

УДК 656.1

<https://doi.org/10.31713/vt1202628>**Дорощук В.О.** [1; ORCID ID: 0000-0001-8491-0252],

старший викладач,

¹Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне

ОПТИМІЗАЦІЯ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В МІСЬКИХ УМОВАХ

У сучасних умовах якісні вантажні перевезення мають вирішальне значення для забезпечення безперебійного постачання та розвитку бізнесу. Їх оптимізація не лише підвищує ефективність діяльності, а й сприяє зменшенню витрат і впливу на довкілля. У статті розглядаються ключові стратегії та підходи до вдосконалення вантажних перевезень, зокрема значення планування, застосування сучасних технологій і впровадження сталих практик. Використання цих підходів дозволяє компаніям підвищити ефективність логістичних процесів і зміцнити свої позиції на конкурентному ринку. Вантажні автомобілі виконують тривалі перевезення, що складаються з кількох рейсів, які часто не пов'язані між собою з логістичної точки зору. Для ефективного прогнозування попиту на міські вантажні перевезення необхідно розробляти та тестувати альтернативні моделі, оскільки традиційні підходи базуються на класичній чотириетапній схемі планування. У роботі розглянуто два основні підходи до використання ентропії в транспортному моделюванні, а також визначено ключові аспекти й обмеження, які слід враховувати під час створення відповідних алгоритмів. Серед можливих варіантів розподілу транспортних потоків найбільш імовірними вважаються ті, що забезпечують максимальну кількість допустимих рішень з урахуванням заданих обмежень, зокрема загальної кількості поїздок у кожному вузлі транспортної мережі. Запропонована модель максимізації ентропії, орієнтована на їздки, призначена для прогнозування вантажопотоків з урахуванням сукупного попиту, тобто кількості поїздок, пов'язаних із кожним вузлом. Її ефективність підтверджено шляхом апробації на реальних даних. Застосування ентропійної моделі для прогнозування попиту на вантажні перевезення в міських умовах дозволяє визначати транспортні

потоки, що найбільш точно відображають реальні схеми переміщення вантажів.

Ключові слова: вантажні перевезення, вантажопотоки, оптимізація, модель максимізації ентропії, транспортні потоки, зниження витрат, транспорт.

Вступ. Розвиток технологій зумовлює потребу адаптації всіх сфер господарської діяльності до нових умов. Ефективна робота міських транспортних систем неможлива без впровадження сучасних інтелектуальних технологій.

Вантажні перевезення є одним із ключових елементів сучасної економічної системи, від якості яких безпосередньо залежить стабільність постачання та конкурентоспроможність бізнесу. Водночас вантажний транспорт залишається одним із провідних чинників виникнення дорожніх заторів, погіршення якості атмосферного повітря та підвищення рівня шумового забруднення. Згідно з даними Європейської комісії, вантажні автомобілі є джерелом близько чверті викидів CO₂ у транспортному секторі міст, хоча їхня частка в загальному транспортному потоці не перевищує 10–15%.

Тому раціональна організація вантажних автомобільних перевезень забезпечує підвищення загальної ефективності логістичних процесів і водночас сприяє скороченню витрат, пов'язаних із дотриманням екологічних стандартів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здійснення вантажних перевезень у міському середовищі зумовлює виникнення специфічного комплексу обмежень та викликів, що принципово відрізняють міську логістику від міжміських перевезень.

З метою впорядкування та систематизації досліджуваної проблематики доцільно класифікувати чинники, що негативно позначаються на ефективності міської вантажної логістики, за трьома основними групами: обмеження інфраструктурного характеру, нормативно-регуляторні бар'єри та проблема організації доставки на завершальному етапі логістичного ланцюга — «останній милі».

У працях Zhang R.M. та Huang L. здійснено комплексне дослідження закономірностей розвитку міських вантажних перевезень та сформульовано критерій оцінки їх економічної ефективності [4].

У дослідженні Xiaoning Zhang розроблено методологічні підходи до мінімізації витрат у сфері вантажних перевезень. Автор

обґрунтовує доцільність структурування сукупних транспортних витрат за трьома складовими: транспортні тарифи; втрати від заторів та збільшення тривалості рейсу; видатки на будівництво та технічне обслуговування дорожньої інфраструктури. На переконання дослідника, подібна декомпозиція витрат створює підґрунтя для більш точного та всебічного оптимізування транспортних видатків [5].

