

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 29.341

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.169

ЗАСТОСУВАННЯ МАКРОСКОПІЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МОДЕЛІ
ДЛЯ АНАЛІЗУ РОЗПОДІЛУ МІСЬКИХ ПОТОКІВ ВАНТАЖНОГО
АВТОТРАНСПОРТУ

Сістук В. О.

Криворізький національний університет

Анотація. Запропоновано підхід до формування функціональних залежностей для моделювання потоків вантажного автотранспорту в міських умовах на основі класичної 4-етапної моделі попиту, який реалізований у транспортній макромоделі м. Кривий Ріг з огляду на актуальну інтенсивність дорожнього руху й обмежень руху великогабаритного автотранспорту.

Ключові слова: вантажний автотранспорт, транспортні потоки, транспортна макромодель, PTV Visum, генерація поїздок, витрати на переміщення, розподіл поїздок, перерозподіл, натурні обстеження.

Вступ

Розроблення транспортної макромоделі для вантажного автотранспорту (ВАТ), який рухається транзитом містом і в міських умовах, є важливим для забезпечення балансу між вантажоперевізними можливостями та попитом на міські вантажні перевезення [1]. Моделювання потоків ВАТ за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє ідентифікувати ділянки перевантаження в міській транспортній мережі [2], розробляти сценарії оптимізації маршрутів ВАТ з огляду на обмеження дорожнього руху, визначати доцільність інфраструктурних змін, впроваджувати заходи з мінімізації впливу ВАТ на рух у центральних районах і обґрунтовувати інші процеси, які впливають на сталість міської транспортної системи.

Місто Кривий Ріг має важливе транспортно-логістичне значення, оскільки крізь нього проходять значні потоки ВАТ, насамперед ті, які підтримують роботу підприємств гірничодобувної, переробної галузей і металургії, що потребує ефективного прийняття рішень на транспорті для забезпечення безперебійного руху вантажів.

Застосування транспортного моделювання дозволить здійснити аналіз сучасного стану розподілу потоків ВАТ у м. Кривий Ріг, що може стати основою для вироблення ефективної стратегії управління рухом ВАТ і розвитку міської транспортної інфраструктури.

Аналіз публікацій

Потреба в попередньому аналізі наслідків прийняття проєктних рішень з міського тра-

нспортного планування до їх практичного впровадження стимулює розвиток моделей попиту для аналізу потоків ВАТ від місць їх виникнення до місць призначення. Такі моделі поділяють на два основні класи: макроекономічні та багатоетапні [3].

Макроекономічна модель міського ВАТ може передбачати використання алгоритму дискретного вибору [4] чи алгоритму динамічної просторової цінової рівноваги в безперервному часі. Останній ґрунтується на реакції переміщення вантажів на цінові дисбаланси, водночас в роботі [5] відсутні обчислювальні експерименти, які б дозволили перевірити його ефективність. Для моделювання поточного стану попиту на ВАТ може бути застосований підхід, заснований на аналізі ланцюгів поїздок, які відображають місця здійснення технологічних операцій ВАТ, їх тривалість, частоту та порядок їх відвідування. Однак зазначений підхід є ресурсомістким у частині пошуку вихідної інформації, оскільки потребує значного обсягу вхідної інформації для побудови моделі, що суттєво перевищує вимоги до даних у межах альтернативних методів моделювання попиту на ВАТ [6].

Більш усталеним підходом до моделювання попиту та розподілу потоків ВАТ є багатоетапні моделі. 4-етапна макроскопічна модель попиту цього класу моделей концептуально має паралелі із моделлю попиту на пасажирські перевезення [7]. Вона зазвичай розробляється в комерційному програмному забезпеченні з транспортного макроскопічного моделювання PTV Visum [8]. Функціона-

льні залежності, які складають її основу, визначаються відповідно до логістичних умов конкретного міста [9, 10]. На відміну від вищезазначеною моделлю динамічної просторової цінової рівноваги [5] або інших макроекономічних моделей [11], які є більш придатними для довгострокового та середньострокового аналізів, 4-етапна модель більше орієнтована на вирішення короткострокових завдань, однак не обмежується оперативним рівнем транспортного планування [3].

Базовими одиницями вимірювання потоку в межах багатоетапної моделі ВАТ можуть бути кількість перевезеного вантажу (товару) [3], поїздка вантажного транспортного засобу [7], поставка [12] або комбінація цих показників.

Як функціональні залежності для аналізу взаємодії попиту на відповідні вантажні автотransперевезення із транспортною пропозицією використовуються рівняння регресії як окремий інструмент аналізу [13] або для розроблення моделі попиту. Варто зазначити, що регресійний аналіз є чутливим до актуальності вихідних статистичних даних. Так, використані в дослідженні [13] статистичні дані для побудови регресійних рівнянь, що визначають попит на ВАТ між регіонами України, не враховують суттєвих змін у структурі попиту, спричинених повномасштабним воєнним вторгненням в Україну, починаючи з 2022 р., оскільки відповідні емпіричні спостереження були зібрані ще у 2021 р.

