

Сістук В.О.  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ПОПИТУ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІСТІ КРИВИЙ РІГ

У роботі розроблений підхід до моделювання генерації попиту (кількості поїздок) на вантажному автомобільному транспорті у 4-етапній моделі розрахунку попиту. Даний підхід полягає у тому, що: 1.) міській вантажний автотранспорт розглядається у складі трьох відокремлених систем: легких вантажних автомобілів довжиною від 2,0 до 2,6 м з двома або більше двох осей вантажопідйомністю до 2 т, середніх трьохосних вантажних автомобілів довжиною більше 2,6 м вантажопідйомністю від 2 до 8 т та трьохосних самоскидів вантажопідйомністю більше 8 т. 2.) у процедурах утворення та притягнення поїздок у якості структурних показників використовується кількість робочих місць як атрибут транспортних районів розподілена відповідно до конкретного для кожної із систем вантажного автотранспорту набору видів економічної активності. Для перевірки даного підходу проведено моделювання генерації попиту на вантажному автотранспорті у транспортній моделі міста Кривий Ріг у програмному забезпеченні PTV Visum. Результати моделювання показали, що кількість поїздок, які утворюються та притягуються різними транспортними районами міста, збігається, що підтверджує коректність обраного підходу до розрахунку генерації поїздок для визначених систем вантажного транспорту. Встановлено, що формування та поглинання поїздок на міському вантажному автотранспорті в Кривому Розі значно переважає в порівнянні з іншими транспортними районами моделі в шести районах, де розташовані підприємства гірничо-металургійного комплексу, які отримали назву гірничопромислових при попередніх дослідженнях міської мобільності Кривого Рогу (на пасажирському транспорті). Подальші дослідження будуть присвячені іншим процедурам розрахунку транспортного попиту в рамках 4-етапної транспортної моделі.

**Ключові слова:** транспортний попит, вантажний автомобільний транспорт, транспортна система, транспортне моделювання, PTV Visum, генерація попиту, утворення поїздок, притягнення поїздок, транспортний район, гірничопромисловий район.

### ВСТУП

Ефективна міська система вантажного транспорту забезпечує своєчасне постачання товарів, дозволяє знижувати витрати та покращувати рівень транспортного обслуговування як для бізнесу, так і для кінцевих споживачів [1]. Розвиток міських територій зазвичай супроводжується збільшенням обсягів вантажних перевезень, що створює виклики для транспортної системи. Неоптимізовані транспортно-логістичні процеси призводять до втрат часу, підвищеного споживання пального транспортними засобами, погіршення екологічної ситуації та підвищення витрат на транспортування [2, 3]. Таким чином, у сучасних умовах та зростаючих викликів міська мобільність і вантажні перевезення вимагають нових підходів та технологій для вивчення, спрямованих на досягнення ефективності та сталого розвитку.

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Закономірності формування попиту на перевезення вантажів автомобільним транспортом у сучасних умовах визначаються на основі результатів транспортного моделювання [4].

Для оптимізації вантажних перевезень важливе застосування сучасних методів моделювання, зокрема алгоритмічних моделей машинного навчання [5], лінійних [6, 7] та імітаційних моделей [8]. Використання штучного інтелекту, аналітики великих даних [9] також відкриває нові можливості для управління системами вантажного автотранспорту.

Багато концепцій моделювання, застосовуваних для прогнозування вантажних перевезень, були спочатку розроблені для пасажирських перевезень. Зокрема, знаходить підтвердження підхід [10], який полягає у тому, що 4-етапна транспортна модель для пасажирських перевезень може бути ефективно адаптована для моделювання вантажних перевезень. Вантажні перевезення мають певні спільні риси з пасажирськими, зокрема через використання спільної дорожньо-транспортної мережі як для пасажирських, так і для вантажних автотранспортних засобів, що дозволяє застосовувати модифіковані моделі пасажирських перевезень для аналізу вантажних перевезень.

