

УДК 656.025.2
UDC 656.025.2

Пашкевич С.М., Никончук В.М., Кристопчук М.Є.

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

ОЦІНКА ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МІСЬКОЇ ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ПРОПОЗИЦІЇ ПАРКУВАННЯ

З кожним роком інтенсивно зростає кількість автомобілів у всьому світі. У свою чергу це є причиною виникнення таких проблем: виникнення заторів на вулицях; забруднення екології та навколишнього середовища; брак тимчасових парковок та постійних стоянок для автомобілів тощо. Виїжджаючи на автомобілі буквально щодня ми зустрічаємось із цим питанням. Де є місце для тимчасового паркування? Особливо у центрах районів, великих містах ця проблема вважається актуальною. Припаркований вздовж проїжджої частини транспортний засіб завжди є джерелом конфліктних ситуацій, виникнення яких обумовлено багатьма причинами.

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.

Ключові слова: пропускна здатність, транспортна мережа, парковка, показники міської маршрутної системи

ВСТУП

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 ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

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].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

При оцінці пропускну 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 пропускну 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 пропускну здатності дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування та цін на паркування мають наступні недоліки: (1) лише деякі фактори були залучені до оцінки пропускну 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 пропускну спроможності мережі; (3) не враховує різницю між автотуристами і, таким чином, призводить до недооцінки [4] або переоцінки [24] загальної пропускну 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 (CTDTA) [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.

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

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

(e) 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 θ - дисперсійний параметр, який відображає траєкторію руху

У рівнянні (1) мінімальна вартість проїзду τ_{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 ρ_j , тобто,

$$q_j = \rho_j \cdot D_j, \quad \forall j \in J, \quad (2)$$

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:

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

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

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

$$M_j = \pi_j + \eta \cdot S_j(q_j), \quad (4)$$

де η - 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 (STDTA) [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 пасажири 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:

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

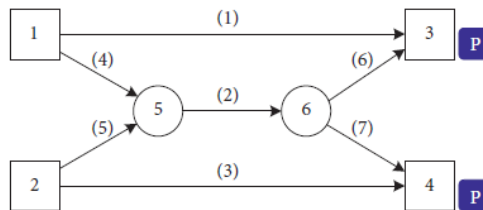


Рисунок.1 Приклад мережі

Як показано на (рис1) існує 4 O-D 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 η встановлено на 1,0, а параметр дисперсії θ 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	\bar{O}_i	
1	30	20	50
2	40	20	60
\bar{D}_i	70	40	Загальний попит 110

Таблиця 3:

Параметри стратегії паркування в пунктах призначення

Напрямок	Час пошуку вільного місця s_j	γ	ω	Вартість паркування λ_j	Місткість паркування k_j	Швидкість паркування ρ_j
3	2.0	1.0	2.0	4.0	100	0.75
4	3.0	1.0	2.0	5.0	80	0.75

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 запропонованою 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 запропонованою 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 дорожньої мережі

O-D	Типи попиту послань		Попит в пункті призначення			Потік		
	Співвідношення $V \setminus C$	Фіксований попит	Попит на паркування	Додатковий попит	Посилання	Пункт призначення		
Загальна привабливість поїздки								
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
						5	50.00	1.000
						6	50.00	1.000

						7	25.00	0.500
Всього	110	27.50		137.50				
	Пропускна здатність мережі					Мультиплікатор попиту 1.25		

Таблиця 5. Результати запропонованої моделі пропускної спроможності дорожньої мережі

O-D	Типи попиту послань			Попит на дистанції			Потік	
	Фіксований попит	Додатковий попит	Пункт призначення	Загальна привабливість	Попит на паркування	Посилання	Потік послань	Співвідношення V/C
Загальна привабливість поїздки								
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
						5	76.91	0.641
Всього	110	27.50						
	Пропускна здатність мережі			198.46		Мультиплікатор попиту 1.25		

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.

