінки пасажирів буде використана модель комбінованого розподілу поїздок і призначення руху (CTDTA) [25]. Зокрема, в дорожній мережі розглядається як фіксований попит, так і змінний попит. Пасажири з фіксованим попитом можуть вільно обирати свої маршрути, в той час як пасажери зі змінним попитом можуть вільно обирати як маршрути, так і пункти призначення. Обидва типи подорожуючих прагнуть мінімізувати власні транспортні витрати на всю поїздку, враховуючи пропозицію паркування та ціни на паркування в пунктах призначення:

$$\min Z_L(q, f, h) = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx + \frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} (\ln q_{ij} - 1) + \sum_{j \in J} q_j \pi_j + \eta \sum_{j \in J} \int_0^{q_j} S_j(y) dy, \tag{5}$$

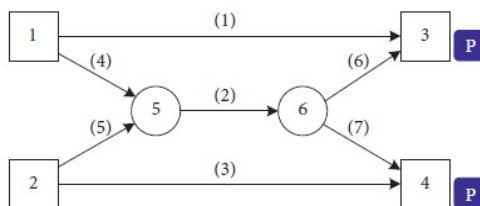


Рисунок 1 – Приклад мережі

Джерело: [25]

Як показано на (рис1) існує 4 О-Д пари від початкових вузлів 1 і 2 до вузлів призначення 3 і 4. Функція доріг загального користування використовується як функція продуктивності зв'язку, задана як  $t_a(v_a) = t_a^0 [1 + 0.15(v_a / C_a)^4]$ . Характеристики всіх зв'язків у мережі наведено в таблиці 1. У таблиці 2 наведено фіксований попит у мережі. Параметри, пов'язані зі стратегіями паркування в пунктах призначення,

перераховані в таблиці 3. Крім того, значення часу  $\eta$  встановлено на 1,0, а параметр дисперсії  $\theta$  для вибору пункту призначення встановлено на 0,5.

Таблиця 1:

Характеристики з'єднання для прикладу мережі рис 1.

Показник	1	2	3	4	5	6	7
$t_a^0$	10	5	12	4	4	5	4
$C_a$	100	120	80	80	50	50	50

Таблиця 2:

Фіксований попит на подорожі в мережі

3	4	$O_i$		
1	30	20	50	
2	40	20	60	
$\bar{D}_i$	70	40	Загальний попит 110	

### Параметри стратегії паркування в пунктах

**Обговорення результатів досліджень.** Щоб побачити переваги запропонованої моделі, результат запропонованої моделі порівнюється з іншими моделями пропускної здатності мережі в літературі [3, 4, 19, 24]. Експерименти проводяться на прикладі рис 1. Оскільки моделі в літературі на цю тему були проведені для різних задач за різних передумов, недоцільно порівнювати результати цих моделей напряму. Тому було розглянуто три ситуації з літератури: (1) без змінного попиту на O-D (тобто модель резервних потужностей у цій роботі); (2) без змінних витрат на призначення; (3) без фіксованого попиту на O-D.

Для ситуації без змінного попиту O-D модель резервної потужності мережі [1] модифікується шляхом додавання обмеження пропозиції паркування. Передбачається, що потоки O-D зростають після фіксованого розподілу O-D, і вплив заторів на дорогах і тарифів на паркування в місцях призначення не враховується. Резервна пропускна здатність є найбільш класичною концепцією O-D, яка широко застосовувалася для оцінки пропускної спроможності транспортної мережі. Така концепція була використана в [19] і [4]. Результати моделі резервних потужностей і запропонованої моделі наведені в таблицях 4 і 5 відповідно.