Однак варто зазначити, що існують суттєві відмінності між пасажирськими та вантажними перевезеннями, які впливають на генерацію транспортного попиту, що має враховуватись при розробці відповідних транспортних моделей [11]. Вантажні перевезення включають більше

зацікавлених сторін (відправники, перевізники, водії, оператори). Тип вантажу варіюється від малих посилок до великих партій, що вимагає різних підходів до транспортування, через конфіденційність часто бракує детальних даних для моделювання вантажних перевезень, вантажі потребують спеціальної інфраструктури для навантаження і вивантаження, вантажні транспортні засоби можуть бути спеціалізованими, тобто розробленими для конкретних типів вантажів, на маршрут вантажу впливають кілька учасників перевізного процесу від відправника до отримувача, мережа вантажного транспорту може включати власні вузли (логістичні центри, склади), що мають окремі характеристики щодо пропускної здатності та часу затримки, умови перевезень характеризуються високим ступенем невизначеності [10, 11].

У роботах [10, 11] відзначається, що моделювання процесу прийняття рішень при здійсненні вантажних перевезень ускладнюється порівняно із моделюванням попиту на пасажирському транспорті взаємодією між учасниками перевізного процесу. В деяких випадках враховується проходження вантажними транспортними засобами вузлових точок мережі, що впливає на вибір маршруту та перерозподіл транспортного попиту. У роботі [11] зазначено, що на останньому етапі перерозподілу транспортного попиту на вантажні перевезення (призначення) доцільно застосовувати ті ж методи перерозподілу, що й для моделі пасажирського транспорту, оскільки обидві системи транспорту використовують однакову дорожню інфраструктуру. Останнє обумовлює необхідність одночасного розрахунку попиту на вантажні та пасажирські перевезення в межах однієї моделі.

Автори [12] відзначають, що моделювання попиту на вантажні перевезення завжди має чітку прив'язку до конкретних умов дорожньої мережі, рухливості населення, економічної активності, тому існуючі підходи та алгоритми до визначення закономірностей формування попиту на перевезення вантажним транспортом мають враховувати локальні фактори впливу. При моделюванні генерації попиту на вантажні перевезення мають бути враховані не тільки спостережувані вихідні дані, а й неспостережувані дані щодо характеристик ланцюгів постачань у системах вантажного транспорту [13].

У зв'язку з вищенаведеним, актуальним завданням є розроблення підходу до розрахунку генерації попиту (кількості поїздок) як першого етапу 4 крокової моделі попиту із реалізацією на прикладі транспортної моделі міста Кривий Ріг.

Для виконання поставленого завдання необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити підхід до процедури розрахунку генерації попиту на вантажні перевезення автомобільним транспортом для різних систем вантажного транспорту;
- реалізувати розроблені процедури за допомогою транспортної моделі міста Кривий Ріг;
- використати результати транспортного моделювання, провівши оцінку отриманих закономірностей генерації попиту на вантажні перевезення у місті Кривий Ріг.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Генерація попиту на міському вантажному автомобільному транспорті розглядається для трьох систем транспорту:

*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 2,6 м вантажопідйомністю від 2 до 8 т;

*FT3* – трьохосні самоскиди вантажопідйомністю більше 8 т.

Генерація транспортного попиту передбачає взаємозалежні процеси утворення поїздок з відповідних районів транспортної моделі та притягнення поїздок у дані райони [7].

На етапі утворення транспортного попиту продукування кількості поїздок для відповідного транспортного району залежить від структурних показників, які описують інтенсивність економічної діяльності в даному районі:

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

$Q_{ift1}$ ,  $Q_{ift2}$ ,  $Q_{ift3}$  – кількість поїздок, які утворюються вантажовідправниками транспортного району  $i$  для систем вантажного транспорту  $FT1$ ,  $FT2$  та  $FT3$  відповідно;

$V_{li}, V_{mi}, V_{hi}$  – обсяг генерації в транспортному районі  $i$  одиниці  $p$ , яка залежить від структурного показника  $l, m, h$  у різних системах транспорту  $FT1, FT2$  та  $FT3$ ;

$a_{pi}, b_{pi}, c_{pi}$  – коефіцієнти утворення, які описують кількість поїздок, що припадають на одиницю відповідного структурного показника.

