

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-57>

УДК 004.94:656.13

ЩЕНКО Гліб

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0000-1564-2258>

e-mail: glebishshenko1000@gmail.com

ШЕВЧУК Олександр

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8600-0700>

e-mail: shevchuk@vntu.edu.ua

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ВАРІАТИВНОГО ДОРОЖНЬОГО ТРАФІКУ

У роботі представлено метод імітаційного моделювання для кількісної оцінки економічної ефективності адаптивних систем планування перевезень в умовах стохастичного дорожнього руху. Запропонований підхід інтегрує динамічну модель маршрутизації з детальним розрахунком операційних витрат, враховуючи гетерогенність автопарку та часову залежність вартості ресурсів. Розроблена методика дозволяє здійснювати сценарний аналіз фінансових показників (витрати на оплату праці, амортизацію, паливо) до етапу фізичного впровадження системи. Результати експериментальних досліджень підтвердили, що для внутрішньоміської логістики застосування адаптивного планування забезпечує скорочення витрат на 53–71% у пікові години, тоді як для магістральних перевезень ефект становить 4–7%, що обґрунтовує доцільність диференційованого підходу до управління транспортними потоками.

Ключові слова: імітаційне моделювання, транспортна задача, дискретна оптимізація, теорія графів, адаптивна маршрутизація, нормальний розподіл.

ISHCHENKO Hlib, SHEVCHUK Oleksandr

Vinnitsia National Technical University

SIMULATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF AN ADAPTIVE TRANSPORTATION PLANNING SYSTEM IN CONDITIONS OF VARIABLE ROAD TRAFFIC

The paper presents a simulation modeling method for the quantitative assessment of the economic efficiency of adaptive transportation planning systems under stochastic road traffic conditions. The proposed approach integrates a dynamic routing model with a detailed calculation of operational costs, taking into account vehicle fleet heterogeneity and the time dependence of resource costs. The developed methodology enables scenario analysis of financial indicators (labor costs, depreciation, fuel) prior to the physical implementation of the system. Experimental results confirmed that for intra-city logistics, the application of adaptive planning reduces costs by 53–71% during peak hours, whereas for long-haul transportation, the effect is 4–7%, justifying the feasibility of a differentiated approach to traffic flow management.

Keywords: simulation modeling, transportation problem, discrete optimization, graph theory, adaptive routing, normal distribution.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 16.04.2026

Опубліковано / Published 31.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ЩЕНКО Гліб, ШЕВЧУК Олександр

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Фундаментальною проблемою управління транспортною логістикою в урбанізованому середовищі є невідповідність планових економічних показників фактичним витратам, що виникає внаслідок високої стохастичності дорожнього руху. Традиційні методи бюджетування логістичних операцій, як правило, базуються на усереднених значеннях швидкості та часу доставки, що в умовах динамічної зміни трафіку призводить до значних фінансових похибок. Зростання операційних витрат, зумовлене затримками та нерациональним використанням ресурсів, вимагає перегляду підходів до оцінки собівартості перевезень, особливо в сегменті внутрішньоміської доставки [1].

На сучасному етапі розвитку галузі спостерігається тенденція до цифровізації процесів та впровадження адаптивних систем управління, здатних реагувати на зміни дорожньої обстановки в реальному часі. Проте інтеграція таких високотехнологічних рішень у бізнес-процеси логістичних компаній пов'язана з низкою викликів, серед яких ключовими є висока вартість впровадження, технічна складність адаптації та невизначеність щодо термінів окупності інвестицій [2]. У цьому контексті актуалізується потреба в інструментах імітаційного моделювання, які дозволяють з високою точністю прогнозувати витрати ще до моменту фізичного впровадження адаптивних алгоритмів. Саме сценарне моделювання економічних наслідків використання різномірного автопарку в умовах варіативного трафіку дозволяє отримати об'єктивну

оцінку доцільності переходу від статичних до динамічних моделей планування [3, 4].

Таким чином, мета роботи полягає у розробці та апробації методу імітаційного моделювання для кількісної оцінки економічної ефективності адаптивної системи планування перевезень, що враховує часову залежність вартості ресурсів і специфіку експлуатації транспортних засобів різної вантажопідйомності.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасних фахових джерел свідчить, що пріоритетними напрямками досліджень у сфері транспортного планування є алгоритмічна оптимізація маршрутів та мінімізація екологічного впливу.