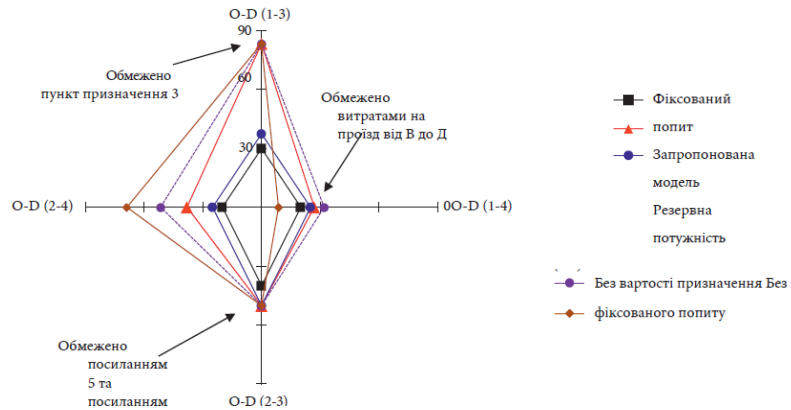


Рисунок 2. Структура попиту O-D при максимальному потоці за різними моделями пропускної здатності мережі.

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 пропускну здатність мережі. Для цього приведено 6 прикладів, перелічених у Таблиці 6-8.

Таблиця 6 Опис прикладів

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

Таблиця 7 Результати пропускної здатності мережі при різній місткості паркінгу

Місткість паркінгу (k_3, k_4)								
Напрями	Базовий приклад: (100,80)		Приклад 1: (100,80)		Приклад 2: (100,80)		Приклад 3: (100,80)	
	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
Пропуск на здатність мережі	198,46		221,87		198,46		221,87	
Потужність на ланці 5* та ланці 6**								
*	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 у всіх прикладах

Таблиця 8 Результати пропускної здатності мережі за різних стратегій ціноутворення на паркінгу

Ціни на паркінг (π_3, π_4)								
Напрями	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
Пропуск на 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 пропускною спроможністю парковок у пункті призначення 3. Розширення паркувальних місць у таких пунктах призначення може ефективно підвищити пропускну спроможність 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 пропускну спроможність мережі.

У Прикладі 3 кількість місць для паркування в пунктах призначення 4 та 5 збільшується до 1000. Це призводить до такої 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.

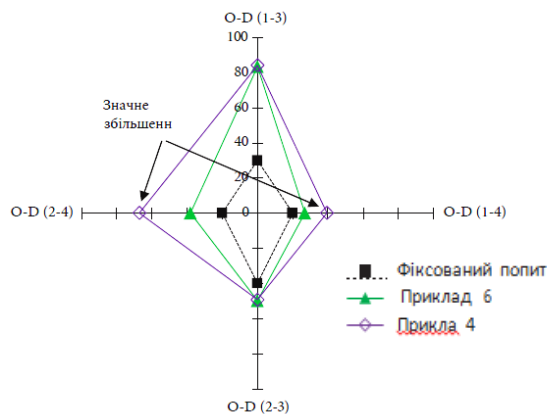


Рисунок 3. Структура попиту на O-D для максимального стоку за Прикладом 4 та Прикладом 6.