З результатів у таблицях 4 і 5 пропускна здатність мережі повинна складати 137,5 за моделлю резервної потужності, тоді як за запропованою моделлю вона оцінюється як 222,35. В обох моделях потоки на ланках 5 і 6 досягають пропускної здатності, а ланки є вузькими місцями, що обмежують зростання загального попиту на пересування в мережі. Крім того, в результатах моделі резервної ємності жоден паркінг не насичений; проте в результатах запропонованої моделі місткість паркування в пункті призначення 3 використовується повністю. Очевидно, що пропускна спроможність мережі за моделлю резервної пропускної спроможності є нижчою за пропускну спроможність мережі за запропованою моделлю. Це означає, що резервна пропускна спроможність має тенденцію давати занадто консервативні результати [8], оскільки вона підсумовує незмінну структуру попиту на перевезення. Чистий попит на перевезення в масштабах всієї мережі буде обмежений у своєму зростанні, якщо потік на будь-якій окремій ланці буде відповідати її пропускній спроможності. Таким чином, частина пасажирів може змінювати місце призначення відповідно до вартості паркування та наявності вільних місць у місці призначення. У цьому прикладі обмеження на загальний попит походять від пропускної спроможності на лініях 5 і 6, місткості парковок у пункті призначення 3, а також від вартості проїзду з O-D (м'яке обмеження).

Таблиця 4: Результати моделі пропускної спроможності резервної мережі.

O-D	Типи попиту		Попит в пункті призначення			Посилання Пункт призначення	Потік	
	посилань	Співвідношення V/C Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування		Потік			
			Фіксований попит	Додатковий попит				
1-3	30	7.50	3	87.50	65.6	1	37.50	0.375
1-4	20	5.00	4	50.00	37.5	2	75.00	0.625
2-3	40	10.00				3	25.00	0.312
2-4	20	5.00				4	25.00	0.312
Всього	110	27.50				5	50.00	1.000
						6	50.00	1.000
						7	25.00	0.500
Пропускна здатність мережі				137.50 (мультиплікатор попиту $\times$ 1.25)				

Таблиця 5: Результати запропонованої моделі пропускної здатності дорожньої мережі.

O-D	Дьом nd типи		Пункт призначення	Попит на Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Посилання	Потік	Співвідношення V/C
	Фіксований попит	Додатковий попит						
1-3	30	53.33	3	133.33	100.0	1	83.33	0.833
1-4	20	6.91	4	65.13	48.85	2	26.91	0.336
2-3	40	10.00				3	38.21	0.478
2-4	20	18.21				4	50.00	1.000
Пропускна здатність мережі					198.46	5	76.01	0.611

На рис. 2 порівняно моделі максимального попиту для різних моделей пропускної спроможності мережі ("Резервна пропускна спроможність", "Без вартості призначення" та "Без фіксованого попиту"). Графік максимального попиту з моделі "Резервна потужність" є досить консервативним, оскільки він чітко відповідає фіксованому попиту на ВРП, що існує в мережі.

Дана модель дає помірний результат для оцінки пропускної спроможності мережі. Порівняно з моделлю "Резервна пропускна здатність", потенціал пропускної здатності мережі буде розвиватися між O-D (1-3) та O-D (2-4) після того, як ланки 5 та 6 досягнуть своєї пропускної здатності. Загальний попит продовжуватиме зростати доти, доки не буде досягнута пропускна спроможність паркувального майданчика в пункті призначення 3. Крім того, зауважте, що попит між O-D (1-4) не дуже зростає.

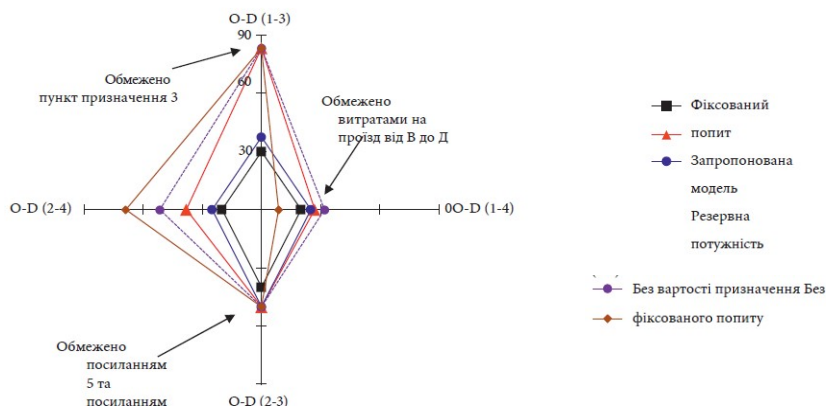


Рисунок 2 – Структура попиту O-D при максимальному потоці за різними моделями пропускної здатності мережі

