

ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ VD-ФУНКЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ В МОДЕЛІ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ

Сістук В. О.

Криворізький національний університет

Анотація. Розроблено підхід до визначення VD-функцій, які використовуються для моделювання перерозподілу індивідуального транспорту в програмному забезпеченні PTV Visum, на основі визначення відповідності результатів моделювання реальним умовам за показником середньодобової швидкості руху, польові значення якої отримані за допомогою сервісу TomTom.

Ключові слова: транспортне моделювання, PTV Visum, VD-функція, індивідуальний транспорт, TomTom Traffic Stats.

Вступ

У сучасних умовах для визначення стану, прийняття та обґрунтування управлінських рішень в галузі функціонування міських транспортних систем застосовуються результати транспортного моделювання, отримані на основі використання моделі міської мобільності (транспортної моделі міста). Вона розробляється в спеціалізованому програмному забезпеченні.

Легковий автомобільний транспорт у PTV Visum належить до категорії індивідуального транспорту (ІТ). Усі процеси перерозподілу попиту на ІТ ґрунтуються на алгоритмі найкоротшого за часом способу, який визначає узагальнені напрямки вздовж транспортної мережі з найменшим опором.

Опір шляху ІТ визначається з опору на відповідних елементах (об'єктах) транспортної мережі: відрізках, вузлах, поворотах, вищих поворотах, примиканнях. Опір залежить як від параметрів транспортного попиту (навантаження, яке створюється транспортним потоком), так і від транспортної пропозиції (пропускної здатності об'єктів мережі). Крім того, опір складається з двох основних компонентів: транспортно-залежних (наприклад, час руху в умовах навантаженої мережі, специфічний для цієї системи транспорту) і незалежних від завантаження об'єкта мережі (наприклад, дорожній збір).

Одним із основних показників, які впливають на перерозподіл попиту на ІТ, є середня швидкість транспортного потоку, яка залежить від інтенсивності руху, що математично описується за допомогою функції «обсяг-затримка» (Volume-Delay Function – VDF). Формула VDF визначає час у дорозі як добуток часу у вільному потоці на нормовану функцію обмеження пропускної здатності

(Capacity-Restraint, CR) елемента мережі. CR-функція, таким чином, виражає взаємозв'язок між фактичним транспортним навантаженням і максимальною пропускною здатністю відповідного елемента мережі.

Час у дорозі так само є змінною величиною, яка може прогнозуватися з певною ймовірністю до початку поїздки.

У ненавантаженої мережі час руху вздовж відрізків і на поворотах визначається з огляду на довжину відрізка та дозволена швидкість для вільного потоку, тоді як час повороту фіксується окремо. У навантаженої мережі ці показники розраховуються на основі VD-функції.

Таким чином, вибір VD-функцій для відповідних елементів транспортної мережі має вирішальний вплив на пошук найкоротшого шляху, а отже, й на показники перерозподілу попиту на індивідуальний транспорт (ІТ) у моделі мобільності.

Аналіз публікацій

Протягом багатьох десятиліть було накопичено значний досвід у сфері транспортного моделювання. Найсучасніші розробки в галузі транспортного моделювання, зокрема приклади впровадження результатів досліджень наведені в [1]. Алгоритми пошуку найкоротшого шляху в моделях перерозподілу транспортного попиту наведені в [2]. Нові функції «обсяг-затримка» (VDF), що враховують зміну часу в дорозі як поблизу, так і за межами точки насичення транспортних потоків, наведені в [3]. Питання визначення VD-функцій для кожної категорії доріг як основи для розраховування часу в дорозі та їх застосування в транспортних макромоделях наведені в роботах [4–7]. У статті [4] проаналізовано процес отримання характе-

ристик транспортного потоку та визначення параметрів, необхідних для побудови базової функції обмеження BPR. У роботі [6] перевірено відповідність вибраних VD-функцій інформації щодо дорожнього руху, отриманої із системи інтегрованої системи управління транспортом (TRISTAR), що застосовується в агломерації Гданськ, Гдиня та Сопот (Польща). У цих роботах не розглянуті приклади визначення та калібрування CR-функцій для нелінійних елементів транспортної мережі, зокрема вузлів та поворотів. Крім того, вплив використання різноманітних комбінацій VD-функцій для різних елементів мережі на результати перерозподілу транспортного попиту дотепер не був досліджений. Таким чином, визначення та калібрування VD-функцій для всіх ключових елементів транспортної мережі в міських транспортних моделях все ще вимагає нових підходів, що доводить актуальність теми нашого дослідження.