Крім горизонту планування та функціональних залежностей, в основі моделі важливу функцію здійснює просторовий масштаб транспортної макромоделі ВАТ. У дослідженні [14] обґрунтовано, що під час моделювання обсягів вантажних перевезень, вибору типу вантажного транспортного засобу або формування транспортно-логістичних планів для регіону доцільно враховувати міжрегіональні (сусідські) ефекти, зумовлені впливом розташованих поблизу великих міст. Це дослідження також доводить доцільність приналежність кордонних районів до транспортної макромоделі м. Кривий Ріг, функції яких здійснюють прилеглі приміські території.

Незважаючи на збільшення за останні роки кількості публікацій, присвячених моделюванню потоків ВАТ на основі 4-етапної моделі попиту [9, 10] із використанням спеціалізованого програмного забезпечення [8], обсяг відповідних наукових досліджень все ще залишається обмеженим. У відкритих джерелах відсутня інформація щодо прове-

дення аналогічних досліджень для м. Кривий Ріг.

Таким чином, розроблення відповідної транспортної макромоделі ВАТ надасть змогу здійснювати аналіз розподілу потоків ВАТ вздовж мережі цього міста з огляду на різні часові виміри планування, актуальний стан транспортного попиту та пропозиції, які відображатимуться через функціональні залежності моделі та вплив приміських територій на формування потоків ВАТ.

Мета та постановка завдання

Мета дослідження полягає у визначенні функціональних залежностей для моделювання потоків ВАТ у м. Кривий Ріг та їх реалізації за допомогою програмного забезпечення PTV Visum [8].

Для досягнення мети необхідним стає вирішення таких завдань:

- 1) розробити структурну схему макромоделі попиту для ВАТ;
- 2) визначити підходи щодо генерації поїздок різних систем ВАТ;
- 3) визначити критерії для аналізу функцій витрат на переміщення для різних систем ВАТ;
- 4) визначити параметри та функції аналізу розподілу попиту ВАТ у кордонних районах;
- 5) визначити функції перерозподілу ВАТ і критерії збіжності (конвергенції) для транспортної макромоделі;
- 6) реалізувати визначені функціональні залежності за допомогою моделювання в програмному забезпеченні PTV Visum як частини моделі міської мобільності м. Кривий Ріг (транспортної макромоделі) з огляду на зміни в попиті та транспортні пропозиції ВАТ на 2025 р.

Структурна схема транспортної макромоделі вантажного автотранспорту

Під час проєктування структури транспортної макромоделі попиту вантажного автотранспорту (МВАТ) враховані основоположні підходи до транспортного моделювання [2, 15, 16], зокрема щодо відображення в моделі таких фундаментальних принципів взаємодії транспортного попиту та пропозиції [2]:

- збільшення попиту супроводжується або стабільним рівнем витрат, або їх підвищенням, що описується за допомогою функції, яка дорівнює кривій пропозиції;
- підвищення витрат, спричинене обмеженою пропозицією зазвичай зумовлює або незмінність, або зменшення обсягу попиту.

Цей взаємозв'язок моделюється за допомогою функції, яка дорівнює кривій попиту.

Результати моделювання доцільно інтерпретувати лише після досягнення рівноважного стану, за якого розв'язок узгоджується із взаємодією попиту та пропозиції відповідно до кривих обох функцій. Попри те, що в реальних умовах транспортна система рідко перебуває в стані повної рівноваги, використання рівноважного підходу забезпечує концептуально узгоджену основу для порівняння різних сценаріїв прогнозування [15]. Водночас досягнення точної рівноваги в межах моделювання часто вимагає значних ресурсних витрат.

Відповідно до прийнятих сучасних нормативів з транспортного моделювання, які відображають закордонний досвід у відповідній сфері наукових досліджень та інженерії [2, 15, 16], для розроблення МВАТ адаптована стандартна 4-етапна структура. Модель використовується для трьох систем ВАТ:

FT1 – легкі вантажні автомобілі довжиною від 2,0 до 2,6 м з двома або більше двох осей вантажопідйомністю до 2 т;

FT2 – середні трьохосні вантажні автомобілі довжиною більше ніж 2,6 м вантажопідйомністю від 2 до 8 т;

FT3 – трьохосні самоскиди вантажопідйомністю більше ніж 8 т.

Структурна схема МВАТ наведена на рис.1.

Техніко-економічний аналіз транспортної системи ВАТ ґрунтується на вимірюванні в поїздах як базових одиницях. Транспортне моделювання здійснюється з огляду на визначені припущення щодо конфігурації транспортної мережі й обсягів попиту на перевезення з метою прогнозування таких ключових показників:

- загальної кількості поїздок, яка відображає рівень попиту;
- узагальненої вартості поїздок, яка репрезентує елементи пропозиції.

Для визначення просторового розподілу попиту та витрат поїздки мають бути агреговані у вигляді пар транспортних районів виникнення та призначення. Така структуризація дозволяє точно дослідити транспортні взаємозв'язки між різними частинами досліджуваної території. Реалізація цього підходу здійснюється через формування багатовимірних масивів інформації: матриці поїздок, яка відображає попит, та матриці узагальнених витрат, яка репрезентує пропозицію. Для кожної системи ВАТ формуються окремі

матриці поїздок, що забезпечує диференційований аналіз транспортної поведінки.