У дослідженні [5] розроблено модель для напіввідкритого гетерогенного парку електромобілів, яка враховує нелінійне енергоспоживання та стратегії підзарядки. Однак даний підхід сфокусований виключно на специфіці електромобілів та енергетичних витратах, залишаючи поза увагою традиційні операційні витрати (оплата праці, амортизацію двигунів внутрішнього згорання) та варіативність трафіку для звичайних вантажівок.

Робота [6] пропонує метод багаточислової оптимізації для гетерогенного парку, спрямований на одночасну мінімізацію часу та максимізацію завантаження. Проте запропонована модель є статичною і не враховує стохастичну природу дорожнього руху, а поняття вартості у ній зведено до умовних одиниць цільової функції, без деталізації у грошовому вимірі.

Екологічний аспект перевезень в умовах змінного трафіку досліджується у працях [7, 8]. Автори розглядають задачі маршрутизації з мінімізацією викидів CO₂ та споживання палива, використовуючи моделі змінних швидкостей. Головним обмеженням цих робіт у контексті даного дослідження є використання однорідного автопарку (транспортних засобів із холодильним устаткуванням) та фокусування на екологічних метриках, що не дозволяє повноцінно оцінити комерційну ефективність логістики малого бізнесу.

Питання алгоритмічної ефективності для гетерогенного парку підіймається у статті [9], де запропоновано гібридний алгоритм для фіксованого парку авто. Попри високу точність розв'язку, дослідження ігнорує динаміку трафіку, розглядаючи задачу у статичній постановці.

Наближеним до реальних умов є підхід [10], у якому застосовують динамічні евристичні методи для аналізу міської логістики «останньої милі» з урахуванням потоку транспорту. Однак, автори моделюють однорідний парк транспортних засобів, а оцінка ефективності базується на операційних показниках алгоритму, а не на комплексному імітаційному моделюванні фінансових результатів підприємства.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про відсутність комплексного методу, який би поєднував моделювання часозалежного трафіку, використання гетерогенного автопарку та детальний розрахунок економічної складової (у валюті) для попередньої оцінки доцільності впровадження адаптивних систем.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Теоретичним підґрунтям розробленого методу оцінки економічної ефективності є модифікація класичної транспортної задачі лінійного програмування. На відміну від статичних постановок, де вартість перевезення c_{ij} є константою, у даному дослідженні застосовано динамічну модель витрат, що залежить від часу початку руху t_k . Математична формалізація задачі зводиться до мінімізації цільової функції сумарних витрат при дискретизації часового простору на K інтервалів [11]:

$$\min_{\{x_{ij}^{(k)}\}} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^{(k)} \cdot x_{ij}^{(k)} \quad (1)$$

за умов балансу постачання та попиту: $\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)} = a_i$, $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m x_{ij}^{(k)} = b_j$, $x_{ij}^{(k)} \geq 0$, де $c_{ij}^{(k)}$ визначається як сума базової вартості та часозалежної компоненти $f_{ij}(t_k)$, що апроксимується сумою нормальних розподілів. Параметри розподілів (амплітуди A_{ij} , математичні сподівання μ_{ij} та дисперсії σ_{ij}) розраховуються автоматично для кожного ребра графа дорожньої мережі. Алгоритм генерації профілів трафіку [12] враховує набір контекстних множників: клас урбанізації населеного пункту (*cityFactor*), довжину маршруту (*distanceFactor*) та напрямок руху відносно центру міста (*dirFactor*).

Ключовим елементом дослідження є розроблений метод переходу від абстрактних коефіцієнтів транспортної задачі до реальних економічних показників (грошових одиниць). Методика базується на постоптимізаційному аналізі отриманого транспортного плану та включає чотири етапи розрахунку для кожного активного маршруту (i, j): вибір транспортного засобу та розрахунок кількості рейсів, визначення реального часу рейсу, розрахунок операційних витрат, агрегація результатів.

Враховуючи гетерогенність автопарку, система автоматично призначає тип транспортного засобу залежно від дистанції маршруту L_{ij} (Таблиця 1).