Мета та постановка завдання

Метою є розроблення підходу до визначення VD-функцій для елементів міської транспортної мережі в моделі міської мобільності, розробленої в програмному забезпеченні PTV Visum на основі аналізу історичних даних дорожнього руху [8].

Завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

1 побудувати VD-функції для відрізків, вузлів та поворотів залежності від рівня завантаження на елементах мережі;

2 визначити та налаштувати VD-функції для конкретних елементів мережі в моделі міської мобільності міста Кривий Ріг (ММКР).

Побудова VD-функцій для відрізків

PTV Visum пропонує декілька типів VD-функцій [8]:

1 постійна функція, де час руху на елементі мережі ($t_{\text{Акт}}$) не залежить від пропускної здатності ($t_{\text{Акт}} = t_0$, де t_0 – час вільного руху) цього елемента;

2 функція BPR із Traffic Assignment Manual [9];

3 модифікована функція BPR з різними параметрами для ненавантаженого та завантаженого станів;

4 модифікована функція BPR з можливістю задати додаткову надбавку часу на кожен транспортний засіб у навантаженому стані;

5 функція INRETS;

6 додаткова модифікована функція BPR (функція Lohse) з лінійним підйомом у ділянці перевантаження, щоб забезпечити реалістичний час руху та поведінку в перерозподілах;

лістичний час руху та поведінку в перерозподілах;

7 різноманітні функції для поворотів у вузлах (Sigmoidal MMF, T-Mobile Nodes).

Функцію BPR можна записати так [8]:

$$t_{cur} = t_0 \cdot (1 + a \cdot sat^b) \quad (2)$$

$a \in [0,00;\infty)$, $b \in \{0,00...10,00\}$, $c \in [0,00;\infty)$.

Функція Lohse:

$$t_{cur} = \begin{cases} t_0 \cdot (1 + a \cdot sat^b), & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 \cdot (1 + a \cdot (sat_{crit})^b) + a \cdot b \cdot t_0 \cdot (sat_{crit})^{b-1} \cdot (sat - sat_{crit}), & sat > sat_{crit}, \end{cases} \quad (1)$$

$sat_{crit} \in [0,00;10]$, $a \in [0,00;1000]$, $b \in [0,00;10]$, $c \in [0,00;100]$.

Функція INRETS [8]:

$$t_{cur} = \begin{cases} t_0 \cdot \frac{1,1-a \cdot sat}{1,1-sat}, & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 \cdot \frac{1,1-a}{0,1} \cdot sat^2, & sat > sat_{crit} \end{cases} \quad (3)$$

$a \in \{0,00..1,10\}$, $c \in [0;\infty)$, $sat_{crit} = 1$,

де sat – рівень завантаження елемента мережі, що визначається: $sat = \frac{q}{q_{max} \cdot c}$; q – сумарне навантаження від усіх систем ІТ (одиниця/од.час); q_{max} – пропускна здатність елемента мережі (одиниця/од.час); sat_{crit} – рівень насичення, з якого починається лінійна ділянка VD-функції; t_{cur} – показник актуального часу руху на елементі навантаженої мережі ($t_{\text{Акт}}$, c); t_0 – час руху на об'єкті мережі у вільних умовах руху, c ; a , b , c , d , f – визначені калібрувальні параметри.

Для врахування опору на відрізках визначені залежності поточної швидкості руху ІТ $v_{\text{Акт}}$, починаючи зі швидкості в умовах ненавантаженої мережі $v_0 = 80$ км/год., від рівня завантаження відрізка в діапазоні sat від 0 до 2,5 з кроком 0,05 із вибором параметрів a , b , c (рівняння 1–3), які формують 8 різних VD-функцій, що можуть бути призначені для різних типів відрізків (залежно від кваліфікації доріг у моделі мережі).