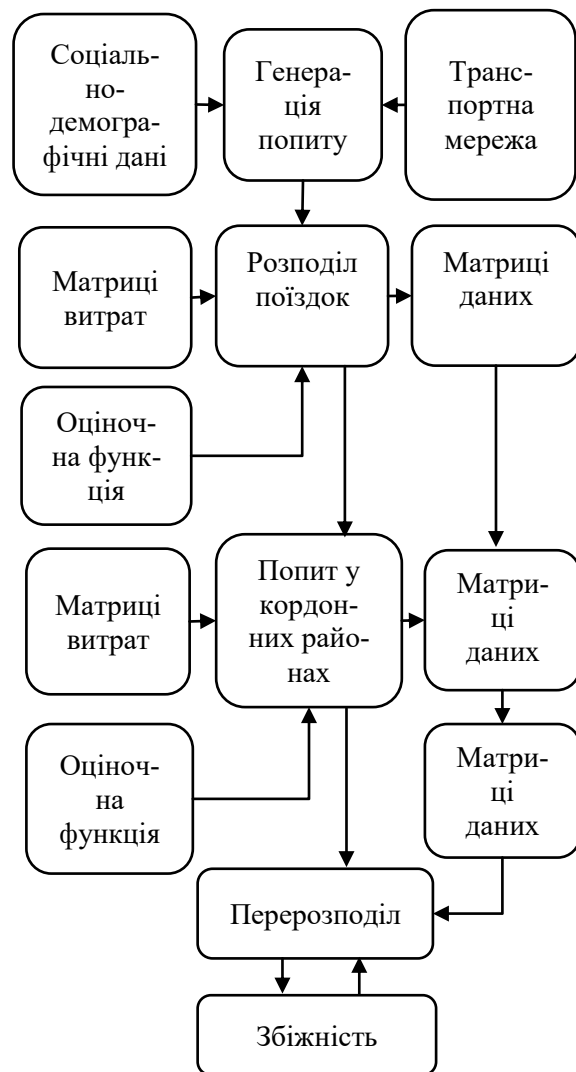


Рис.1. Структура МВАТ

У транспортному моделюванні просторовий континуум поділяється на агреговані територіальні одиниці – транспортні райони (ТР). Матриці поїздок і витрат структуровані за парами цих ТР, що дозволяє здійснювати аналіз переміщень і відповідних витрат між усіма комбінаціями ТР виникнення та призначення. Така сегментація забезпечує необхідну деталізацію для кількісного аналізу попиту та пропозиції у межах моделі.

Модель попиту застосовується для прогнозування матриці поїздок за системами ВАТ для міських і кордонних ТР моделі на основі таких параметрів [15]:

- актуалізованих оцінок матриць узагальнених витрат;
- рівнів попиту на перевезення, які формуються відповідно до припущень щодо со-

ціально-демографічних показників, зокрема чисельності населення та рівня зайнятості в певних сферах економічної діяльності.

Розрахунок матриць витрат здійснюється за допомогою моделі перерозподілу, яка заснована на таких компонентах:

- оновленому аналізі матриці даних (поїздок), що відображає просторовий розподіл попиту;

- моделі мережі, яка є формалізованим математичним відображенням структури транспортної мережі, що в процесі моделювання реалізується у вигляді геоінформаційної системи та використовується для розрахування узагальненої вартості поїздок між усіма транспортними районами (ТР) виникнення та призначення.

За допомогою моделі перерозподілу здійснюється розподіл поїздок за маршрутами, визначаючи обсяги попиту на кожен окремий елемент транспортної мережі.

Генерація поїздок

На етапі формування транспортного попиту кількість поїздок, що генерується в ТР, залежить від інтенсивності економічної діяльності, наведеної за допомогою структурних показників.

Створення поїздок Q_{ift1} , Q_{ift2} , Q_{ift3} визначається для систем вантажного транспорту FT1, FT2, FT3 з огляду на обсяги генерації v_{li} , v_{mi} , v_{hi} , які залежать від структурних показників l , m , h та відповідних коефіцієнтів утворення a_{pi} , b_{pi} , c_{pi} :

$$\left. \begin{aligned} Q_{ift1} &= \sum_l v_{li} \cdot a_{pi} \\ Q_{ift2} &= \sum_m v_{mi} \cdot b_{pi} \\ Q_{ift3} &= \sum_h v_{hi} \cdot c_{pi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Притягнення поїздок A_{jft1} , A_{jft2} , A_{jft3} до району j розраховується аналогічно – за обсягами притягнення p_{lj} , p_{mj} , p_{hj} відповідно до структурних показників l , m , h та за коефіцієнтами притягнення d_{sj} , e_{sj} , f_{sj} :

$$\left. \begin{aligned} A_{jft1} &= \sum_l p_{li} \cdot d_{sj} \\ A_{jft2} &= \sum_m p_{mj} \cdot e_{sj} \\ A_{jft3} &= \sum_h p_{hi} \cdot f_{sj} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Коефіцієнти утворення та притягнення є ваговими коефіцієнтами для структурних показників l , m , h , а обсяги утворення та притягнення для кожної із систем БАТ визначаються сумарною кількістю робочих місць у ТР за групами економічної діяльності [17] (атрибути ТР):

w_1 : A, B, F;

w_2 : C, D, E, I, G, H;

w_3 : J, K, L, M, N, O, P, Q.

Розрахування матриць витрат

Матриці узагальнених витрат для систем БАТ (TSys) FT1–FT3 визначаються з огляду на такі показники:

- поточний час (t_{cur} -PrTSys) – час поїздки для транспортної системи TSys індивідуального транспорту Pr у завантаженій мережі;

- відстань поїздки (DIS) – фактична відстань між пунктом відправлення та призначення;

- опір шляху (IMP-PrTSys) – опір у TSys у ненавантаженій мережі.