Таблиця 1

Параметри гетерогенного автопарку для моделювання

Дистанція маршруту (L_{ij})	Тип ТЗ	Корисне навантаження (W_{load})
≥ 30 км	Вантажівка	26 т
$10 \leq L_{ij} < 30$ км	Середньотонажне авто	10 т
< 10 км	Малотонажне авто	4 т

Кількість необхідних рейсів N_{trips} визначається як ціла частина від ділення планового обсягу перевезення x_{ij} на вантажопідйомність W_{load} :

$$N_{trips} = \lceil x_{ij}/W_{load} \rceil \quad (2)$$

Для врахування затримок, спричинених трафіком, використовується коефіцієнт завантаженості дороги (Congestion Multiplier, C_{mult}), що розраховується як відношення вартості у часовому вікні t_k до базової вартості. Реальний час одного рейсу T_{trip} обчислюється на основі часу проїзду «вільними дорогами» (отриманого з сервісу OSRM, T_{free}) з урахуванням поточного стану трафіку:

$$T_{trip} = T_{free} \cdot C_{mult}(t_k) \quad (3)$$

Вартісна оцінка базується на даних American Transportation Research Institute (ATRI). Використано інтегральний показник вартості однієї години роботи вантажного транспорту $Rate_{hour} = 91,27\$$, що включає витрати на паливо, оплату праці водія, лізингові платежі, страхування, технічне обслуговування та адміністративні витрати [13]. Сумарна вартість обслуговування маршруту $Cost_{ij}$ становить:

$$Cost_{ij} = \frac{T_{trip} \cdot N_{trips}}{60} \cdot Rate_{hour} \quad (4)$$

Фінальна оцінка ефективності здійснюється шляхом сумування витрат по всіх елементах матриці перевезень для всього періоду моделювання (доба, місяць, рік).

Апробація запропонованого методу проводилася з використанням інформаційної системи адаптивного планування перевезень «ChronoLogix» [14]. Інтерфейс системи дозволяє візуалізувати маршрути та порівнювати сценарії планування (рис. 1).

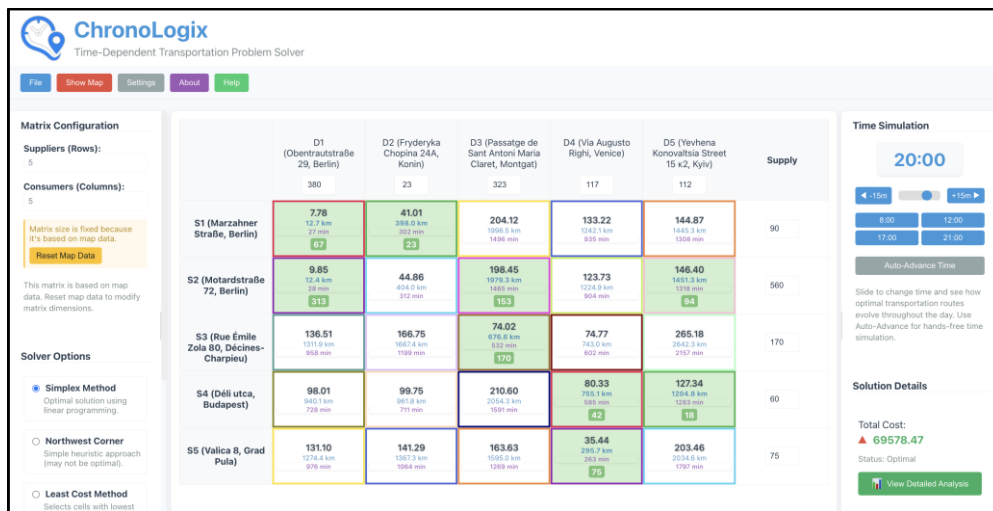


Рис. 1. Інтерфейс інформаційної системи адаптивного планування перевезень «ChronoLogix»

Для підтвердження економічної ефективності було проведено серію експериментів для двох сценаріїв: «міська логістика» (висока щільність трафіку, короткі дистанції) та «міжміські перевезення» (переважно магістральний рух, довгі дистанції). Порівнювалися два підходи: статичне планування (без врахування трафіку) та адаптивне планування (із застосуванням розробленої системи). Результати моделювання наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння операційних витрат для характерних часових інтервалів

Сценарій	Час доби (година)	Статичні витрати (\$)	Адаптивні витрати (\$)	Економія (\$)	Економія (%)
Міський	00:00	11143	4567	6576	59,0
	08:00	32252	13232	19020	58,9

Міжміський	16:00	45187	12843	32344	71,6
	20:00	16542	7774	8768	53,0
	00:00	39720	39720	0	0,0
	08:00	56005	52651	3354	5,9
	16:00	59105	54591	4514	7,6
	20:00	48398	46179	2219	4,6

Як видно з отриманих даних, в умовах щільної міської забудови адаптивне планування дозволяє скоротити витрати на 53–71% у години пікового навантаження. Це досягається завдяки уникненню маршрутів з критичними заторами, що прямо впливає на час роботи водіїв та використання палива. Водночас для міжміських перевезень ефект є менш вираженим (0–7%), що пояснюється меншою амплітудою коливань трафіку на магістральних шляхах та відсутністю альтернативних об'їзних шляхів.