Джерело: розроблено авторами

Оскільки вартість проїзду між O-D (1-4) значно вища, ніж між O-D (1-3), більшість змінного попиту на проїзд з пункту відправлення 1 хотіли б обрати вузол 3 як пункт призначення для діяльності, що не пов'язана з поїздками на роботу. Оскільки попит між O-D (1-3) не може зростати (обмежений місткістю парковок), попит на O-D (1-4) також не зростатиме. Таке обмеження спричинене різницею у вартості проїзду

між парами O-D, яка називається м'яким обмеженням, як згадувалося раніше. Отже, запропонована модель може охопити більш комплексну ситуацію порівняно з моделями, описаними в літературі, і, таким чином, здатна краще оцінити проблему пропускної спроможності дорожньої мережі.

На основі запропонованої моделі пропускної здатності мережі, поєднаної зі стратегіями паркування, було проаналізовано вплив пропозиції паркомісць та цін на паркування на пропуску здатність мережі. Для цього приведено 6 прикладів, перелічених у Таблиці 6-8.

Таблиця 6

Приклади	Опис прикладів
0	Базовий сценарій
1	Розширення паркомісць лише в пункті призначення 3
2	Збільшити кількість місць для паркування лише в пункті призначення 4
3	Збільшити кількість місць для паркування в обох пунктах призначення
4	Підвищення вартості паркування лише в одному пункті призначення
5	Підвищити вартість паркування в обох пунктах призначення в однаковій пропорції
6	Підвищити вартість паркування в обох пунктах призначення в однаковій пропорції

Таблиця 7

## Результати пропускної здатності мережі при різній місткості парковок.

Напрямок	Місткість паркінгу ( $k_3, k_4$ )							
	Базовий приклад: (100, 80)		Приклад 1: (1000, 80)		Приклад 2: (1000, 80)		Приклад 3: (1000, 80)	
	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки
3	100.00	133.33	112.50	150.00	100.00	133.33	112.50	150.00
4	48.85	65.13	53.90	71.87	48.85	65.13	53.90	71.87
Пропускна здатність мережі	198.46		221.87		198.46		221.87	
Потужностей на ланці 5 та ланці 6**								
*Прив'язка обмеження	Кількість місць для паркування в пункті призначення 3		Пропускна спроможність на ланці 1		Кількість місць для паркування в пункті призначення 3		Пропускна спроможність на ланці 1	

\*\*Обмеження максимальної пропускної здатності мережі. \*\*Обмеження пропускної здатності для ланки 5 та ланки 6 активні в усіх прикладах

Таблиця 8

## Результати пропускної здатності мережі за різних стратегій ціноутворення на паркування.

Напрямок	Ціни на паркування ( $\lambda_3, \lambda_4$ )							
	Базовий приклад: (4.0, 5.0)		Приклад 4: < (8.0, 5.0)		Приклад 5: (8.0, 10.0)		Приклад 6: (8.0, 9.0)	
	Попит на паркування	Вартість паркування	Попит на паркування	Вартість паркування	Попит на паркування	Вартість паркування	Попит на паркування	Вартість паркування
3	100.00	8.00	100.00	12.00	100.00	12.00	100.00	12.00
4	48.85	9.12	80.00	11.00	42.98	13.87	48.85	13.12
Пропускна здатність мережі	198.46		240.00		190.65		198.46	

У Прикладі 1 збільшується лише кількість паркомісць у пункті призначення 3 (зі 100 до 1000). У порівнянні з базовим прикладом, загальна пропускна здатність мережі збільшується з 198,46 до 221,87. Одне із зв'язуючих (або активних) обмежень змінюється з пункту призначення 3 на пункт 1. Це означає, що загальна пропускна спроможність у базовому прикладі обмежена пропускну спроможністю парковок у пункті призначення 3. Розширення паркувальних місць у таких пунктах призначення може ефективно підвищити пропуску здатність всієї мережі.