Під час пошуку найкоротшого шляху в мережі для FT1–FT3 використовується агреговане значення опору IMP-PrTSys як критерій пошуку, отримане під час розрахування всіх шляхів.

Функції опору в системах БАТ будуть відрізнятися для різних об'єктів транспортної мережі.

Для ділянок мережі (відрізків у комп'ютерній моделі) опір IMP_l визначається лінійною залежністю від часових параметрів поїздки:

$$IMP_l = \lambda \cdot t_{curn} + \gamma \cdot \beta + \rho \cdot A_{dd}, \quad (3)$$

де t_{curn} – час поїздки в завантаженій мережі для n -ї системи транспорту FT1–FT3; β – атрибут відрізка мережі, який враховує обмеження (заборону) проїзду на цьому відрізку; A_{dd} – атрибут відрізка, який враховує додаткові витрати часу під час проїзду на ньому; λ , γ , ρ – корегувальні коефіцієнти функції опору на відрізках.

Функцію опору IMP_l на відрізках також можна записати як нелінійну залежність:

$$IMP_l = \lambda'' \cdot t_{curn} \cdot \gamma \cdot \beta + \lambda^* \cdot t_{curn} + \rho \cdot A_{dd}, \quad (4)$$

де λ'' , λ^* – коригувальні коефіцієнти.

Для примикань і поворотів у МВАТ функції опору IMP_c й IMP_t визначатимуться без урахування атрибутів, які використовуються для відрізків:

$$IMP_c = \lambda_c \cdot t_{curn}, \quad (5)$$

$$IMP_t = \lambda_t \cdot t_{curn}, \quad (6)$$

де λ_c , λ_t – коригувальні коефіцієнти для примикань і поворотів.

Усереднення матриць витрат

Для покращення збіжності моделі попиту доцільно використовувати значення матриць витрат за декілька ітерацій розрахунку, замість значень, отриманих лише на поточному етапі моделювання. Процедури зворотного зв'язку на основі методу послідовних середніх (method of successive averages – MSA) дозволяють обчислювати усереднені значення для пар матриць витрат:

$$A = \frac{1}{i+1} \cdot B + \frac{1}{i+1} \cdot C, \quad (7)$$

де A – вихідне, щойно обчислене значення матриці; B – значення матриці в поточній ітерації; C – середнє значення матриці всіх попередніх ітерацій; i – номер ітерації.

Функція обчислення середнього значення в PTV Visum реалізована як вбудована формула MSA, яка визначає номер ітерації, що забезпечує більшу гнучкість моделювання.

Розподіл поїздок мережею

Транспортний зв'язок між ТР відправлення та призначення визначається привабливістю ТР призначення та витратами на переміщення, які визначаються за допомогою описаних вище матриць витрат. Математичним підходом до розподілу поїздок між ТР є гравітаційна модель, яка заснована на пропорційній залежності між попитом у ТР відправлення та призначення і функцією корисності, яка враховує транспортні витрати [15].

Коефіцієнти функції корисності, що визначають реакцію користувачів на відстань та час на переміщення способом калібрування на основі фактичного попиту. Прогностична здатність моделі залежить від точності аналізу поведінки користувачів щодо змін у мережі та якості вхідних прогнозних даних.

Для МВАТ застосована логіт-модель для визначення розподілу поїздок [16]:

$$f(U_{ij}) = e^{c \cdot U_{ij}}, \quad (8)$$

де U_{ij} – значення корисності поїздки між ТР, час у дорозі від ТР i до ТР j ; c – параметр калібрування функції корисності.

Результати розподілу поїздок зберігаються в нових матрицях даних за кожною системою ВАТ.

Розрахування транспортного руху в кордонних районах

Модель генерації транспортного руху в кордонних районах враховує за кожним ра-

йоном частку транзиту в транспортному потоці, обсяг вхідного та вихідного транспортного потоку, кількість робочих місць, які реалізовані в МВАТ за допомогою відповідних атрибутів та є вихідними даними транспортної моделі.

Статистичні дані щодо ТР унормовуються як середнє значення розрахованих сум.

Оціночною функцією є логіт-модель, аналогічна моделі розподілу поїздок мережею. Матриця витрат за кожною із систем ВАТ враховує час у дорозі між ТР.

У МВАТ результатом розрахунку транспортного руху ВАТ у кордонних районах є окремі матриці кореспонденцій для систем FT1-FT3.

Подальша процедура розрахунку передбачає підсумовування матриць розподілу поїздок з матрицями кореспонденцій вздовж кордонних районів.

Перерозподіл потоків

На останньому етапі моделювання для процедури перерозподілу транспортних потоків ВАТ мережею використано алгоритм Bi-conjugate Френка-Вульфа [16] – один із найпоширеніших алгоритмів перерозподілу на відрізках.

Реалізація алгоритму Bi-conjugate Френка-Вульфа є ефективною для дотримання умови рівноважного перерозподілу [16]. Алгоритм комбінує розподіли типу «все або нічого», призначаючи весь потік між парою створення-призначення до найкращого маршруту згідно з поточними витратами.