Притягнення поїздок у транспортному районі  $j$  можна визначити наступним чином:

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

$A_{jft1}, A_{jft2}, A_{jft3}$  – кількість поїздок, які притягуються вантажоодержувачами транспортного району  $j$  для систем вантажного транспорту  $FT1, FT2$  та  $FT3$  відповідно;

$P_{lj}, P_{mj}, P_{hj}$  – обсяги притягнення поїздок в транспортному районі  $j$  одиниці  $s$ , які залежать від структурного показника  $l, m, h$  у різних системах транспорту  $FT1, FT2$  та  $FT3$ ;

$d_{sj}, e_{sj}, f_{sj}$  – коефіцієнти притягнення, які описують кількість поїздок, що припадають на одиницю відповідного структурного показника.

Балансування утворення та притягнення кількості поїздок передбачає, що сума поїздок, які генеруються, дорівнює сумі поїздок, які притягуються. В якості основи для балансування доцільно використовувати ітераційну процедуру, в якій використовуються середні значення кількості поїздок утворення та притягнення. При такому підході вантажопотік визначатиметься:

$$\left. \begin{aligned} F_{ijk}(n+1) &= F_{ijk}(n) \cdot \frac{Q_{ik}}{\sum_j F_{ij} \cdot \frac{A_{jk}}{A_{jk}(n)}} \cdot \frac{A_{jk}}{\sum_i F_{ij} \cdot \frac{Q_{ik}}{Q_{ik}(n)}} \cdot \frac{G_k}{G_k(n)} \\ \left| \frac{Q_{ik}(n)}{Q_{ik}} - 1 \right| &\leq \xi; \quad \left| \frac{A_{jk}(n)}{A_{jk}} - 1 \right| \leq \xi; \quad \xi = \frac{1}{f_q \cdot \sqrt{Q_{ik}}}; \quad \xi = \frac{1}{f_q \cdot \sqrt{A_{jk}}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$F_{ijk}$  – розрахована кількість поїздок із району  $i$  в район  $j$  у системі вантажного транспорту  $k$ ;

$F_{ijk}(n)$  – розрахована кількість поїздок із району  $i$  в район  $j$  на ітерації  $n$  у системі вантажного транспорту  $k$ ;

$Q_{ik}$  – бажана кількість поїздок із транспортного району  $i$  в системі вантажного транспорту  $k$ ;

$Q_{ik}(n)$  – кількість поїздок із транспортного району  $i$  на ітерації  $n$  в системі вантажного транспорту  $k$ ;

$A_{jk}$  – бажана кількість поїздок в транспортний район  $j$  в системі вантажного транспорту  $k$ ;

$A_{jk}(n)$  – кількість поїздок в транспортний район  $j$  на ітерації  $n$  в системі вантажного транспорту  $k$ ;

$G_k$  – сумарна кількість поїздок в системі вантажного транспорту  $k$ ;

$G_k(n)$  – сумарна кількість поїздок в системі вантажного транспорту  $k$  на ітерації  $n$ ;

$\xi$  – гранична величина поїздок утворення-притягнення;

$f_q$  – коефіцієнт якості за методом Лоз'є (приймається рівним 3) [14];

$n$  – номер ітерації;

$k$  – номер системи транспорту  $FT1, FT2, FT3$ .

Для моделювання використано мережу транспортної моделі міста Кривий Ріг, створену за допомогою програмного забезпечення PTV Visum [14]. Описання транспортної мережі, моделі попиту на пасажирський транспорт та моделі взаємодії, які розроблені в рамках моделювання, наведено у роботі [15]. У якості шарів попиту на етапі розрахунку моделі, що розглядається, виступає взаємодія кожної системи транспорту  $FT1, FT2$  та  $FT3$  із внутрішніми цілями поїздок, тобто внутрішній попит.