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 здатності дорожньої мережі для отримання більш обґрунтованого результату. Ціна паркування інтегрована в цільову функцію моделі нижнього рівня. Для ефективного розв'язання моделі пропускну здатності 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.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. S. C. Wong і Н. Yang, "Резервна пропускну здатність дорожньої мережі, керованої сигналами", Транспортні дослідження, частина В: Methodological, vol. 31, no. 5, с. 397-402, 1997.
2. Н. Yang, М. G. Н. Bell, and Q. Meng, "Моделювання пропускну здатності та рівня обслуговування міських транспортних мереж", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 34, no. 4, стор. 255-275, 2000.
3. М. L. Tam and W. Н. K. Lam, "Максимальне володіння автомобілем при обмеженнях пропускну здатності доріг і паркувальних місць", Транспортні дослідження, частина А: політика і практика, том 34, no. 3, с. 145-170, 2000.
4. Й. Ленг і К. Ян, "Розрахункова модель пропускну здатності дорожньої мережі при обмеженні місткості парковок", vol. 35, no. 2, pp. 204-207, 2007.
5. Й. Ван, М. Ду, Л. Лу та Х. Хе, "Максимізація пропускну здатності мережі при стохастичній рівновазі користувачів з еластичним попитом", Мережі та просторова економіка, vol. 18, no. 1, стор. 115-143, 2018.
6. А. Chen, Н. Yang, Н. K. Lo, and W. Н. Tang, "Надійність пропускну здатності дорожньої мережі: методологія оцінки та чисельні результати", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 36, no. 3, pp. 225-252, 2002.
7. А. Sumalee, Р. Luathep, W. Н. K. Lam, and R. D. Connors, "Оцінка та проектування пропускну здатності транспортної мережі в умовах невизначеності попиту", Transportation Research Record, vol. 2090, pp. 93-101, 2009.
8. А. Чен і П. Касіктиват, "Моделювання гнучкості пропускну здатності транспортних мереж", Транспортні дослідження, частина А: Політика і практика, том 45, № 2, с. 105-117, 2011.
9. М. Du, X. Jiang, and L. Cheng, "Альтернативна міра розгалуженості мережі з використанням загальносистемної транспортної потужності для визначення критичних ланок у дорожніх мережах", Advances in Mechanical Engineering, vol. 9, no. 4, pp. 1-12, 2017.
10. І. Асакура, "Максимальна пропускну здатність дорожньої мережі, обмежена умовами рівноваги користувачів", в матеріалах 24-ї щорічної конференції UTSG, Університет Ньюкасла Урон Тупе, Ньюкасл-на-Тайні, Великобританія, 1992.
11. Т. Акамацу та О. Міявакі, "Проблема максимальної пропускну здатності мережі при задачі транспортної рівноваги", Infrastructure Planning Review, vol. 12, pp. 719-729, 1995.
12. Н. Ceylan та М. G. Н. Bell, "Резервна пропускну здатність дорожньої мережі при оптимізованому управлінні світлофорами з фіксованим часом", Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 8, no. 2, стор. 87-99, 2004.
13. С. Чіу, "Резервна пропускну здатність сигнально-керованої дорожньої мережі", Прикладна математика та обчислення, vol. 190, no. 2, с. 1602-1611, 2007.

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

REFERENCES

1. S. C. Wong and H. Yang, "Reserve capacity of a signalcontrolled road network," *Transportation Research Part B:Methodological*, vol. 31, no. 5, pp. 397–402, 1997.
2. H. Yang, M. G. H. Bell, and Q. Meng, "Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 34, no. 4, pp. 255–275, 2000.
3. M. L. Tam and W. H. K. Lam, "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, 2000.
4. J. Leng and K. Yan, "Calculating model of road network capacity under limit of parking establishment capacity," *Journal of Tongji University*, vol. 35, no. 2, pp. 204–207, 2007.
5. J. Wang, M. Du, L. Lu, and X. He, "Maximizing network throughput under stochastic user equilibrium with elastic demand," *Networks and Spatial Economics*, vol. 18, no. 1, pp. 115–143, 2018.
6. A. Chen, H. Yang, H. K. Lo, and W. H. Tang, "Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, no. 3, pp. 225–252, 2002.
7. A. Sumalee, P. Luathep, W. H. K. Lam, and R. D. Connors, "Transport network capacity evaluation and design under demand uncertainty," *Transportation Research Record*, vol. 2090, pp. 93–101, 2009.
8. A. Chen and P. Kasikitwiwat, "Modeling capacity flexibility of transportation networks," *Transportation Research Part A:Policy and Practice*, vol. 45, no. 2, pp. 105–117, 2011.
9. M. Du, X. Jiang, and L. Cheng, "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, 2017.