Алгоритм спрямований на пошук розподілу транспортних потоків V_a , які дорівнюють першому принципу рівноваги Вардропа [16], мінімізуючи цільову функцію Z , що описує загальні витрати в мережі:

$$Z = \sum_a \int_0^{V_a} C_a(v) dv \quad (9)$$

де a – відрізок у мережі, $C_a(v)$ – вартість поїздки на відрізку з обсягом потоку v ; V_a – обсяг поїздок на кожному відрізку як верхня межа інтегрування.

У термінах потоків на відрізках мережі оптимальне рішення знаходиться із виразу:

$$V_a^{n+1} = (1 - \sigma) \cdot V_a^n + \sigma \cdot f_a^n \quad (10)$$

де V_a^n – потік на відрізку на ітерації n ; f_a^n – транспортний потік за принципом Вардропа «все або нічого»; σ – відстань, за якою досягається цільова функція Z .

Критерій збіжності перерозподілу

Для перевірки якості процедури перерозподілу використано критерій збіжності – гіпотетичний опір транспортного засобу (GAP). Значення цього показника є зваженою різницею між опором транспортного засобу мережі на поточній ітерації і гіпотетичним опором транспортного засобу:

$$GAP = \frac{V_{imp} - V_{h.imp}}{V_{h.imp}}, \quad (11)$$

де V_{imp} – опір транспортного засобу мережі; $V_{h.imp}$ – гіпотетичний опір транспортного засобу.

Мінімальне значення опору, розраховане для наступного кроку ітерації, передбачає, що всі транспортні засоби на основі поточного опору в мережі використовують оптимальний шлях.

У послідовних ітераціях визначаються порогові значення відносних відхилень між потоками та опорами, а також частка об'єктів мережі, які мають задовольняти цим пороговим значенням.

Впровадження

Наведені функціональні залежності (1–11) стали основою МВАТ м. Кривий Ріг, яка реалізована у складі відповідної моделі міської мобільності, розробленої за допомогою PTV Visum.

Міська дорожня мережа для неї детально проаналізована в роботі [18].

Числові показники, використані для функціональних залежностей у МВАТ на різних етапах моделювання транспортного попиту, наведені в табл. 1.

На етапі розроблення МВАТ враховані актуальний стан попиту на ВАТ на окремих ділянках міської мережі та деякі особливості транспортної пропозиції.

Транспортний попит вивчався в березні 2025 р. у процесі натурного обстеження годинної інтенсивності руху ВАТ у будній день на характерних локаціях мережі (див. рис. 2), що дозволило порівняти модельні та емпіричні значення інтенсивності потоків ВАТ у вузлах та використати отримані емпіричні значення для моделювання обсягів вхідних потоків у кордонних ТР. Перед моделюванням годинні інтенсивності потоків зведені до добових значень.

Таблиця 1 – Числові параметри налаштування МВАТ у м. Кривий Ріг

Параметр	Система ВАТ		
	FT1	FT2	FT3
Генерація попиту			
Коефіцієнти утворення / притягнення			
a_{pi}/d_{sj}	0,115	0,015	0,04
b_{pi}/e_{sj}	0,07	0,05	0,025
c_{pi}/f_{sj}	0,05	0,02	0,002
Розрахунок матриць витрат			
Корегувальні коефіцієнти для відрізків			
λ	1000	-	-
λ''	-	100	200
λ^*	-	200	400
γ	600	2	4
ρ	1	500	1000
Корегувальні коефіцієнти для примикань індивідуального транспорту			
λ_c	100	100	120
Корегувальні коефіцієнти для поворотів			
λ_t	1,0	1,1	1,2
Розподіл поїздок мережею			
Параметр калібрування функції корисності			
c	-0,02		
Розрахунок потоків у кордонних районах			
Параметр калібрування функції корисності			
c	-0,02		
Перерозподіл потоків			
Максимальна кількість ітерацій	400		
Максимальний GAP	0,0001		

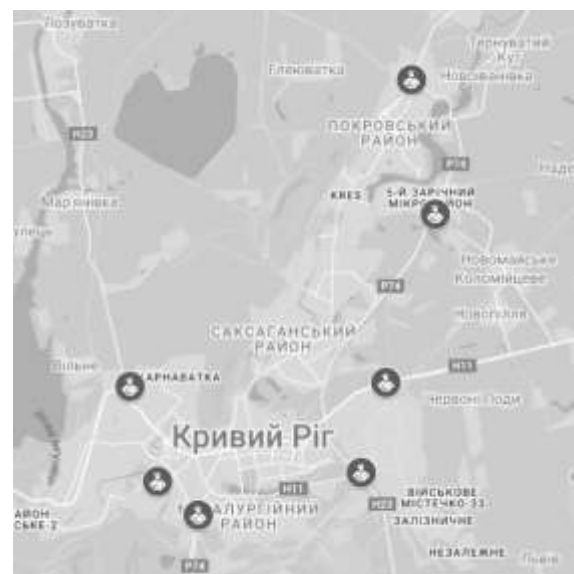


Рис. 2. Локації обстеження інтенсивності потоків ВАТ

Врахування актуальної транспортної пропозиції передбачало вивчення організації дорожнього руху на ділянках вулично-

дорожньої мережі м. Кривий Ріг у частині обмеження проїзду БАТ більше ніж 3,5 т. Для цього була залучена схема проїзду транзитного БАТ у Центрально-Міському районі [19], актуальність якої перевірена на місцях, та проведено обстеження мережі на наявність відповідних заборонних знаків організації руху. Отримана інформація використана для налаштування атрибута β тих відрізків у моделі PTV Visum, що дорівнюють ділянкам вулиць, для яких у реальних умовах діє зазначене обмеження.