У Прикладі 2 збільшується лише кількість місць для паркування в пункті призначення 4 (з 80 до 1000). Однак, загальна пропускна здатність мережі не збільшується (на практиці це може виглядати як неочевидні зміни). Це пов'язано з тим, що пропозиція паркомісць на кінцевих пунктах все ще залишається активною. Розширення потужностей на інших напрямках матиме незначний вплив на загальну пропуску здатність мережі.

У Прикладі 3 кількість місць для паркування в пунктах призначення 4 та 5 збільшується до 1000. Це призводить дотакій ж загальної пропускної спроможності мережі, як і за Прикладом 1. Це означає, що якщо необхідно збільшити пропускну спроможність мережі, то це має стосуватися лише тих напрямків, обмеження пропускної спроможності яких пов'язані з максимальним загальним попитом. Інвестиції в необов'язкову пропозицію паркомісць матимуть незначний внесок у загальну пропускну спроможність мережі. Немає необхідності надмірно розширювати паркувальні потужності. З іншого боку, ігнорування місткості парковок може призвести до переоцінки пропускної здатності транспортної мережі.

У Прикладі 4 підвищено вартість паркування лише в пункті призначення 3 (з 4,0 до 8,0). Однак загальна пропускна здатність мережі значно збільшується (до 240,0). Обидва пункти призначення є насиченими, тому загальний попит на поїздки більше не може зростати. Зокрема, вартість паркування (складається з вартості паркування та часу пошуку місця для паркування) для пунктів призначення 3 та 4 змінюється з 8.00 до 9.12, до 12.00 та 11.00, відповідно. Це призводить до зростання частки пасажирів, які обирають пункт призначення 4. Отже, попит на пункт призначення 4 може продовжувати зростати, доки не буде досягнута пропускна спроможність паркінгу.

У Прикладі 5 підвищено вартість паркування до 200% для обох напрямків. Загальна пропускна здатність мережі зменшується несуттєво. Зміна ціни на паркування призводить до перерозподілу структури попиту на послуги паркування. Відповідно до вартості паркування, велика частка пасажирів (тільки для змінного попиту) схильна обирати пункт призначення 3. Отже, попит на пункт призначення 4 не досягне такого рівня, як у базовому прикладі, через модель м'якого обмеження на O-D (1-4) та O-D (2-4).

У Прикладі 6 збільшено ціни на паркування на ту ж саму величину (на 4,0). Згідно з нашою моделлю, пропускна спроможність мережі пропускна здатність якої залишається незмінною, незважаючи на те, що вартість паркування сильно змінюється. На практиці можна вважати, що така зміна вартості паркування має незначний вплив на пропускну спроможність всієї мережі.

Таким чином, коригування стратегії ціноутворення на паркування для обраних місць призначення матиме очевидний вплив на пропускну спроможність транспортної системи. Однак підвищення цін на паркування у всіх пунктах призначення разом може призвести до невеликого ефекту для підвищення пропускної спроможності мережі.

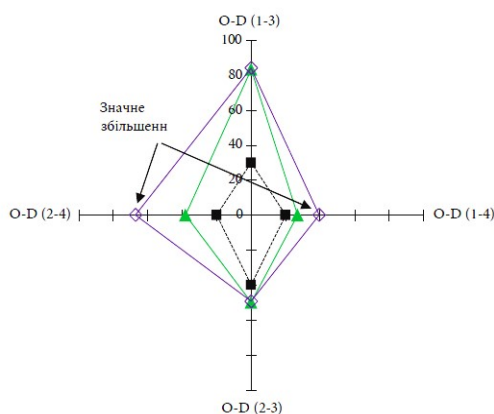


Рисунок 3 – Структура попиту на O-D для максимального стоку за Прикладом 4 та Прикладом 6  
Джерело: розроблено авторами



На Рис.3 показано максимальну структуру попиту на послуги O-D для Прикладу 4 та Прикладу 6. Попит на перевезення значно зростає на O-D (1-4) та O-D (2-4). Це вказує на те, що мережа за Прикладом 4 є більш завантаженою, а отже, має кращий ефект на пропускну спроможність мережі, ніж за Прикладом 6.