На рисунках 2 та 3 представлено графічну інтерпретацію погодинної економії коштів для відповідно міського та міжміського сценаріїв.

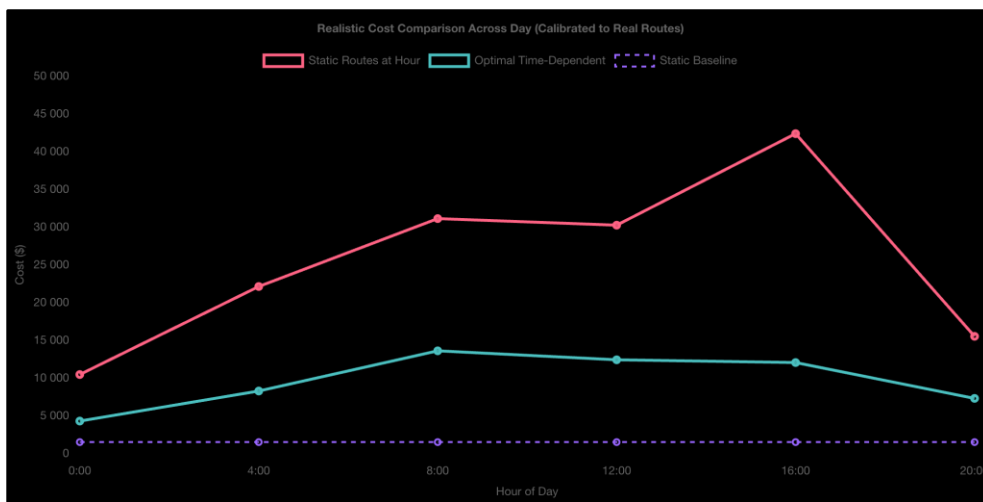


Рис. 2. Динаміка операційних витрат протягом доби для сценарію міської логістики

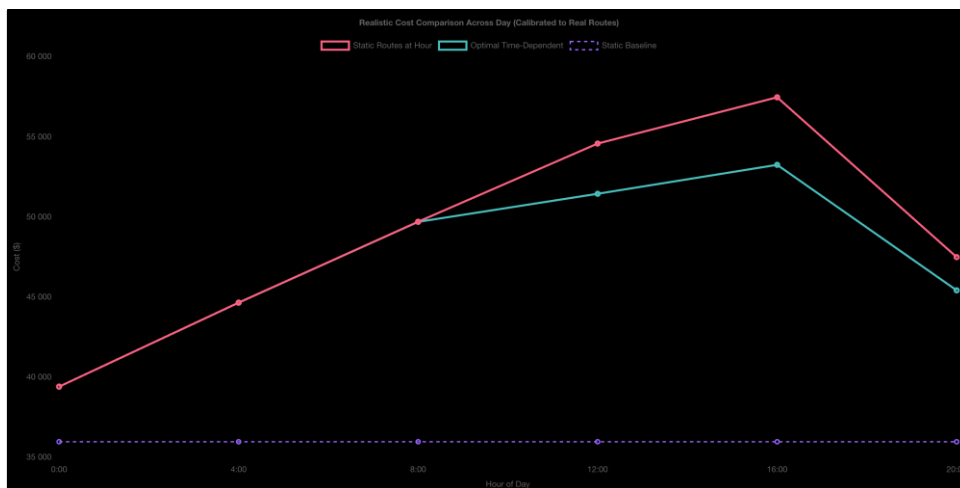


Рис. 3. Динаміка операційних витрат протягом доби для сценарію міжміської логістики

Екстраполяція отриманих результатів на річний горизонт планування (365 днів) для підприємства середнього розміру показує потенційне скорочення операційних витрат. Для міського сценарію, де статична розрахункова вартість сягає значень порядку 3–5 млн \$ на рік, перехід на адаптивну модель дозволяє заощадити суттєву частину бюджету, нівелюючи вплив пікових навантажень.