Результати моделювання

Збіжність перерозподілу для системи БАТ FT1 за GAP становила $3,69 \times 10^{-6}$ і була досягнута на 27 ітерації, для системи FT2 вона становила $9,77 \times 10^{-6}$ на 27 ітерації, для системи FT3 – $2,81 \times 10^{-6}$ на 18 ітерації за встановленого порогового значення $GAP = 10^{-5}$ (див. табл. 1).

Результати моделювання подані на рис.3 у вигляді картограм добових потоків БАТ для кожної із трьох досліджуваних транспортних систем.



Рис. 3. Картограми потоків БАТ для систем FT1, FT2, FT3 у м. Кривий Ріг

Обговорення

Моделювання системи БАТ для м. Кривий Ріг у програмному забезпеченні PTV

Visum дозволило визначити базовий сценарій (наявний стан) формування потоків БАТ. Розроблена модель може бути підґрунтям для вироблення та перевірки проєктних рішень, наприклад щодо зміни таких транспортних пропозицій, як нові обмеження в організації руху для можливості проїзду довгомірів або розвитку міста як транспортного вузла для транзиту БАТ.

Аналізуючи отримані показники добової інтенсивності потоків БАТ (рис.3), варто визначити ділянки вулично-дорожньої мережі, на яких формуються основні транспортні потоки залежно від системи БАТ (див табл. 2).

Таблиця 2 – Приклади ділянок мережі із максимальними добовими транспортними потоками БАТ в одному напрямку руху

Ділянка мережі	Потік на максимально завантаженому відрізку ділянки, авт./доба		
	FT1	FT2	FT3
пр. Центральний	1801	1002	-
пр. Миру	2440	1053	-
вул.Кобилянського	266	115	2807
вул. Вільної Ічкерії	2509	421	100
вул. Старовокзальна	141	23	2122
вул. Чумацький Шлях	2458	514	987
Нікопольське шосе	1189	216	1769
Об'їзна дорога (район вул.Кокчетавської)	359	132	1199
Дніпровське шосе	929	609	1132
вул. В.Великого	2504	372	-
пр.200-річчя Перемоги	2816	478	-

Системи FT1 і FT2 використовують здебільшого на магістральних вулицях міста для доступу до ТР та транзиту, зокрема на пр. Миру, пр. Центальному, вул. Вільної Ічкерії, вул. В. Великого, Дніпровському шосе. Для системи FT3 проїзд магістральними вулицями заборонений. Натомість вул. Старовокзальна та вул.

Кобилянського експлуатуються для об'їзду центральної частини міста. Транспортне навантаження від FT3 також підвищено, як порівняти з іншими ділянками мережі для Нікопольського та Дніпровського шосе, які сполучають приміські райони заходу, сходу та південного сходу міста. Рух БАТ FT3 у північному напрямку відбувається крізь Об'їзну дорогу та вул. Гетьманську.

Вузьким місцем міської дорожньої мережі є вул. Чумацький Шлях, який сполучає адміністративний центр міста із південними районами. Ця ділянка забезпечує загальний для всіх систем БАТ потік на рівні 3555 авт./добу в одному напрямку руху, що перевищує інтенсивності потоків на інших завантажених ділянках, відкритих для всіх систем БАТ, які знаходяться на рівні 2550–2600 авт./добу для одного напрямку руху.

Висновки

У роботі запропоновано підхід до визначення функціональних залежностей, необхідних для розбудови моделі попиту на вантажні автоперевезення в міських умовах для трьох систем БАТ, що ґрунтується на класичній 4-етапній моделі попиту. Розроблено модель попиту БАТ, реалізовану на прикладі м. Кривий Ріг у програмному забезпеченні PTV Visum з огляду на актуальний стан попиту і пропозиції БАТ. Для цього в березні 2025 р. здійснено комплекс польових транспортних обстежень: інтенсивності дорожнього руху на 7 локаціях м. Кривий Ріг, вздовж яких проходять основні потоки БАТ, та вулично-дорожньої мережі з метою виявлення обмежень руху великогабаритного автотранспорту.

За допомогою транспортного моделювання визначені добові інтенсивності потоків БАТ на всіх ділянках вулично-дорожньої мережі м. Кривий Ріг. Було проаналізовано ділянки мережі, які визначаються максимальним навантаженням від БАТ.

Визначені числові характеристики функціональних залежностей, що застосовуються в процедурах генерації попиту, розподілу поїздок у межах транспортної мережі та аналізу транспортних витрат, є специфічними для розглянутого сценарію моделювання попиту на БАТ. Водночас, крім практичного значення, ці характеристики мають науковий інтерес, оскільки дозволяють розширити наявні методи дослідження попиту на БАТ і вдосконалити підходи до його моделювання з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Практичну цінність також мають отримані результати моделювання, які дозволяють, після модифікації моделі здійснити аналіз різноманітних альтернатив щодо впровадження змін до транспортної пропозиції або різноманітних сценаріїв формування попиту на БАТ.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на перевірку впливу обсягів тра-

нзитного руху БАТ на функціонування міської транспортної системи як частину сценарію перетворення міста на один із транзитних центрів національної логістичної мережі.