**Висновки.** У цьому дослідженні запропоновано розширену модель пропускну здатності дорожньої мережі на основі моделі пропускну здатності транспортної мережі в [2]. У розширеній моделі з дворівневим програмним формулюванням, обмеження та вплив пропозиції паркування та ціни на паркування в кожній зоні руху (що відповідає пункту призначення) залучені для покращення оцінки пропускну спроможності дорожньої мережі для отримання більш обґрунтованого результату. Ціна паркування інтегрована в цільову функцію моделі нижнього рівня. Для ефективного розв'язання моделі пропускну спроможності запропоновано алгоритм розв'язання на основі аналізу чутливості (SAB), в якому модель STDТА нижнього рівня розв'язується за допомогою алгоритму розв'язання на основі шляхів. На чисельних прикладах показано, що запропонована модель пропускну здатності мережі здатна врахувати вплив стратегій паркування на структуру попиту на проїзд в напрямку O-D, що покращує обґрунтованість результату оцінки пропускну здатності мережі. Крім того, впровадження різних коригувань цін на паркування у місцях призначення буде більш ефективним, якщо підвищення цін на паркування у всіх пунктах призначення до єдиного стандарту. Також цікавим буде пошук оптимальних схем управління паркуванням для розширення пропускну здатності заданої транспортної мережі до максимального рівня.

## Список літератури

1. Wong S.C., Yang, H. Резервна пропускну здатність дорожньої мережі, керованої сигналами", *Транспортні дослідження, частина В: Methodological*. 1997. vol. 31, no. 5. С. 397-402.
2. Yang H., Bell M.G.H., Meng Q., Моделювання пропускну здатності та рівня обслуговування міських транспортних мереж. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2000. Vol. 34, no. 4. Pp. 255-275,
3. Tam M. L. & Lam W. H. K. Максимальне володіння автомобілем при обмеженнях пропускну здатності доріг і паркувальних місць. *Транспортні дослідження, частина А: політика і практика*. 2000. Т. 34, no. 3. С. 145-170,
4. Й. Ленг, Ян К. Розрахункова модель пропускну здатності дорожньої мережі при обмеженні місткості парковок. 2007. Vol. 35, no. 2. Pp. 204-207,
5. Ван Й., Ду М., Лу Л. & Хе Х. Максимізація пропускну здатності мережі при стохастичній рівновазі користувачів з еластичним попитом. *Маєрежі та просторова економіка*. 2018. Vol. 18, no. 1. С. 115-143.
6. Chen A., Yang H., Lo H. K., Tang W. H. Надійність пропускну здатності дорожньої мережі: методологія оцінки та чисельні результати. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2002. Vol. 36, no. 3. Pp. 225-252.
7. Sumalee A., Luathep P., Lam W. H. K., Connors R.D. Оцінка та проектування пропускну здатності транспортної мережі в умовах невизначеності попиту. *Transportation Research Record*. 2009. vol. 2090. Pp. 93-101.
8. Чен А., Касікітвіват П. Моделювання гнучкості пропускну здатності транспортних мереж", *Транспортні дослідження, частина А: Політика і практика*. 2011. Т. 45, № 2. С. 105-117,
9. Du M., Jiang X., Cheng L. Альтернативна міра розгалуженості мережі з використанням загальносистемної транспортної потужності для визначення критичних ланок у дорожніх мережах. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9, no. 4. Pp. 1-12.
10. Асакура І. Максимальна пропускну здатність дорожньої мережі, обмежена умовами рівноваги користувачів", в матеріалах 24-ї щорічної конференції UTSG, Університет Ньюкасла Уорн Тупе, Ньюкасл-на- Тайні, Великобританія, 1992.
11. Акамацу Т., Міявакі О. Проблема максимальної пропускну спроможності мережі при задачі транспортної рівноваги. *Infrastructure Planning Review*. 1995. Vol. 12. Pp. 719-729.