Утворення та притягнення поїздок у моделі вантажного транспорту міста Кривий Ріг здійснювалось з використанням таких підходів. У якості структурного показника прийнята кількість робочих місць у відповідному транспортному районі відповідно до класифікації видів економічної активності (КВЕД) [16]. У якості коефіцієнтів утворення  $a_{pi}$ ,  $b_{pi}$ ,  $c_{pi}$  та притягнення  $d_{sj}$ ,  $e_{sj}$ ,  $f_{sj}$  в рівняннях (1-2) наступні величини:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ift1} = A_{jft1} &= 0,115 \cdot w_1 + 0,07 \cdot w_2 + 0,05 \cdot w_3 \\ Q_{ift2} = A_{jft2} &= 0,015 \cdot w_1 + 0,05 \cdot w_2 + 0,02 \cdot w_3 \\ Q_{ift2} = A_{jft2} &= 0,04 \cdot w_1 + 0,025 \cdot w_2 + 0,002 \cdot w_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$w_1$  – сумарна кількість робочих місць у транспортному районі  $i$  (для утворення потоку) або  $j$  (для потоків притягнення) за КВЕД А, В, F;

$w_2$  – сумарна кількість робочих місць у транспортному районі  $i$  (для утворення потоку) або  $j$  (для потоків притягнення) за КВЕД С, D, E, I, G, H;

$w_3$  – сумарна кількість робочих місць у транспортному районі  $i$  (для утворення потоку) або  $j$  (для потоків притягнення) за КВЕД J, K, L, M, N, O, P, Q.

Значення коефіцієнтів визначалось на основі балансування попиту за формулою (4).

Утворення добової кількості поїздок транспортних районів для систем вантажного транспорту  $FT1$ ,  $FT2$  та  $FT3$  для міста Кривий Ріг показано на Рисунку 1, а притягнення поїздок – на Рисунку 2. Кількість поїздок, які утворюються та притягуються в транспортних районах Інгульця за добу, для зручності показані на окремих діаграмах (Рисунок 3, Рисунок 4), оскільки даний мікрорайон географічно віддалений від інших частин міста.

Отримані результати показують, що у транспортній моделі дотримується баланс утворення та притягнення кількості поїздок вантажним автомобільним транспортом для всіх прийнятих транспортних систем. Центрами генерації поїздок по всім системам є гірничопромислові райони міста (Таблиця 1) [15], які розташовані або примикають до підприємств гірничо-металургійного комплексу: ПрАТ Інгулецький гірничозбагачувальний комбінат (ГЗК), ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг, ПрАТ Центральний ГЗК, ПрАТ Північний ГЗК. Дані райони із показниками генерації поїздок представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Центри генерації (утворення/притягнення) поїздок вантажного автотранспорту

№ з/п	Адміністративний район міста	Підприємство гірничопромислового району	Система вантажного транспорту та кількість поїздок за добу, одиниць		
			$FT1$	$FT2$	$FT3$
1	Інгулецький	ПрАТ Інгулецький ГЗК	768	116	250
2	Інгулецький	ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг	286	41	102
3	Інгулецький	ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг	564	76	194
4	Металургійний	ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг	637	91	228
5	Покровський	ПрАТ Центральний ГЗК	603	81	209
6	Тернівський	ПрАТ Північний ГЗК	875	115	305