Література

1. Ghaemi S. A., Hosseini H.M. Modeling the Urban Freight-Transportation System Using the System Dynamics Approach. *Systems*. 2023. Vol. 11(8):409. <https://doi.org/10.3390/systems11080409>
2. Ortúzar Ju. de D., Willumsen L. G. *Modelling transport*. 5th Edition. New Jersey. 2024. 720 p.
3. Comi A., Delle Site P., Filippi F., Nuzzolo A. Urban Freight Transport Demand Modelling: a State of the Art. *European Transport. Trasporti Europei*. 2012. Vol. 51(7). 17 p.
4. Ahmed U., Roorda M. J. Modeling Freight Vehicle Type Choice using Machine Learning and Discrete Choice Methods. *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2676(2). P. 541–552. <https://doi.org/10.1177/03611981211044462>
5. Friesz T. Dynamic Spatial Price Equilibrium, Dynamic User Equilibrium, and Freight Transportation in Continuous Time: a Differential Variational Inequality Perspective. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2024. Vol. 190 (103085). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.103085>
6. A Review of Big Data in Road Freight Transport Modeling: Gaps and Potentials / W.Shoman et al. *Data Science for Transportation*. 2023. Vol. 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42421-023-00065-y>
7. Mitra S., Ndembe E., Kayabas P. Logistics Concepts in Freight Transportation Modeling. *Journal of Transportation Management*. 2015. Vol. 26(1). P. 29–42. <https://doi.org/10.22237/jotm/1435708980>
8. PTV VISUM user manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2023. 2694 p.
9. Suartawan E., Sadri P., Hidayat D. Trip Assignment Modeling for Transportation in Denpasar City Using PTV Visum Software. *Jurnal Teknologi Transportasi dan Logistik*. 2024. Vol. 5. P. 11–18. <https://doi.org/10.52920/jttl.v5i1.256>
10. Pivtorak H., Svadlenka L. Using Public Transport System for Sustainable Urban Freight Delivery. *University of Pardubice*. 2025. 112 p.
11. A Freight Forecasting Method for Multimodal Transport Networks Using a High-Fidelity Integrated Modeling Approach / Z. Wang et al. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9644-1_36
12. Freight Transport Modelling in Urban Areas: the French Case of the FRETURB Model / F. Toilier / Case Studies on Transport Policy. 2018/ Vol. 6 (4). 753–764. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.09.009>
13. Semeriahina M., Shevchenko I., Savchenko L. Modeling of Regional Freight Flows of Road Transport in Ukraine. *Electronic Scientific Jour-*