12. Ceylan H., Bell M.G.H. Резервна пропускна здатність дорожньої мережі при оптимізованому управлінні світлофорами з фіксованим часом. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2004. vol. 8, no. 2. С. 87-99.
13. Чіу С. Резервна пропускна здатність сигнально-керованої дорожньої мережі. *Прикладна математика та обчислення*. 2007. Vol. 190, no. 2. С. 1602-1611.
14. Ван Й., Денг В., Жао Д. Резерв пропускної здатності дорожньої мережі зі стохастичною рівновагою користувачів. *Транспорт*. 2015. Vol. 30, № 1. С. 103-116.
15. Gao Z.Y., Song Y.F. Модель резервної потужності оптимального управління сигналом з вибором маршруту, що забезпечує рівновагу користувача. *Дослідження транспорту, частина В-Методологічні*. 2002. Vol. 36, no. 4. С. 313-323.
16. Cheng L., Du M., Jiang X., Rakha H. Моделювання та оцінка пропускної здатності міської транспортної мережі з швидким транзитом. *Транспорт*. 2014. Vol. 29, no. 2. Рр. 165- 174.
17. Сюй Х., Чен А., Джансуван С., Ян К., Рю С. Надмірність транспортної мережі: додаткові заходи та обчислювальні методи. *Транспортні дослідження, частина В: Methodological*. 2018. Vol. 114. Рр. 68-85.
18. Shan L., Huang Z., Luo R. Вплив проникнення ATIS на ринок на пропускну здатність дорожньої мережі. Матеріал VI міжнародної конференції з вимірювальної техніки 2014 року та Mechatronics Automation, Zhangjiajie, Китай, січень 2014 року.
19. Асакура І., Кашівадани М. Модель оцінки максимальної пропускної здатності дорожньої мережі з обмеженнями на паркування та її застосування. *Огляд інфраструктурного планування*. 1993. Т. 11. С. 129-136.
20. Гарсія Р., Марін А. Пропускна спроможність парковок та ціноутворення в поїздках на громадському транспорті: дизайн мережі безперервної рівноваги. *Annals of Operations Research*. 2002. Vol. 116, no. 1-4. С. 153-178.
21. Li Z.-C., Huang H.-J., Lam W. H. K., Wong S. C. А модель для оцінки транспортної політики в мультимодальних мережах з обмеженнями пропускної здатності доріг та парковок. *Журнал математичного моделювання та алгоритмів*. 2007. Vol. 6, no. 2. С. 239-257.
22. Лорен Ф., Буйна Х. Рівновага руху в мережевій моделі паркування і вибору маршруту з пошуковими схемами і крейсерськими потоками. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 54. Рр. 808-821.
23. Nourinejad M., Roorda M. J. Impact of hourly parking pricing on travel demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017. Vol. 98. Рр. 28-45.
24. Xie H., Yu X., Yan K. Модель оцінки пропускної здатності системи міської дорожньої мережі. *China Journal of Highway and Transport*. 2012. Vol. 25, no. 3. С. 129- 134.
25. Оппенгейм Н. Рівноважний розподіл/призначення поїздок зі змінними витратами в пункті призначення. *Транспортні дослідження, частина В: Методологічні*. 1993. Т. 27, no. 3. С. 207-217.