10. Y. Asakura, "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, 1992.
11. T. Akamatsu and O. Miyawaki, "Maximum network capacity problem under the transportation equilibrium assignment," *Infrastructure Planning Review*, vol. 12, pp. 719–729, 1995.
12. H. Ceylan and M. G. H. Bell, "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, 2004.
13. S.-W. Chiou, "Reserve capacity of signal-controlled road network," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 190, no. 2, pp. 1602–1611, 2007.
14. J. Wang, W. Deng, and J. Zhao, "Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium," *Transport*, vol. 30, no. 1, pp. 103–116, 2015.
15. Z. Y. Gao and Y. F. Song, "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, 2002.
16. L. Cheng, M. Du, X. Jiang, and H. Rakha, "Modeling and estimating the capacity of urban transportation network with rapid transit," *Transport*, vol. 29, no. 2, pp. 165–174, 2014.
17. X. Xu, A. Chen, S. Jansuwan, C. Yang, and S. Ryu, "Transportation network redundancy: complementary measures and computational methods," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 114, pp. 68–85, 2018.
18. L. Shan, Z. Huang, and R. Luo, "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 2014.
19. Y. Asakura and M. Kashiwadani, "Estimation model of maximum road network capacity with parking constraints and its application," *Infrastructure Planning Review*, vol. 11, pp. 129–136, 1993.
20. R. Garc'ia and A. Mar'in, "Parking capacity and pricing in park'n ride trips: a continuous equilibrium network design problem," *Annals of Operations Research*, vol. 116, no. 1–4, pp. 153–178, 2002.
21. Z.-C. Li, H.-J. Huang, W. H. K. Lam, and S. C. Wong, "A model for evaluation of transport policies in multimodal networks with road and parking capacity constraints," *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, vol. 6, no. 2, pp. 239–257, 2007.
22. F. Leurent and H. Boujnah, "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, 2012.
23. M. Nourinejad and M. J. Roorda, "Impact of hourly parking pricing on travel demand," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 98, pp. 28–45, 2017.
24. H. Xie, X. Yu, and K. Yan, "Evaluation model of urban road network system capacity," *China Journal of Highway and Transport*, vol. 25, no. 3, pp. 129–134, 2012.
25. N. Oppenheim, "Equilibrium trip distribution/assignment with variable destination costs," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 27, no. 3, pp. 207–217, 1993.

S. Pashkevych, V. Nykonchuk, M. Krystopchuk. Assessment of the capacity of the city road network taking into account the parking offer

The number of cars around the world is growing intensively every year. In turn, this is the cause of the following problems: traffic jams on the streets; pollution of ecology and the environment; lack of temporary parking and permanent parking for cars, etc. Going out by car literally every day we encounter this question. Where is there a place for temporary parking? This problem is considered urgent, especially in the centers of districts and large cities. A vehicle parked along the roadway is always a source of conflict situations, the occurrence of which is due to many reasons

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.

Key words: capacity, transportation network, parking, indicators of the city's route system

ПАШКЕВИЧ Світлана Михайлівна, старший викладач кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: s.m.pashkevych@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7667-8932>;

НИКОНЧУК Вікторія Миколаївна, доктор економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7515-6016>

КРИСТОПЧУК Михайло Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8701-4469>;

Svetlana PASHKEVYCH, Senior Lecturer of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: s.m.pashkevych@nuwm.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0001-7667-8932>.

Viktoriia NYKONCHUK, D. Sc (Economics), Professor, Head of the Transport Technologies and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7515-6016>;

Mykhailo KRYSTOPCHUK, PhD., Associate Professor, Head of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8701-4469>;

DOI 10.36910/automash.v2i21.1221