На рис. 1–3 наведені отримані залежності поточної швидкості руху ІТ від рівня завантаженості відрізка для таких VD-функцій, як Lohse, BPR та INRETS. Згідно з рис. 1 та рис. 2, функція Lohse, на відміну від функцій BPR та INRETS, забезпечує більший діапазон коливань поточної швидкості для конк-

ретної категорії дороги залежності від рівня її завантаження (відрізка) в межах від 0,25 до 1,0.

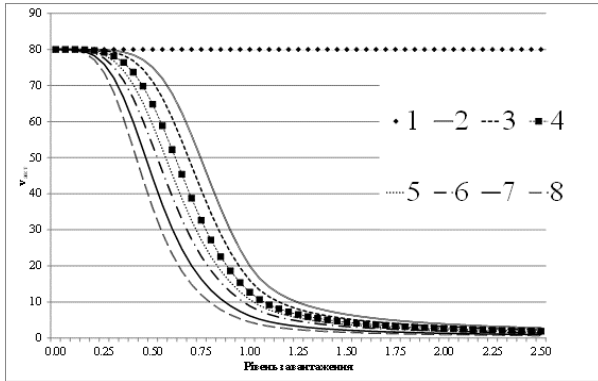


Рис. 1. Залежності поточної швидкості ІТ від рівня завантаженості відрізка в процесі використання VD-функції Lohse

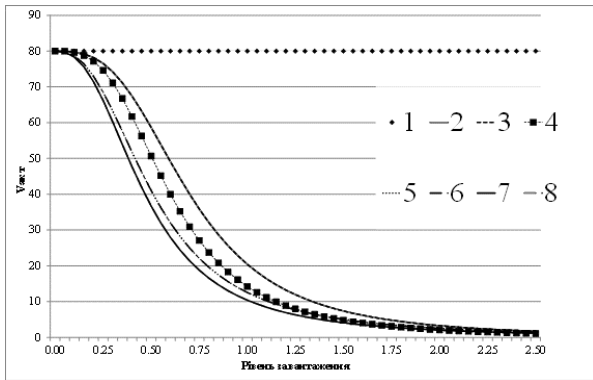


Рис. 2. Залежності поточної швидкості ІТ від рівня завантаженості відрізка під час використання VD-функції BRP

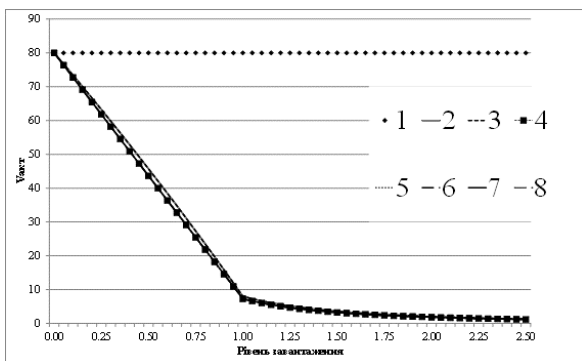


Рис. 3. Залежності поточної швидкості ІТ від рівня завантаженості відрізка під час використання VD-функції INRETS

Побудова CR-функцій для вузлів

Тип регулювання дорожнього руху на перехрестях вулично-дорожньої мережі визначає опір повороту, що виникає у вузлах моделі мережі. Цей опір відповідає часу, необ-

хідному для проходження вузла в заданому напрямку. Опір повороту містить затримку t_0 , яка збільшується залежно від навантаження та пропускної здатності вузла.

PTV Visum дозволяє визначити час руху на кожному повороті за допомогою використання VD-функції для вузлів, поворотів та розрахування опору вузла за допомогою процедури ICA (Intersection Capacity Analysis) відповідно до HCM [10]. Останній варіант вимагає значних часових затрат на введення вихідних даних, водночас очікувана збіжність результатів може бути не досягнута через неподільну модель опору. У зв'язку з цим виробник програмного забезпечення не рекомендує використовувати процедуру ICA для моделювання VD-функції у великих транспортних мережах. Через це необхідно перевірити, чи можна перші два варіанти функції опору для вузлів (Sigmoidal MMF Nodes, TModel Nodes) та поворотів (TModel Nodes) [8] використати для моделювання перерозподілу ІТ у ММКР [11].

Функція Sigmoidal MMF Node має вигляд:

$$t_{cur} = t_0 + \frac{a \cdot b + d \cdot sat^f}{b + sat^f} \quad (4)$$

$a, b, c, d \in [0,00 \dots 100,00], f \in \{0,00 \dots 10,00\}$.