- nal Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management. 2021. Vol. 6 (2021). P. 6–22. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2021-6-1>
14. Gunay G. Shipment Size and Vehicle Choice Modeling for Road Freight Transport: a Geographical Perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2023. Vol. 173 (103732). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2023.103732>
 15. Transport Analysis Guidance (TAG) UNIT M1.1: Principles of Modelling and Forecasting. London: Department for Transport/ 2024. 48 p. <https://www.gov.uk/guidance/transport-analysis-guidance-tag>
 16. Transport Analysis Guidance (TAG) Unit M3.1: Highway Assignment Modelling. London: Department for Transport, 2024. 119 p. <https://www.gov.uk/guidance/transport-analysis-guidance-tag>
 17. Kласифікація видів економічної діяльності (KVED-2010) складається з таких секцій. (Classification of Types of Economic Activity (CTEA-2010) consists of the following sections). Available at: https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED-2010/kv10_i.html (accessed 12 May 2025).
 18. Sistuk V. A Comparative Study of Headway-Based and Transport System-Based Assignments of Public Transport in Visum: the City of Kryvyi Rih Case. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2024. Vol. 124. P. 171–182. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.124.12>
 19. Skhema orhanizatsii dorozhnoho rukhu tranzhytnykh vantazhnykh transportnykh zasobiv ta marshrutnoho oriєntuvannia na vulytsiakh ta dorohakh Tsentralno-Miskoho raionu m. Kryvoho Rohu (Scheme of traffic organization for transit freight vehicles and route orientation on the streets and roads of the Central City District of Kryvyi Rih) Available at: https://drive.google.com/file/d/1ycb0xMuurToqUfJodsPQPAB47AKoGalE/view?usp=drive_link (accessed 12 May 2025).
- ### References
1. Ghaemi, S. A., Hosseinlou, H. M. (2023). Modeling the Urban Freight-Transportation System Using the System Dynamics Approach. *Systems*. Vol. 11(8):409. <https://doi.org/10.3390/systems11080409>
 2. Ortúzar Ju. de D., Willumsen, L. G. *Modelling transport*. 5th Edition. New Jersey, 2024. 720 p.
 3. Comi, A., Delle Site, P., Filippi, F., Nuzzolo, A. (2012). Urban Freight Transport Demand Modelling: A State of the Art. *European Transport. Trasporti Europei*. Vol. 51(7). 17 p.
 4. Ahmed, U., Roorda, M. J. (2021). Modeling Freight Vehicle Type Choice using Machine Learning and Discrete Choice Methods. *Transportation Research Record*. Vol. 2676(2). P. 541–552. <https://doi.org/10.1177/03611981211044462>
 5. Friesz, T. (2024). Dynamic Spatial Price Equilibrium, Dynamic User Equilibrium, and Freight Transportation in Continuous Time: A Differential Variational Inequality Perspective. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 190 (103085). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.103085>
 6. Shoman, W., Yeh, S., Sprei, F., Köhler, J., Plötz, P., Todorov, Y., Rantala, S., Speth, D. (2023). A Review of Big Data in Road Freight Transport Modeling: Gaps and Potentials. *Data Science for Transportation*. Vol. 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42421-023-00065-y>
 7. Mitra, S., Ndembe, E., Kayabas, P. (2015). Logistics Concepts in Freight Transportation Modeling. *Journal of Transportation Management*. Vol. 26(1). P. 29–42. <https://doi.org/10.2237/jotm/1435708980>
 8. PTV VISUM user manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2023. 2694 p.
 9. Suartawan, E., Sadri, P., Hidayat, D. (2024). Trip Assignment Modeling for Transportation in Denpasar City Using PTV Visum Software. *Jurnal Teknologi Transportasi dan Logistik*. Vol. 5. P. 11–18. <https://doi.org/10.52920/jttl.v5i1.256>
 10. Pivtorak, H., Svadlenka, L. (2025). Using Public Transport System for Sustainable Urban Freight Delivery. University of Pardubice. 112 p.
 11. Wang, Z., Zhong, M., Li, L., Safdar, M., Hunt, J. (2024). A Freight Forecasting Method for Multimodal Transport Networks Using a High-Fidelity Integrated Modeling Approach. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9644-1_36
 12. Toilier, F., Gardrat, M., Routhier, J. L., and Bonnafous, A. Freight Transport Modelling in Urban Areas: The French Case of the FRETURB Model. (2018). *Case Studies on Transport Policy*. Vol. 6 (4). 753–764. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.09.009>
 13. Semeriahina, M., Shevchenko, I., Savchenko, L. (2021). Modeling of Regional Freight Flows of Road Transport in Ukraine. *Electronic Scientific Journal Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management*. Vol. 6 (2021). P. 6–22. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2021-6-1>
 14. Gunay, G. (2023). Shipment Size and Vehicle Choice Modeling for Road Freight Transport: A Geographical Perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 173 (103732). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2023.103732>
 15. Transport Analysis Guidance (TAG) UNIT M1.1: Principles of Modelling and Forecasting. London: Department for Transport, 2024. 48 p. <https://www.gov.uk/guidance/transport-analysis-guidance-tag>
 16. Transport Analysis Guidance (TAG) Unit M3.1: Highway Assignment Modelling. London: Department for Transport, 2024. 119 p. <https://www.gov.uk/guidance/transport-analysis-guidance-tag>
 17. Kласифікація видів економічної діяльності (KVED-2010) складається з таких секцій. (Classification of Types of Economic Activity

- (CTEA-2010) consists of the following sections). Available at: https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED_2010/kv10_i.html (accessed: 12 May 2025).
18. Sistuk, V. A (2024). Comparative Study of Headway-Based and Transport System-Based Assignments of Public Transport in Visum: the City of Kryvyi Rih Case. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. Vol. 124. P. 171–182. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.124.12>
19. Skhema orhanizatsii dorozhnoho rukhu tranznykh vantazhnykh transportnykh zasobiv ta marshrutnoho oriientuvannia na vulytsiakh ta dorohakh Tsentralno-Miskoho raionu m. Kryvoho Rohu (Scheme of traffic organization for transit freight vehicles and route orientation on the streets and roads of the Central City District of Kryvyi Rih) Available at: https://drive.google.com/file/d/1ycb0xMuurToqUfJodsPQPAB47AKoGalE/view?usp=drive_link (accessed: 12 May 2025).

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, м. Кривий Ріг, 50027,
Україна.

Application of a Transport Macro Model for Assessing the Assignment of Urban Freight Traffic

Abstract. Problem. The volume of contemporary scientific research dedicated to modeling urban freight transport flows remains insufficient. There are no scientific publications addressing such studies for the city of Kryvyi Rih. This highlights the relevance of developing a macroscopic freight transport model for Kryvyi Rih, which would enable the assessment of freight traffic assignment across the city's road

network. **Goal.** Determination of functional relationships for freight traffic flow modeling in Kryvyi Rih using a macroscopic transport model. **Methodology.** The research methodology is based on the classical four-step travel demand model, which involves determining the appropriate parameters for functional relationships used at various modeling stages, namely: trip generation, travel cost calculation, trip distribution, and assignment. The changes in demand were assessed by measuring freight traffic intensity at seven locations in the city of Kryvyi Rih, while changes in supply were evaluated by identifying segments of the street network with restrictions on the movement of heavy freight vehicles. To validate the traffic assignment procedure within the model, the convergence criterion known as the «GAP» (hypothetic vehicle impedance) was applied. **Results.** As a result of the modeling, freight traffic flow intensities were determined for all segments of the street and road network in the city of Kryvyi Rih. **Originality.** The functional relationships identified for modeling the distribution of freight vehicles across the network contribute to the advancement of existing freight demand research methods using specialized software tools. **Practical value.** The model enables the analysis of an unlimited number of scenarios related to changes in urban freight transport in the city of Kryvyi Rih.

Key words: freight transport, traffic flows, macroscopic transport model, PTV Visum, trip generation, travel costs, trip distribution, traffic assignment, field surveys.

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.