Вагомим внеском у розвиток теоретико-методологічної бази міської логістики є наукові праці професорів Nuzzolo A. та Comi A. з Римського університету Tor Vergata. У своїх дослідженнях вчені здійснили детальний аналіз логістичних заходів міського рівня на етапі їх планування та проектування [6].

Узагальнення результатів розглянутих досліджень засвідчує першочергове значення розвитку сталого міського вантажного транспорту та необхідність переходу до більш ефективних й екологічно відповідальних транспортних рішень. Окремо наголошується на ролі інноваційних підходів – зокрема створення консолідаційних центрів та впровадження принципів зеленої логістики – як дієвих інструментів мінімізації екологічного навантаження від міських вантажних перевезень.

Ефективне прогнозування попиту на міські перевезення вимагає створення та тестування нових альтернативних моделей. Оскільки доставка товарів від постачальників до споживачів є фінальним етапом ланцюга постачання, вона відіграє центральну роль у системі міських вантажних перевезень. Наявні моделі організації товаророзподілу можна класифікувати залежно від того, чи базуються вони на характеристиках вантажів, рухомого складу або самого процесу перевезення. Підхід, що ґрунтується на аналізі товарних потоків, дозволяє відтворювати обсяги переміщення вантажів між окремими парами точок відправлення та доставки, забезпечуючи при цьому моделювання з орієнтацією на реальний попит.

Постановка мети і задачі дослідження. Наукова актуальність дослідження обумовлена об'єктивною необхідністю формування системних підходів до оптимізації міської вантажної логістики, реалізація яких забезпечила б безперебійне товаропостачання за умови мінімізації негативного впливу транспортних процесів на міське середовище та добробут міських мешканців.

Особливої уваги заслуговує необхідність розробки більш досконалих та верифікованих моделей, здатних адекватно відтворювати складний характер взаємозалежностей між чинниками, що визначають розподіл вантажопотоків у міському середовищі, — зокрема структурою попиту, маршрутизацією транспортних засобів та екологічними наслідками перевезень. Такі моделі покликані забезпечити науково обґрунтовану підтримку прийняття управлінських рішень у сфері планування та регулювання міських вантажних перевезень.

Метою проведеного дослідження є оцінювання інтенсивності вантажного руху в міських районах. Оскільки маршрут являє собою впорядковану послідовність фізичних вузлів, у яких формуються транспортні потоки, їх ідентифікація є обов'язковою передумовою для подальшого аналізу альтернативних об'їзних шляхів. Для розв'язання поставленого завдання запропоновано метод послідовного моделювання, що охоплює два взаємопов'язані етапи: вибір оптимального маршруту та оцінювання відповідного маршрутного потоку.

Виклад основного матеріалу. Модель вибору маршруту формує ефективну множину варіантів, що відтворює послідовність поїздок транспортних засобів у межах логістичного ланцюга. У процесі її реалізації постають два взаємопов'язані завдання: формування індивідуальних маршрутних траєкторій для кожного транспортного засобу та забезпечення такого механізму вибору, за якого результируючий розподіл унеможливорює включення альтернативних конкуруючих маршрутів.

У межах дослідження розглядається модель максимізації ентропії, застосування якої спрямоване на вирішення задачі оптимального розподілу турових потоків у межах міських територій. З метою коректного відтворення функціонування міської системи вантажних перевезень у рамках моделювання визначено три характерні стани досліджуваної системи. (рис. 1).

Задача максимізації ентропії допускає еквівалентне переформулювання у вигляді задачі мінімізації. Цільова функція, виражена рівнянням (1), орієнтована на знаходження найбільш імовірного розподілу транспортних потоків:

$$\min z = \sum_{m=1}^M (t_m \cdot \ln t_m - t_m) \quad (1)$$

де Z – цільова функція, яку потрібно мінімізувати;

t_m – змінні, що відносяться до i -го елемента:

$\ln t_m$ – натуральний логарифм змінної t_m .



При обмеженнях: $M = \{1, 2, \dots, M\}$, де M – загальна кількість маршрутів
Рис. 1. Стан міської вантажної транспортної системи.

Обов'язковою умовою даної функції є обмеження:

1. Обмеження балансу між постачальниками та споживачами, тобто сума потоків у кожному вузлі мережі має відповідати кількості поїздок, що відправляються з нього або прибувають до нього:

$$\sum_{m=1}^M \alpha_{im} t_m = Q_i(\lambda_i), \quad \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (2)$$

де λ_i – множник Лагранжа, пов'язаний з і обмеженням поїздки.