Функція TModel Nodes [8]:

$$t_{cur} = \begin{cases} (t_0 + a) + d \cdot (sat + f)^b, & sat \leq sat_{crit} \\ (t_0 + a') + d' \cdot (sat + f')^{b'}, & sat > sat_{crit} \end{cases} \quad (5)$$

VD-функція була побудована відповідно до рівня завантаженості вузлів для таких їхніх типів: відрегульований рух, регулювання за правилом «поміха праворуч», круговий рух, світлофорне регулювання (рис. 4–5).

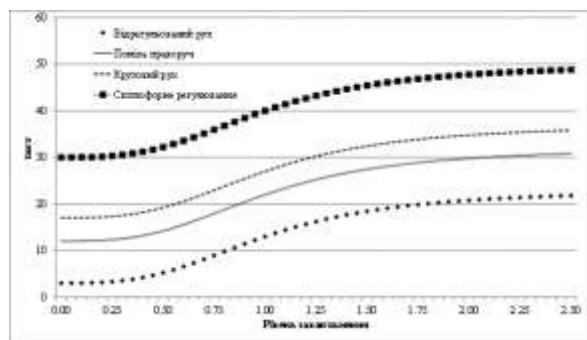


Рис.4. Залежності часу руху ІТ від рівня завантаженості вузла в процесі використання VD-функції Sigmoidal MMF Nodes

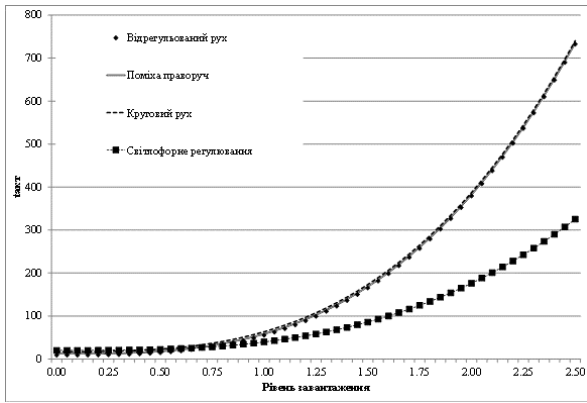


Рис. 5. Залежності часу руху ІТ від рівня завантаженості вузла в процесі використання VD-функції TModel Nodes

Підходи до визначення часу руху ІТ залежно від рівня завантаженості вузла суттєво відрізняються в процесі використання функцій Sigmoidal MMF Nodes і TModel Nodes для різних типів вузлів. Час у дорозі за TModel Nodes збільшується за експонентним трендом у разі збільшення рівня завантаженості вузла, а за Sigmoidal MMF Nodes спостерігається ступенева залежність між цими показниками. У випадку використання TModel Nodes типи вузла, визначені в PTV Visum як «відрегульований рух», «поміха праворуч» та «круговий рух» майже не впливають на отримані залежності часу в дорозі від рівня завантаженості вузла. Світлофорне регулювання вузла за Sigmoidal MMF Nodes, на відміну від TModel Nodes, призводить до значного збільшення часу в дорозі, як порівняти з іншими типами вузлів.

Побудова CR-функцій для поворотів

Для поворотів VD-функція була розрахована для таких типів руху, як поворот праворуч (1), ліворуч (3), прямиий рух (2) і розворот (4). Залежності часу руху від рівня завантаженості на поворотах наведені на рис. 6.

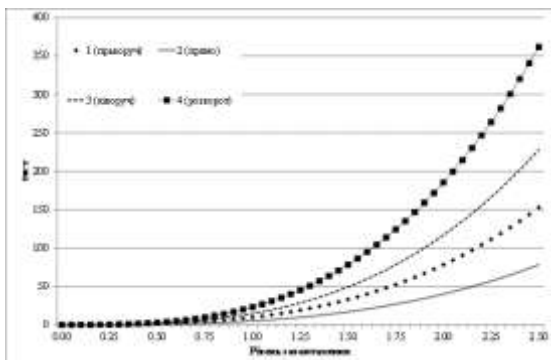


Рис.6. Залежності часу руху ІТ від рівня завантаженості повороту за використання VD-функції TModel Nodes для поворотів

Застосування CR-функцій у моделі міської мобільності міста Кривий Ріг

Після процесу калібрування параметрів *a*, *b*, *c* (рівняння 1–5) залишимо два основні сценарії використання VD-функцій у транспортній моделі міста Кривий Ріг:

1 постійну функцію та функцію BRP – для відрізків, Sigmoidal MMF Nodes – для вузлів та TModel Nodes – для поворотів (рис. 7, рис. 8, рис. 10, рис. 11);

2 постійну функцію та функцію Lohse – для відрізків та TModel Nodes – для вузлів і поворотів (рис. 9, рис. 11).