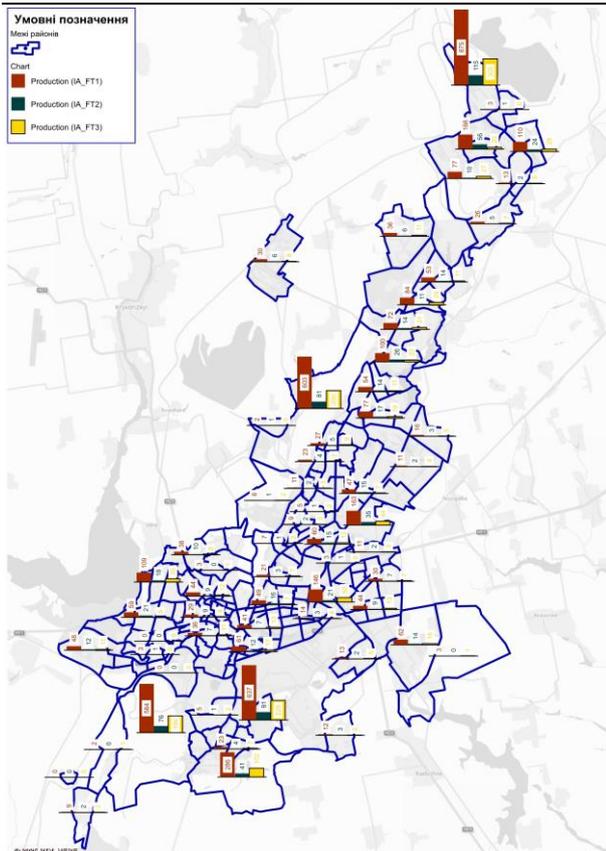


Рисунок 1 – Утворення поїздок транспортними районами міста Кривий Ріг

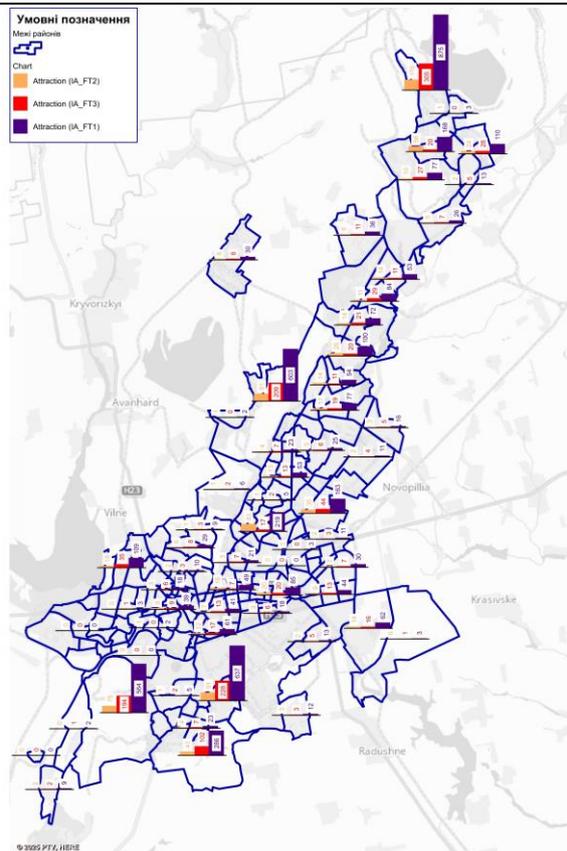


Рисунок 2 – Притягнення поїздок транспортними районами міста Кривий Ріг

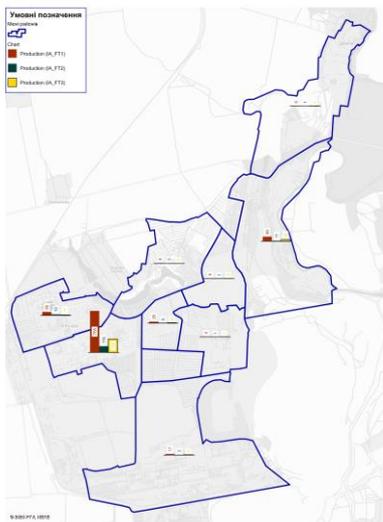


Рисунок 3 – Утворення поїздок транспортними районами Інгульця

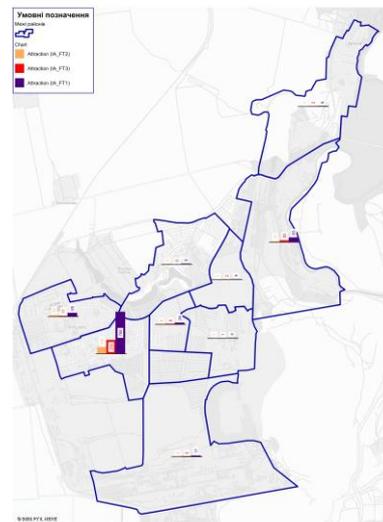


Рисунок 4 – Притягнення поїздок транспортними районами Інгульця

Найбільша кількість поїздок вантажним автотранспортом генерується у гірничопромисловому районі ПАТ Арселор Міттал Кривий Ріг – по трьом транспортним районам вона становить 1487 поїздок за добу для легких автомобілів вантажопідйомністю до 2 т, 208 поїздок за добу – для середніх трьохосних автомобілів вантажопідйомністю від 2 до 8 т, 558 поїздок за добу – для трьохосних самоскидів вантажопідйомністю більше 8 т.