2. Обмеження на сукупний опір, відповідно до якого загальна сума опорів потоків у мережі має збігатися з її інтегральним опором:

$$\sum_{m=1}^M C_m t_m = C(\beta), \quad (3)$$

де β – множник Лагранжа, пов'язаний з обмеженням опору між двома вузлами.

3. Завершальну групу обмежень утворює умова невід'ємності, яка забезпечує, що всі результуючі потоки набувають значень, не менших за нуль:

$$t_m \geq 0, \quad \forall m \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (4)$$

де λ_i – множник Лагранжа, пов'язаний з і обмеженням поїздки.

З метою дослідження аналітичних властивостей моделі максимізації ентропії отримано умови оптимальності першого порядку, а саме Каруша-Куна-Такера, та умови другого порядку на основі матриці Гессе.

Встановлено, що кількість об'їзних потоків, що вводяться у послідовність вузлів t_m , є експоненційною функцією множників Лагранжа, пов'язаних із об'їзним маршрутом та відповідним опором (Cm). На формування потоків одночасно впливають інтенсивність генерації поїздок та вартість туру, а кількісна міра цього впливу відображається через множники Лагранжа λ_i та θ .

Опуклість цільової функції при лінійних обмеженнях, підтверджена аналізом матриці Гессе, забезпечує єдиність оптимального рішення для розподілу турових потоків.

Задача максимізації ентропії є математичним інструментом для визначення найімовірнішого розподілу транспортних потоків за умов часткової інформації про систему. Принцип максимальної ентропії стверджує: з усіх можливих розподілів, що задовольняють наявні обмеження, найбільш обґрунтованим є той, що максимізує ентропію – тобто є найменш упередженим щодо невідомої інформації.

Розрахункові потоки

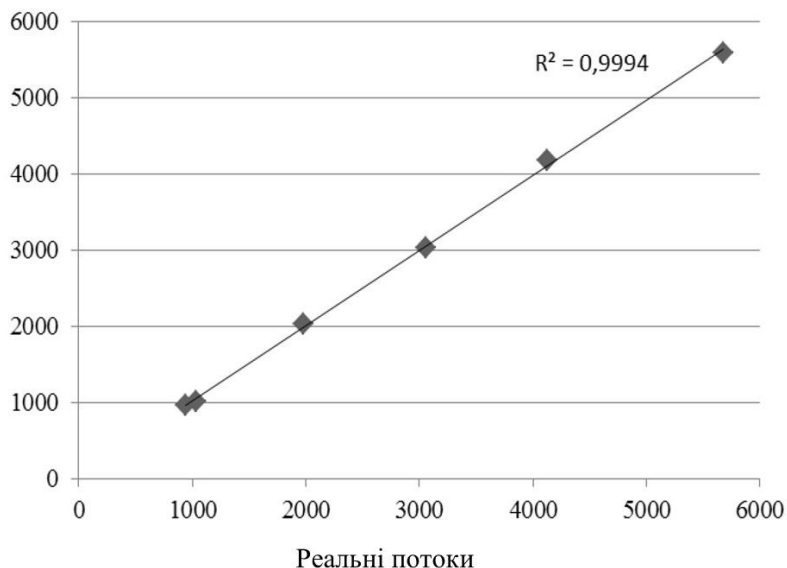


Рис. 2. Розрахункові і реальні транспортні потоки.

Верифікацію моделі здійснено на масиві даних, що охоплює повні маршрути та відповідні часові витрати на переміщення. З огляду на обчислювальну складність ентропійної моделі для її розв'язання було застосовано спеціалізований алгоритм оптимізації великомасштабних задач максимізації ентропії. Час досягнення

оптимального рішення не перевищує однієї хвилини, що підтверджує високу обчислювальну ефективність підходу.

Отримані розрахункові результати засвідчують задовільну точність моделі: прогнозовані потоки демонструють високу відповідність спостережуваним значенням (рис. 2). Принципово важливим є також концептуальна обґрунтованість параметрів моделі та результуючих розподілів довжини поїздок: зі збільшенням тривалості туру імовірність розподілу турових потоків на відповідний тур знижується, що узгоджується з економічною логікою мінімізації транспортних витрат за рахунок скорочення довжини маршруту.

Сукупність отриманих результатів формують надійне підґрунтя для прогнозування попиту на вантажні перевезення в міських районах.