Рис. 12 є наочним прикладом впливу VD-функцій на результати перерозподілу ІТ. На ньому наведені картограми інтенсивності руху легкових автомобілів (авт./доба) у разі застосування різних VD-функцій для відповідних елементів транспортної мережі відповідно до двох розглянутих сценаріїв.

Number:	9	No	Name	Description
1	1		constant	
2	2		BPR (1.00 3.00 0.70)	
3	3		BPR (1.00 3.00 0.70)	
4	4		BPR (1.00 3.00 0.60)	
5	5		BPR (1.50 2.50 0.60)	
6	6		BPR (1.50 2.50 0.60)	
7	7		BPR (1.50 2.50 0.55)	
8	8		BPR (1.50 2.50 0.55)	

Рис. 7. Параметри функції BRP для відрізків у ММКР (сценарій 1)

VD functions				
Number:	1	No	Name	Description
1	1		SIGMOIDAL_MMF_NODES (0.00 1.00 1.00 20.00 3.00)	

Рис.8. Параметри функції Sigmoidal MMF Nodes для вузлів у ММКР (сценарій 1)

Number:	9	No	Name	Description
1	1		constant	
2	2		LOHSE (3.00 5.50 1.00 1.00)	
3	3		LOHSE (4.00 5.00 1.00 1.00)	
4	4		LOHSE (5.30 4.50 1.00 1.00)	
5	5		LOHSE (6.50 4.20 1.00 1.00)	
6	6		LOHSE (8.00 4.00 1.00 1.00)	
7	7		LOHSE (12.00 3.90 1.00 1.00)	
8	8		LOHSE (17.00 3.80 1.00 1.00)	

Рис.9. Параметри функції Lohse для відрізків у ММКР (сценарій 2)

VD functions				
Number:	2	No	Name	Description
1	1		TMODEL_Nodes (0.00 3.00 10.00 0.00 0.60 1.00)	
2	3		TMODEL_Nodes (0.00 3.00 10.00 0.00 0.80 1.00)	

Рис.10. Параметри функції TModel Nodes для вузлів у ММКР (сценарій 1)

VD functions				
Number:	4	No	Name	Description
1	1		TMODEL_Nodes (0.00 3.00 5.00 0.00 0.80 1.00)	
2	2		TMODEL_Nodes (0.00 3.00 5.00 0.00 1.00 1.00)	
3	3		TMODEL_Nodes (0.00 3.00 5.00 0.00 0.70 1.00)	
4	4		TMODEL_Nodes (0.00 3.00 5.00 0.00 0.60 1.00)	

Рис.11. Параметри функції TModel Nodes для поворотів у ММКР (сценарій 1 та 2)



Рис.12. Картограми результатів перерозподілу ІТ для розглянутих сценаріїв використання VD-функцій у ММКР

Перевірка відповідності розробленої транспортної моделі реальним дорожньо-транспортним умовам у процесі калібрування коефіцієнтів VD-функцій (рис.7–11) може бути здійснена з огляду на такі параметри транспортного потоку ІТ:

- середній час руху на ділянці вулично-дорожньої мережі;
- інтенсивність руху транспортних потоків ІТ;
- середньодобова швидкість руху в системі ІТ у навантаженій мережі.

Загально визнаним параметром аналізу адекватності результатів перерозподілу ІТ у процесі вибору VD-функцій є час подорожі на ділянці мережі [7]. Однак порівняння часу подорожі, визначеного для реальних умов, та за результатами моделювання ($t_{\text{АКТ}}$) є трудомістким процесом, оскільки зазвичай кількість відрізків у моделі, а відповідно, й показників часу подорожі, значно перевищує кількість напрямків руху, для яких визначатиметься цей показник в умовах реальної мережі.