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати проведеного моделювання генерації попиту на вантажному автомобільному транспорті для міста Кривий Ріг показали, що по кожному транспортному району моделі та системі вантажного транспорту виконується рівність поїздок за добу, які даний район генерує та одночасно

притягує. Останнє дозволяє стверджувати, що:

- прийнятий розподіл КВЕДів за системами вантажного транспорту  $FT1$ ,  $FT2$  та  $FT3$  для визначення кількості робочих місць у транспортному районі у якості структурних показників є обґрунтованим;

- ітераційний підхід до балансування утворення та притягнення кількості поїздок через систему рівнянь 3 є обґрунтованим;

- підібрані числові значення коефіцієнтів утворення  $a_{pi}$ ,  $b_{pi}$ ,  $c_{pi}$  та притягнення  $d_{sj}$ ,  $e_{sj}$ ,  $f_{sj}$  (система рівнянь 4) дозволяють моделювати генерацію потоків вантажного транспорту із дотриманням балансу між утворенням та притягненням.

Найбільша кількість поїздок за добу легкими, середніми трьохосними вантажними автомобілями та самоскидами утворюється та притягуються транспортними районами, які відносяться до гірничопромислових [15] із концентрацією гірничозбагачувальних комбінатів з видобутку залізної руди відкритим способом та металургійного заводу із сировинною базою, яка знаходиться в адміністративних межах Кривого Рогу. Дану закономірність можна пояснити тим, що основними видами економічної активності у місті є добувна промисловість, розроблення кар'єрів (КВЕД В) та переробна промисловість (КВЕД С). Саме дані КВЕД використовувались на попередніх етапах дослідження транспортних систем міста Кривий Ріг [15] у ролі класифікаційної ознаки стосовно віднесення конкретного транспортного району до групи гірничопромислових, у тому числі, у моделі пасажирського транспорту.

### ВИСНОВКИ

У роботі розв'язані актуальні задачі, які представляють науковий та практичний інтерес – розроблення та апробація підходу до процедури розрахунку генерації поїздок автомобільним вантажним транспортом у міській транспортній моделі для систем легких, середніх автомобілів та самоскидів.

Кількість робочих місць у транспортних районах моделі розподілена за відповідними групами КВЕД, кожна з яких відповідає окремій системі вантажного транспорту, прийнята в якості структурного показника для визначення утворення та притягнення поїздок. Балансування генерації транспортного попиту виконується за допомогою ітераційного алгоритму.

Для перевірки представленого підходу виконано моделювання генерації транспортного попиту на вантажні автомобільні перевезення у місті Кривий Ріг за допомогою транспортної моделі.

Результати моделювання показали, що кількість поїздок, які генеруються та притягуються різними транспортними районами міста, збігається, що підтверджує правильність обраного підходу до розрахунку генерації транспортного попиту для прийнятих систем вантажного транспорту. Також встановлено, що центрами формування та поглинання поїздок на міському вантажному транспорті у Кривому Розі є шість транспортних районів, в яких розташовані підприємства гірничодобувної та металургійної галузей. Для даних районів характерно, що кількість поїздок, які здійснюється трьохосними самоскидами вантажопідйомністю більше 8 т перевищує кількість поїздок середніми трьохосними вантажними автомобілями вантажопідйомністю від 2 до 8 т.

Проведене дослідження обмежується тільки першою процедурою розрахунку попиту у 4-етапній транспортній моделі для вантажного автомобільного транспорту міста Кривий Ріг. Наступні дослідження будуть зосереджені на інших процедурах розрахунку транспортного попиту в рамках даної моделі.

### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Rodrigue, J.-P. (2024). *The Geography of Transport Systems* (6th ed.). Milton Park: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003343196-2>
2. Ghaemi, S. A., & Hosseinlou, H.M. (2023). Modeling the urban freight-transportation system using the system dynamics approach. *Systems*, 11(8), 409. <https://doi.org/10.3390/systems11080409>
3. Schnieder, M., Hinde, C., & West, A. (2022). Emission estimation of on-demand meal delivery services using a macroscopic simulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11667. <https://doi:10.3390/ijerph191811667>
4. Holguín-Veras, J., Jaller, M., Sánchez-Díaz, I., Campbell, S., & Lawson, C.T. (2014). Freight generation and freight trip generation models. In L. Tavasszy, G. de Jong (Ed.), *Modelling freight transport* (pp. 43-63). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
5. Kotenko, V. (2022). Application of algorithmic models of machine learning to the freight transportation process. *Transport Technologies*, 2022(2), 10–21. <https://doi:10.23939/tt2022.02.010>

6. Oliveira, L. K. d., Araújo, G. G. F. d., Bertoncini, B. V., Pedrosa, C. D., & Silva, F. G. F. d. (2022). Modelling freight trip generation based on deliveries for Brazilian municipalities. *Sustainability*, 14(16), 10300. <https://doi.org/10.3390/su141610300>
7. Novak, D. C., Hodgdon, C., Guo, F., & Aultman-Hall, L. (2011). Nationwide freight generation models: A spatial regression approach. *Networks and Spatial Economics*, 11(1), 23–41. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9079-2>
8. Mommens, K.; Lebeau, P.; Verlinde, S.; van Lier, T.; & Macharis, C. (2018). Evaluating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BASed model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.003>
9. Zamani, E. D., Smyth, C., Gupta, S., & Dennehy, D. (2022). Artificial Intelligence and big data analytics for supply chain resilience: A systematic literature review. *Annals of Operations Research*, 327(2), 605–632. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04983-y>
10. De Jong, G., Gunn, H., & Walker, W. (2004). National and international freight transport models: An overview and ideas for future development. *Transport Reviews*, 24(1), 103–124. <https://doi.org/10.1080/0144164032000080494>
11. Friedrich, M., Haupt, T., & Nökel, K. (2003) Freight modelling: data issues, survey methods, demand and network models. 10th International Conference on Travel Behaviour Research (pp. 1-35). Lucerne, Switzerland.
12. Betanzo-Quezada, E., & Romero, J. A. (2010). An urban freight transport index. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6312–6322. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.040>.
13. Venkadavarahan, M., & Marisamynathan, S. (2023). Development of freight trip generation model using observed and unobserved information of supply chain characteristics for a sustainable urban transformation. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138500>.
14. *PTV VISUM user manual*. (2024). Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
15. Сістук В. (2024). Дослідження транспортної доступності гірничопромислових районів міста з лінійно-розосередженою планувальною структурою. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2(23), 218-228. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.154>
16. Класифікація видів економічної діяльності (КВЕД-2010) складається з таких секцій. URL: [https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10\\_i.html](https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html) (дата звернення 19.03.2025)

## REFERENCES

1. Rodrigue, J.-P. (2024). *The Geography of Transport Systems* (6th ed.). Milton Park: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003343196-2>
2. Ghaemi, S. A., & Hosseinlou, H.M. (2023). Modeling the urban freight-transportation system using the system dynamics approach. *Systems*, 11(8), 409. <https://doi.org/10.3390/systems11080409>
3. Schnieder, M., Hinde, C., & West, A. (2022). Emission estimation of on-demand meal delivery services using a macroscopic simulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11667. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811667>
4. Holguín-Veras, J., Jaller, M., Sánchez-Díaz, I., Campbell, S., & Lawson, C.T. (2014). Freight generation and freight trip generation models. In L. Tavasszy, G. de Jong (Ed.), *Modelling freight transport* (pp. 43-63). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
5. Kotenko, V. (2022). Application of algorithmic models of machine learning to the freight transportation process. *Transport Technologies*, 2022(2), 10 – 21. <https://doi.org/10.23939/tt2022.02.010>
6. Oliveira, L. K. d., Araújo, G. G. F. d., Bertoncini, B. V., Pedrosa, C. D., & Silva, F. G. F. d. (2022). Modelling freight trip generation based on deliveries for Brazilian municipalities. *Sustainability*, 14(16), 10300. <https://doi.org/10.3390/su141610300>
7. Novak, D. C., Hodgdon, C., Guo, F., & Aultman-Hall, L. (2011). Nationwide freight generation models: A spatial regression approach. *Networks and Spatial Economics*, 11(1), 23-41. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9079-2>
8. Mommens, K.; Lebeau, P.; Verlinde, S.; van Lier, T.; & Macharis, C. (2018). Evaluating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BASed model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 102 -111. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.003>
9. Zamani, E. D., Smyth, C., Gupta, S., & Dennehy, D. (2022). Artificial Intelligence and big data analytics for supply chain resilience: A systematic literature review. *Annals of Operations Research*, 327(2), 605-632. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04983-y>