## References

1. Wong, S.C. & Yang, H. (1997). Reserve capacity of a signalcontrolled road network. *Transportation Research Part B:Methodological*, Vol. 31, no. 5, pp. 397–402 [in English].
2. Yang, H., Bell, M. G. H. & Meng, Q. (2000). Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 34, no. 4, Pp. 255–275 [in English].
3. Tam, M.L. & Lam, W.H.K. (2000). Maximum car ownership under constraints of road capacity and parking space. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 34, no. 3, Pp. 145–170 [in English].
4. Leng, J. & Yan, K. (2007). Calculating model of road network capacity under limit of parking establishment capacity. *Journal of Tongji University*. Vol. 35, no. 2. 204–207 [in Ukrainian].
5. J. Wang, M. Du, L. Lu, and X. He, 2018.“Maximizing network throughput under stochastic user equilibrium with elastic demand,” *Networks and Spatial Economics*, vol. 18, no. 1, pp. 115–143 [in Ukrainian].
6. A. Chen, H. Yang, H. K. Lo, and W. H. Tang, 2002.“Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, no. 3, pp. 225–252[in Ukrainian].
7. A. Sumalee, P. Luathep, W. H. K. Lam, and R. D. Connors,“ (2009). Transport network capacity evaluation and design under demand uncertainty,” *Transportation Research Record*, vol. 2090, pp. 93–101 [in Ukrainian].

8. Chen, A. & Kasikitwiwat, P. (2011). Modeling capacity flexibility of transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 45, no. 2, 105–117 [in Ukrainian].
9. Du, M., Jiang, X. & Cheng, L. (2017). Alternative network robustness measure using system-wide transportation capacity for identifying critical links in road networks. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, no. 4, Pp. 1–12 [in Ukrainian].
10. Asakura, Y. (1992). Maximum capacity of road network constrained by user equilibrium conditions. In Proceedings of the 24th Annual Conference of the UTSG, University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne, UK [in Ukrainian].
11. Akamatsu, T. & Miyawaki, O. (1995). Maximum network capacity problem under the transportation equilibrium assignment. *Infrastructure Planning Review*, Vol. 12, Pp. 719–729 [in Ukrainian].
12. Ceylan, H. & Bell, M. G. H. (2004). Reserve capacity for a road network under optimized fixed time traffic signal control. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, no. 2, Pp. 87–99 [in Ukrainian].
13. Chiou, S.-W. (2007). Reserve capacity of signal-controlled road network. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 190, no. 2, Pp. 1602–1611 [in Ukrainian].
14. Wang, J., WDeng, . & Zhao, J. (2015). Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium. *Transport*, vol. 30, no. 1, pp. 103–116 [in Ukrainian].
15. Gao, Z.Y. & Song, Y.F. (2002). A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice. *Transportation Research Part B-Methodological*, Vol. 36, no. 4, pp. 313–323 [in Ukrainian].
16. Cheng, L., Du, M., Jiang, X. & Rakha, H. (2014). Modeling and estimating the capacity of urban transportation network with rapid transit. *Transport*, Vol. 29, no. 2, pp. 165–174 [in Ukrainian].
17. Xu, X., Chen, A., Jansuwan, S., Yang, C. & Ryu, S. (2018). Transportation network redundancy: complementary measures and computational methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 114, Pp. 68–85 [in Ukrainian].
18. Shan, L. Huang, Z. & Luo, R. (2014). Impact of market penetration of ATIS on road network capacity. In Proceedings of the 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Zhangjiajie, China, January [in Ukrainian].
19. Asakura, Y. & Kashiwadani, M. (1993). Estimation model of maximum road network capacity with parking constraints and its application. *Infrastructure Planning Review*, Vol. 11, pp. 129–136 [in Ukrainian].
20. Garc'ia, R. & Mar'in, A. (2002). Parking capacity and pricing in park'n ride trips: a continuous equilibrium network design problem. *Annals of Operations Research*, Vol. 116, no. 1–4, 153–178 [in Ukrainian].
21. Li, Z.-C., Huang, H.-J., Lam, W. H. K. & Wong, S. C. (2007). A model' dlia otsinky transportnoi polityky v mul'tymodal'nykh merezhakh z obmezheniamy propusknoi zdatnosti dorih ta parkovok [A model for evaluation of transport policies in multimodal networks with road and parking capacity constraints]. *Zhurnal matematychnoho modelivannia ta alhorytmiv – Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 6, no. 2, Pp. 239–257 [in Ukrainian].
22. Leurent, F. & Boujnah, H. (2012). Traffic equilibrium in a network model of parking and route choice, with search circuits and cruising flows. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, Pp. 808–821 [in Ukrainian].
23. Nourinejad, M. & Roorda, M.J. (2017). Impact of hourly parking pricing on travel demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 98. Pp. 28–45 [in English].
24. Xie, H., Yu, X. & Yan, K. (2012). Evaluation model of urban road network system capacity. *China Journal of Highway and Transport*, vol. 25, no. 3, pp. 129–134 [in Ukrsinian].
25. Oppenheim, N. (1993). Rivnovazhnyj rozpodil/pryznachennia poizdok zi zminnymy vytratamy v punkti pryznachennia [Equilibrium trip distribution/assignment with variable destination costs]. *Transportni doslidzhennia, chastyna B: Metodolohichni – Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 27, no. 3. 207–217 [in Ukrsinian].