У роботі [7] зазначено, що саме середня швидкість руху транспортного потоку дозволяє якісно визначити результати перерозпо-

ділу ІТ, водночас збіжність результатів за цим параметром цілком ймовірно означитиме збіжність результатів за середнім часом у русі.

Інтенсивність руху транспортних потоків може бути визначена в реальних умовах для окремих перехресть вулично-дорожньої мережі, які відповідають вузлам моделі. Способами визначення інтенсивності є обстеження, які проводяться візуальним методом, та автоматизовані методи обліку (наприклад, індуктивні петлі, розпізнавання образів з відеороликів дорожнього руху [11, 12]). Для попереднього планування та калібрування перерозподілу транспортних потоків під час розроблення ММКР проводились натурні спостереження за інтенсивністю руху автотранспорту на окремих перехрестях вулично-дорожньої мережі міста. Крім інтенсивності руху, такі показники потоків, як середня швидкість, прискорення та уповільнення, час у дорозі, пройдена відстань кожним транспортним засобом, визначались на основі інтелектуального відеоаналізу даних руху, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), за допомогою програмного забезпечення з розпізнавання образів DataFromSky Viewer [11]. Ці дослідження проводились 2021 року, однак їх було недостатньо для охоплення всієї мережі міста. У воєнний час, коли рух цивільних БПЛА було обмежено, основним джерелом інформації про інтенсивність транспортних потоків у межах міста були історичні дані руху, отримані за допомогою сервісу TomTom [13].

Використовуючи досвід проведених власних досліджень [11], згідно з висновками науковців щодо аналізу перерозподілу потоків ІТ у центральній частині міста Харків [7], параметром для визначення відповідності результатів моделювання реальним умовам вибрана середня швидкість потоку ІТ у навантаженій мережі.

Аналіз середньодобової швидкості руху на вулично-дорожній мережі міста Кривий Ріг здійснювався за допомогою даних, отриманих з порталу TomTom Traffic Stats [13]. Метод аналізу дорожнього руху в Traffic Stats ґрунтується на технології FCD (float car data), яка використовує інформацію про геолокацію, швидкість і час для транспортних засобів, що перебувають у русі, на відміну від статичних даних про дорожню ситуацію [14].

Фрагмент вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг із розподілом середньодобової швидкості руху транспортних засобів, який

отриманий за результатами запиту в TomTom, наведений на рис. 13.



Рис. 13. Розподіл середньодобової швидкості руху транспортних потоків у центральній частині міста Кривий Ріг за даними TomTom

Для відображення в моделі середньодобової швидкості руху в навантаженій мережі системи ІТ використаний відповідний атрибут для відрізків (рис.14).



Рис.14. Розподіл середньодобової швидкості руху транспортних потоків у системі ІТ у моделі мережі міста Кривий Ріг (фрагмент)

Під час порівняльного аналізу отриманих параметрів швидкості руху ІТ на відрізках зі швидкостями руху зі звіту TomTom Traffic Stats було визначено, що найкращим для ММКР є сценарій 2, за яким функція Lohse застосовується до відрізків, тоді як TModel Nodes використовується для вузлів і поворотів.

Висновки

У роботі досліджено розроблення підходу до визначення та калібрування функцій «обсяг-затримка» (VD-функцій), які аналізують перерозподіл попиту на ІТ, для окремих типів об'єктів транспортної мережі в моделі міської мобільності.

Визначені залежності поточної швидкості ІТ від рівня завантаженості відрізків, а часу руху ІТ від рівня завантаженості вузлів та поворотів під час використання VD-функцій.

На прикладі моделі міської мобільності міста Кривий Ріг, реалізованої за допомогою програмного забезпечення PTV Visum, здійснена перевірка VD-функцій у різних комбінаціях із вибором їхніх калібрувальних параметрів. Ця частина дослідження має практичне значення як для транспортних інженерів, які можуть користуватись розробленими VD-функціями в процесі калібрування попиту на ІТ у моделях мобільності інших міст та регіонів, так і для осіб, які ухвалюють управлінські рішення з огляду на результати транспортного моделювання.