Висновки. Тематика вантажних перевезень у контексті сталого розвитку міст дедалі активніше привертає увагу дослідників. Поглиблення урбанізації та збільшення потреб населення у товарах і послугах перетворили організацію вантажного транспорту на невід'ємну складову міської транспортної системи.

У представленому дослідженні запропоновано модель максимізації ентропії, побудовану на основі концепції маршруту та спрямовану на прогнозування вантажних потоків із використанням узагальненої інформації про попит: даних про кількість поїздок по кожному вузлу та рівень транспортного опору в міських зонах. Для задачі максимізації ентропії отримано умови оптимальності першого та другого порядків. Умови першого порядку дають оптимальну модель розподілу потоків, структурно схожу з гравітаційною моделлю, але зосереджену на маршрутах замість окремих поїздок. Встановлено, що інтенсивність руху транспортних засобів на маршруті є функцією множника Лагранжа, пов'язаного з активністю відповідного вузла туру.

Умови другого порядку гарантують єдиність знайденого рішення. Апробація підходу підтвердила його ефективність: середня абсолютна похибка між розрахунковими та фактичними потоками становить близько 7%.

Пріоритетним вектором подальших досліджень вбачається формування методологічного інструментарію для порівняльної оцінки ефективності різних моделей організації міської вантажної логістики з урахуванням регіональної специфіки українських міст, а

також дослідження можливостей імплементації передового світового досвіду в національний контекст транспортного планування.

1. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. United States Department of Transportation. 2021. URL: <https://www.pcb.its.dot.gov/eprimer/module8.aspx#intro>. 2. Hughes, S., Moreno, S., Yushimito, W., & Huerta-Cánepa, G. Evaluation of machine learning methodologies to predict stop delivery times from GPS data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Vol.109. P. 289-304. doi: 10.1016/j.trc.2019.10.018. 3. Optimization of Processes and Technologies in Cargo Transportation [Електронний ресурс]. URL: <https://geniusjournals.org/index.php/esh/article/view/3218>. 4. R.M. Zhang, L. Huang. Application of the freight rate on freight flow forecast, *Advances in Transportation Studies. Special Issue, Vol.3, 2017*. P.61-68. 5. Xiaoning Zhang. Editorial: Optimisation methods of road pricing / *European Journal of Transport and Infrastructure Research / Issue 14(1)*. 2014 pp. 1-6 ISSN: 1567-7141. 6. Nuzzolo, A., & Comi, A. City Logistics Planning: Demand Modelling Requirements for Direct Effect Forecasting. *Procedia – Social And Behavioral Sciences*. 2014. Vol.125, P.239-250. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1470. 7. Buldeo Rai, H., van Lier, T., Meers, D., & Macharis, C. Improving urban freight transport sustainability: Policy assessment framework and case study. *Research In Transportation Economics*. 2017. Vol.64, 26–35. doi: 10.1016/j.retrec.2017.08.005 8. Aditjandra, P. T., Cao, X., & Zunder, T. H. Automation, electrification, and shared mobility in urban trucking: opportunities and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 137. P.1-11. doi: 10.1016/j.tra.2020.05.008. 9. Попович П., Шевчук О., Мурований І. Підвищення ефективності технологій перевезень організаційними шляхами надання транспортних послуг. *Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2017. Вип. № 184. С. 124-130. 10. Дорошук В.О., Сорока В.С., Сліпенький Є.Б., Бережняк І.А. Організація вантажоперевезень в умовах військового стану та надзвичайних ситуацій. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. *Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченій 155 річчю з дня створення ЦНТУ, 16-18 квітня 2025 року*. Кропивницький : ЦНТУ. С. 55-56.

REFERENCES

1. Spil'ne upravlinnya prohramy intelektual'nykh transportnykh system. Ministerstvo transportu SSHA. 2021. URL: <https://www.pcb.its.dot.gov/eprimer/module8.aspx#intro>. 2. Hughes, S., Moreno, S., Yushimito, W., & Huerta-Cánepa, G. Otsinka metodolohiy mashynnoho navchannya dlya prohnouzuvannya chasu dostavky zupynok na osnovi danykh GPS. *Transportni doslidzhennya, chastyna C: Novitni*