**Svitlana Pashkevych**, Senior Lecturer, **Viktoria Nykonchuk**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Mykhailo Krystopchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*National University of Water Management and Nature Management, Rivne, Ukraine*

### **Assessment of the Capacity of the City Road Network Taking Into Account the Parking Offer**

In order to improve the estimation of network capacity for a given urban road system, it is assumed that the impact of destination parking management strategies should be considered in the network capacity estimation model.

This study presents an extended road network capacity model that takes into account both the number of parking spaces and parking rates in each traffic zone. The network capacity model is formulated as a two-level programming problem with maximizing the total trip generation at the upper level and the combined trip distribution and traffic assignment (CTDTA) problem at the lower level. In order to reasonably characterize the impact of parking pricing and parking delays due to congestion, the CTDTA model involves two classes of travel demand. An efficient and practical algorithm for solving the two-level network capacity model is presented. Numerical experiments show the advantages of the proposed model and demonstrate the impact of parking supply and pricing on the results of road network capacity assessment.

Numerical examples show that the proposed network capacity model is able to take into account the impact of parking strategies on the structure of travel demand in the O-D direction, which improves the validity of the network capacity estimation result. In addition, the implementation of various parking price adjustments at destinations will be more effective if parking prices at all destinations are raised to a single standard.

**capacity, transportation network, parking, indicators of the city's route system**

*Одержано (Received) 02.10.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023*

УДК 656.081:330.47

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.212-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.212-218)

**І.О. Кузєв**, ст. викл.

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
м. Кременчук, Україна*

*e-mail: Igor-kuzev@ukr.net*

**К.Г. Ковцур**, доц., канд. техн. наук

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна*

*e-mail: kovtsyur@ukr.net*

## Інформаційні системи і комп'ютерні технології на транспорті

У статті у військовий час обґрунтовано велику необхідність застосування комп'ютерної інформаційної системи як потужного інструмента забезпечення сучасної конкурентоспроможності автотранспортного підприємства. Проаналізовано дослідження вітчизняних і зарубіжних фахівців з проблематики використання інформаційних систем. Досліджено, що інформаційні системи і технології дають можливість вести безперервний контроль та облік за станом і рухом товарно-матеріальних, фінансових, а також людських ресурсів на автопідприємстві, отримувати інформацію про результати діяльності автопідприємства в реальному часу, своєчасно здійснювати підготовку документів, планів і прогнозів робіт на основі достовірної та повної інформації.

**інформаційні системи, інформаційні технології, інформація, автопідприємство, система, комп'ютер**

**Постановка проблеми.** Інтенсивний трансформаційний процес економіки на транспорті, підвищення рівня конкуренції, високі ризики підприємницької діяльності вимагають швидкого та гнучкого реагування. Організації реагують на зміни зовнішнього ринкового середовища. За таких умов практики господарювання управління бізнесом має базуватися не лише на передових концепціях та інструментах управління, а саме головне, використання сучасних інформаційних систем як потужного засобу підтримки, а також організаційна конкурентоспроможність та ефективна діяльність.

Впровадження інформаційних технологій в управління бізнесом прискорює обробку інформації, зменшує кількість управлінського персоналу, забезпечує керівництво якісною інформацією, дає можливість своєчасно та якісно діагностувати