Науковий інтерес має підхід до використання даних середньодобової швидкості руху транспортних засобів, отриманих за технологією FCD, для визначення та калібрування VD-функцій для кожного типу елемента транспортної мережі в моделі міської мобільності.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов'язані із такими аспектами:

- можливості додаткового визначення показника середньої добової інтенсивності руху транспортних засобів, отриманої за допомогою FCD, у процесі калібрування параметрів VD-функцій [13];

- більш широкого використання результатів інтелектуального відеоаналізу дорожнього руху у вигляді показників середньої швидкості, часу в дорозі, інтенсивності руху кожного об'єкта відстеження (транспортного засобу в потоці руху) зі звіту Trajectories Movement Dynamics, який формується в програмному забезпеченні DataFromSky Viewer [12].

Література

1. Ortúzar Ju. de D., Willumsen L. G. Modelling transport. 5th Edition. New Jersey, 2024. 720 p.
2. Gentile G., Florian M., Younes H., Cats O., Agostino N. The Theory of transit assignment: basic modelling frameworks. *Springer tracts on transportation and traffic*. 2016. P. 287–386. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3_6
3. So J., Stevanovic A., Ostojic M. Methodology to estimate volume-capacity ratios at traffic signals based on upstream-link travel times. *Journal of transportation engineering, Part A: Systems*. 2017. № 4. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000021>
4. Bartovic M., Drlićiak M. Influence of capacity restraint functions on traffic distribution and their practical use in the traffic modelling. *Communi-*

- cations – Scientific letters of the University of Zilina*. 2010. V.12. № 3. P.23–27. <https://doi.org/10.26552/com.C.2010.3A.23-27>
5. Weis C., Rindsfuser G., Matthews W. Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen / Calibration of capacity restraint functions. 2018. № 1628.
 6. Oskarbski J., Jamroz K., Smolarek L., Zawisza M., Żarski K. (2017). Analysis of possibilities for the use of volume-delay functions in the planning module of the TRISTAR system. *Transport Problems*. V. 12. № 1. P. 39–50. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.4>
 7. Розподіл потоків індивідуального автотранспорту в міських мережах на основі затримок на перехрестях / Д. М. ВУ. *Автомобільний транспорт*. № 46. С. 47–62. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.47>
 8. PTV VISUM user manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2023. 2694 p.
 9. Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer. Washington: U.S. Department of commerce, Bureau of public roads, 1964.
 10. Highway Capacity Manual 7th Edition: A guide for multimodal mobility analysis. Washington, DC: The National academies press, 2022. 1286 p. <https://doi.org/10.17226/26432>
 11. Sistuk V., Monastyrskiy Y., Maksymenko I. Calibration of traffic microsimulation models using the results of intelligent video analysis of the traffic. *Transport Means: Proceedings of the 27th International Scientific Conference* (Palanga, 4–6 Oct. 2023). Palanga, 2023. P. 368–374. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2023.P1>
 12. Traffic Survey. *An ultimate tool for the next generation of traffic surveys*. URL: <https://datafromsky.com/trafficsurvey/> (дата звернення: 12.10.2024).
 13. Traffic Stats. URL: <https://www.tomtom.com/products/traffic-stats/> (дата звернення: 12.10.2024)
 14. «Floating car data» чи що то за «Плаваючі дані про автомобілі»? URL: <https://pro-mobility.org/dumka/floating-car-data/> (дата звернення: 12.10.2024).
 4. Bartovic, M., Drličiak M. (2010). Influence of capacity restraint functions on traffic distribution and their practical use in the traffic modelling. *Communications – Scientific letters of the University of Zilina*. V.12. № 3. P.23–27. <https://doi.org/10.26552/com.C.2010.3A.23-27>
 5. Weis, C., Rindsfuser, G., Matthews, W. (2018). Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen / Calibration of capacity restraint functions. № 1628.
 6. Oskarbski, J., Jamroz, K., Smolarek, L., Zawisza, M., Żarski, K. (2017). Analysis of possibilities for the use of volume-delay functions in the planning module of the TRISTAR system. *Transport Problems*. V. 12. № 1. P. 39–50. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.4>
 7. Vu, D. M., Horbachev, P. F., Koli, O. S., Svichynskiy, S. V. (2020). Rozpodil potokiv individualnoho avtotransportu v miskykh merezhakh na osnovi zatrymok na perekhrestiakh [Urban traffic assignment based on signalized intersection delays]. *Avtomobilnyi transport – Automobile transport*. No. 46. Pp. 47–62. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.47>
 8. PTV VISUM user manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2023. 2694 p.
 9. Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer. Washington: U.S. Department of commerce, Bureau of public roads, 1964.
 10. Highway Capacity Manual 7th Edition: A guide for multimodal mobility analysis. Washington, DC: The National academies press, 2022. 1286 p. <https://doi.org/10.17226/26432>
 11. Sistuk, V., Monastyrskiy, Y., Maksymenko, I. (2023). Calibration of traffic microsimulation models using the results of intelligent video analysis of the traffic. *Transport Means: Proceedings of the 27th International Scientific Conference* (Palanga, 4–6 Oct. 2023). Palanga, 2023. P. 368–374. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2023.P1>
 12. Traffic Survey. *An ultimate tool for the next generation of traffic surveys*. URL: <https://datafromsky.com/trafficsurvey/> (accessed: 12.10.2024).
 13. Traffic Stats. URL: <https://www.tomtom.com/products/traffic-stats/> (accessed: 12.10.2024)
 14. «Floating car data» chy shcho to za «Plavaiuchi dani pro avtomobili»? (“Floating car data” or what is it?) Available at: <https://pro-mobility.org/dumka/floating-car-data/> (accessed: 12.10.2024).