10. De Jong, G., Gunn, H., & Walker, W. (2004). National and international freight transport models: An overview and ideas for future development. *Transport Reviews*, 24(1), 103-124. <https://doi:10.1080/0144164032000080494>
11. Friedrich, M., Haupt, T., & Nökel, K. (2003) Freight modelling: data issues, survey methods, demand and network models. 10th International Conference on Travel Behaviour Research (pp.1-35). Lucerne, Switzerland.
12. Betanzo-Quezada, E., & Romero, J. A. (2010). An urban freight transport index. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6312-6322. <https://doi:10.1016/j.sbspro.2010.04.040>.
13. Venkadavarahan, M., & Marisamynathan, S. (2023). Development of freight trip generation model using observed and unobserved information of supply chain characteristics for a sustainable urban transformation. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138500. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2023.138500>.
14. *PTV VISUM user manual*. (2024). Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
15. Sistuk V. (2024). Studying the transport accessibility of mining areas in a city with a linear dispersed urban planning structure. *Advances in Mechanical Engineering and Transport* 2(23), 218-228. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.154>
16. *Klasyfikatsiia vydiv ekonomichnoi diialnosti (KVED-2010) skladaietsia z takykh sektsii*. Retrieved March 19, 2025 from [https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10\\_i.html](https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html)

#### **V.Sistuk. Modelling trip generation for road freight transportation in Kryvyi Rih.**

The paper proposes a method for modelling demand generation (number of trips) in road freight transport within a four-stage demand model. This methodology is structured as follows: 1) urban freight transport is categorized into three distinct systems: light trucks (2.0 to 2.6 m in length, with two or more axles and a maximum carrying capacity of 2 t), medium three-axle trucks (over 2.6 m in length, with a carrying capacity ranging from 2 to 8 t), and three-axle dump trucks (with a carrying capacity exceeding 8 t). 2) In the procedures for trip generation and attraction, the number of jobs within transport districts is employed as a key structural indicator, which is then distributed according to the specific set of economic activities relevant to each freight transport system. To validate the proposed approach, a modelling of demand generation for freight transport in the transport model of Kryvyi Rih was conducted using the PTV Visum software. The results of the modeling demonstrated that the number of trips generated and attracted by different zones of the city matched, confirming the accuracy of the chosen method for calculating the trip generation for specific freight transport systems. It has been established that the production and attraction of trips by urban freight transport in Kryvyi Rih in the six zones where enterprises of the mining and metallurgical complex are situated is notably higher than in other zones within the model. These zones, referred to as mining areas in previous studies on urban mobility in Kryvyi Rih (specifically concerning passenger transport), exhibit distinct patterns in freight transport demand. Future research will focus on further procedures for calculating transport demand within the four-stage transport model.

**Keywords:** transport demand, road freight transport, transport system, transport modelling, PTV Visum, demand generation, trip production, trip attraction, zone, mining area.

*СІСТУК Володимир Олександрович*, кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, -mail: [sistuk@knu.edu.ua](mailto:sistuk@knu.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-4907-4265>

*Volodymyr SISTUK*, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Kryvyi Rih National University, e-mail: [sistuk@knu.edu.ua](mailto:sistuk@knu.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-4907-4265>

Дата надходження статті до видання: 14.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1938