tekhnohohiyi. 2019. Tom 109. S. 289-304. doi: 10.1016/j.trc.2019.10.018. 3. Optymizatsiya protsesiv i tekhnolohiy u vantazhnykh perevezennyakh [Elektronnyy resurs]. URL: <https://geniusjournals.org/index.php/esh/article/view/3218>. 4. R.M. Zhang, L. Huang. Zastosuvannya frakhtovoyi stavky do prohnozu vantazhopotoku, *Advances in Transportation Studies*. Spetsial'nyy vypusk, tom 3, 2017. S. 61-68. 5. Syaonin Chzhan. Redaktsiyna statiya: Metody optymizatsiyi tsinoutvorenniya na dorozhni posluhy / Yevropeys'ky zhurnal doslidzhen' transportu ta infrastruktury / Vypusk 14(1). 2014, s. 1-6, ISSN: 1567-7141. 6. Nuttsolo, A. ta Komi, A. Planuvannya mis'koyi lohistyky: Vymohy do modelyuvannya popytu dlya prohnozuvannya pryamoho efektu. *Procedia – Sotsial'ni ta povedinkovi nauky*. 2014. Tom 125, s. 239-250. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1470. 7. Bul'deo Ray, KH., van Lir, T., Mirs, D. ta Macharis, K. Pokrashchennya stalosti mis'kykh vantazhnykh perevezen': ramky otsinky polityky ta tematychno doslidzhennya. *Doslidzhennya v haluzi ekonomiky transportu*. 2017. Tom 64, 26–35. doi: 10.1016/j.retrec.2017.08.005. 8. Aditjandra, P. T., Cao, X., & Zunder, T. H. Avtomatyzatsiya, elektryfikatsiya ta spil'na mobil'nist' u mis'kykh vantazhnykh perevezennyakh: mozhlyvosti ta problemy. *Doslidzhennya transportu Chastyna A: Polityka ta praktyka*. 2020. Vyp. 137. S.1-11. doi: 10.1016/j.tra.2020.05.008. 9. Popovych P., Shevchuk O., Murovanyy I. Pidvyshchennya efektyvnosti tekhnolohiy perevezen' orhanizatsiynomy shlyakhamy nadannya transportnykh posluh. *Visnyk KHNTUS-H. Kharkiv*, 2017. Vyp. № 184. S. 124-130. 10. Doroshchuk V.O., Soroka V.S., Slipen'ky YE.B., Berezhnyak I.A. Orhanizatsiya vantazhoperevezen' v umovakh viys'kovoho stanu ta nadzvychaynykh sytuatsiy. *Pidvyshchennya nadiynosti ta efektyvnosti mashyn, protsesiv i system*. *Pidvyshchennya nadiynosti ta efektyvnosti mashyn, protsesiv i system : materialy VI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi, prysvyacheniy 155 richchyu z dnya stvorenniya TSNTU*, 16-18 kvitnya 2025 roku. *Kropyvnyts'ky : TSNTU*. S. 55-56.

Doroshchuk V. ^[1; ORCID ID: 0000-0001-8491-0252],

Senior Lecturer,

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

OPTIMIZATION OF FREIGHT TRANSPORTATION IN URBAN ENVIRONMENTS

In today's environment, high-quality freight transportation is crucial for ensuring uninterrupted supply chains and business growth. Optimizing these

operations not only improves operational efficiency but also helps reduce costs and minimize environmental impact. This article examines key strategies and approaches to improving freight transportation, including the importance of planning, the use of modern technologies, and the implementation of sustainable practices. Applying these approaches enables companies to enhance the efficiency of their logistics processes and strengthen their position in a competitive market. Trucks perform long-haul transport operations consisting of several trips that are often not logistically interconnected. To effectively forecast demand for urban freight transport, it is necessary to develop and test alternative models, as traditional approaches are based on the classic four-stage planning scheme. This paper examines two main approaches to using entropy in transportation modeling and identifies key aspects and constraints that must be considered when developing relevant algorithms. Among the possible options for distributing traffic flows, those that provide the maximum number of feasible solutions while accounting for given constraints—specifically, the total number of trips at each node of the transportation network—are considered the most likely. The proposed trip-oriented entropy maximization model is designed to forecast freight flows while accounting for aggregate demand, i.e., the number of trips associated with each node. Its effectiveness has been confirmed through testing on real-world data. The application of the entropy model for forecasting freight transport demand in urban conditions allows for the determination of transport flows that most accurately reflect actual freight movement patterns.

Keywords: freight transportation, freight flows, optimization, entropy maximization model, transport flows, cost reduction, transport.

Отримано: 22 січня 2026 року

Прорецензовано: 27 лютого 2026 року

Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Doroshchuk V.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).