References

1. Ortúzar, Ju. de D., Willumsen, L. G. (2024). Modelling transport. 5th Edition. New Jersey. 720 p.
2. Gentile, G., Florian, M., Younes, H., Cats, O., Agostino, N. (2016). The Theory of transit assignment: basic modelling frameworks. *Springer tracts on transportation and traffic*. P. 287–386. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3_6
3. So, J., Stevanovic, A., Ostojic, M. (2017). Methodology to estimate volume-capacity ratios at traffic signals based on upstream-link travel times. *Journal of transportation engineering, Part A: Systems*. № 4. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000021>

Сістук Володимир Олександрович, к.т.н., доц. каф. автомобільного транспорту, sistuk@knu.edu.ua, тел. +38 0987-614-099, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, 50027, Україна.

Method for Defining VD-Functions for Transport Network Elements in an Urban Mobility Model

Abstract. Problem. One of the critical factors influencing the assignment of private transport demand in urban mobility models is the Volume-Delay Function (VDF) applied to transport network elements such as links, nodes, and turns. Decades of research have provided substantial insights into transportation modeling, including the identification of parameters essential for constructing VD-functions. Nevertheless, the accurate definition and calibration of VD-functions for all significant transportation network objects in urban models continue to demand innovative approaches. **Goal.** The objective of this study is to formulate a method for determining VD-functions for objects of the transport network within the urban mobility model developed using PTV Visum software, leveraging the analysis of historical traffic data. **Methodology.** The study establishes the relationships between the current speed of private transport and links congestion levels, as well as between travel time and congestion at nodes and turns when applying different VD-functions. Using Kryvyi Rih's urban mobility model, developed in PTV Visum software, the VD-functions were tested in various combinations, with a focus on selecting appropriate calibration parameters. The average vehicle flow rate in the loaded network served as the criterion for assessing

the alignment of the model's results with real-world conditions. For the city's street and road network, average daily traffic speeds were analyzed using data from the TomTom Traffic Stats portal, which utilizes FCD technology. The analysis concluded that Scenario 2 is the most suitable for Kryvyi Rih's mobility model, applying the Lohse function for links and TModel Nodes for nodes and turns. **Originality.** A scientifically interesting aspect is the approach of utilizing average daily vehicle speed data, obtained through FCD technology, to determine and calibrate VD-functions for various types of transport network objects within the urban mobility model. **Practical value.** This work holds practical significance for transportation modeling engineers, as the developed VD-functions can be applied during the calibration of private transport demand in mobility models for other cities. Additionally, it is valuable for decision-makers in the transport sector, aiding in more informed planning and management.

Key words: transport modeling, PTV Visum, VD-function, private transport, TomTom Traffic Stats.

Sistuk Volodymyr, Associate Professor, Ph.D,
Automobile Transport Department,
ORCID: 0000-0003-4907-4265, sistuk@knu.edu.ua,
Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly
Matusevich str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.