Таким чином, результати імітаційного моделювання підтверджують гіпотезу про те, що економічний ефект від впровадження адаптивних систем є найбільш значущим саме для внутрішньоміської логістики «останньої милі», де варіативність трафіку є визначальним фактором ціноутворення.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі запропоновано метод імітаційного моделювання для кількісної оцінки економічної

ефективності адаптивного планування вантажних перевезень у стохастичних умовах трафіку, що поєднує динамічну маршрутизацію з фінансовою оцінкою логістичних рішень. Експериментально встановлено, що для внутрішньоміської логістики («останньої милі») перехід від статичних до адаптивних моделей забезпечує скорочення операційних витрат на 53–71% у години пікового навантаження. Отримані результати свідчать, що ігнорування часової варіативності трафіку та гетерогенності автопарку у традиційних підходах планування призводить до суттєвих фінансових втрат, зумовлених непродуктивним використанням ресурсів. Водночас для міжміських магістральних перевезень економічний ефект є помірним (4–7%), що обґрунтовує доцільність диференційованого вибору інструментів управління транспортними процесами.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі пов'язані з деталізацією моделі собівартості. Зокрема, доцільним вбачається інтеграція нелінійних моделей споживання палива, що враховують режим роботи двигуна у заторах («start-stop»), а також розширення набору стохастичних факторів, таких як погодні умови та ймовірність дорожньо-транспортних пригод, для підвищення точності прогнозування ризиків.

References

1. World Economic Forum. (2025). *Lessons from the last mile: Evolving practices for urban logistics*. World Economic Forum. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Urban_Deliveries_Case_Studies_Combined_2025.pdf
2. Pauzoliënė, J., Kavecke, I., & Pyra, M. (2024). Smart technologies integration and challenges in the context of logistics companies. *European Research Studies Journal*, 27(Special Issue A), 999–1018. <https://doi.org/10.35808/ersj/3851>.
3. Nyunt, A. T., Kotak, B., Chauhan, R., Jain, R., & Keshariya, V. (2025). OptiShip: Predictive freight cost modeling incorporating regional fuel variability. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 6(2), 116–123. <https://doi.org/10.38094/jastt62244>.
4. Cherednichenko, K., Shevchuk, D., Levchenko, M., & Bugayko, D. (2025). Simulation modeling for sustainable and resilient supply chain design for a cargo transportation company. In *International Scientific and Practical Conference "Smart Cities and Sustainable Regional Development"*. <https://doi.org/10.63550/ICEIP.2025.62.25.119>.
5. Wen, T., & Meng, H. (2025). Time-dependent multi-center semi-open heterogeneous fleet path optimization and charging strategy. *Mathematics*, 13(7), Article 1110. <https://doi.org/10.3390/math13071110>.
6. He, Z., Zhang, M., Chen, Q., Chen, S., & Pan, N. (2023). Optimization of heterogeneous vehicle logistics scheduling with multi-objectives and multi-centers. *Scientific Reports*, 13, Article 14169. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41450-5>.
7. Wang, Y., Duan, J., Sun, J., Zhang, Q., & Ye, T. (2025). A green vehicle routing problem with time-varying speeds and joint distribution. *Sustainability*, 17(16), Article 7515. <https://doi.org/10.3390/su17167515>.
8. Heni, H., Renaud, J., & Coelho, L. C. (2018). *Time-dependent vehicle routing problem with emission and cost minimization considering dynamic paths* (CIRRELT-2018-14). CIRRELT. <https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2018-14.pdf>.
9. Ahmed, Z. H., & Yousefikhoshbakht, M. (2023). A hybrid algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem with time windows. *Symmetry*, 15(2), Article 486. <https://doi.org/10.3390/sym15020486>.
10. Liu, L., & Wang, T. (2025). Optimizing urban last mile delivery efficiency through dynamic vehicle routing heuristics and traffic flow analysis. *Scientific Reports*, 16, Article 483. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29861-y>.
11. Ishchenko, H., & Shevchuk, O. (2025). Information system for adaptive transportation planning with consideration of road traffic variability. *Computer Systems and Information Technologies*, (3), 47–56. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-3-5>
12. Ishchenko H., & Shevchuk O. (2025). Characteristics of road traffic modeling for adaptive transportation planning. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 84(4), 56–60. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-6>
13. American Transportation Research Institute (ATRI). (2024). *An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2024 Update*. ATRI. <https://truckingresearch.org/2024/06/an-analysis-of-the-operational-costs-of-trucking-2024-update/>
14. Ishchenko, H. A., & Shevchuk, O. F. (2025). *Information system for adaptive transportation planning ("ChronoLogix")* [Computer software; Certificate of copyright registration No. 139281]. Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1883508/>