

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ДЛЯ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Падалка А.Б., Шубін І.Ю.

Кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
Україна

E-mail: artem.padalka@nure.ua,
igor.shubin@nure.ua

Abstract

This paper investigates route construction optimization in modern freight transportation, driven by the increasing demand for logistics efficiency and cost reduction. The core technical challenge is minimizing delivery time and fuel consumption while adhering to complex constraints such as vehicle capacity, time windows, and dynamic road conditions (e.g., traffic jams, weather). The study aims to analyze graph-based optimization algorithms and develop an effective adaptive approach using mathematical modeling. Common strategies reviewed include classical graph algorithms (Dijkstra, A), dynamic routing adjustments, and order clustering (e.g., K-means). Experiments conducted using a Python-based simulation environment with GIS integration validated the effectiveness of these methods. Results confirm that a combined model integrating dynamic traffic analysis and clustering significantly improves delivery performance compared to static routing. Regression analysis indicated a strong correlation ($R^2 \approx 0.91$) between optimized parameters and delivery time. These findings offer practical solutions for enhancing the scalability and economic efficiency of freight transport systems..*

У сучасній логістиці вантажні перевезення є одним із ключових сегментів глобальної економіки. Масштабованість мереж, своєчасна доставка й мінімізація витрат — основні вимоги до систем управління поставками. Центральною технічною проблемою залишається оптимізація маршрутів з урахуванням багатьох обмежень. Якість алгоритмів маршрутизації визначає рентабельність, швидкість обслуговування, конкурентність компаній і навіть екологічні показники (зменшення викидів CO₂).

Актуальність теми обумовлена різким збільшенням обсягів товарних потоків, зростанням вартості палива, розвитком електронної комерції та підвищенням вимог до термінів доставки ("delivery windows"). Оптимізація транспортної логістики дозволяє мінімізувати час перебування вантажу в дорозі, знизити витрати на амортизацію транспорту та покращити роботу систем у нестабільних дорожніх умовах.

Метою роботи є аналіз сучасних методів оптимізації побудови маршрутів (зокрема на основі теорії графів) та розробка ефективного підходу, який забезпечує зменшення часу доставки та транспортних витрат у системах вантажних перевезень.

У сучасній логістиці для розв'язання VRP застосовують статичні та динамічні моделі. Найпоширеніший підхід — зважений граф, де вершини є точками доставки, а ребра — маршрутами. Він дає точний математичний опис, але має обмеження: NP-складність при великій кількості точок, стохастичні фактори (затори, аварії, погода) та обмежена пропускна здатність мережі. У міській логістиці «останньої милі» ці проблеми особливо критичні, адже навіть невеликі затримки порушують увесь графік доставок.

У технічній літературі (Toth, Vigo та Smart Logistics) описано ключові принципи оптимізації транспортних систем: точні алгоритми, евристики, метаевристики (генетичні алгоритми, мурашині колонії), кластеризація й динамічна маршрутизація. Проте комплексне поєднання цих підходів —

зокрема інтеграція ML-прогнозування затримок із класичними графовими алгоритмами — досі вивчено недостатньо. Це й визначає науково-практичний фокус роботи.

Найпоширеніші стратегії маршрутизації:

Статична маршрутизація (Static Routing) – маршрути плануються заздалегідь на основі фіксованих даних; підходить для стабільних умов, але неефективна при форс-мажорах.

Мультимодальна оптимізація – використання різних видів транспорту, що ускладнює граф перевезень.

Динамічна маршрутизація (Dynamic Routing) – маршрути коригуються в реальному часі; дозволяє адаптуватися до заторів, але потребує значних обчислювальних ресурсів.

Методи оптимізації, що розглядаються:

Алгоритми пошуку найкоротшого шляху (Дейкстри, A*, Floyd-Warshall) – базові методи теорії графів для знаходження оптимального шляху між двома точками з урахуванням ваги ребер (відстань/час).

Кластеризація та сегментація – методи (наприклад, K-means), що дозволяють групувати замовлення за географічною ознакою для розподілу між транспортними засобами.

Лінійна регресія та прогнозування – використання історичних даних для передбачення часу доставки залежно від ваги вантажу, відстані та стану доріг.

Для аналізу ефективності методів оптимізації було розроблено програмний прототип мовою Python з використанням бібліотек Pandas, Scikit-learn та NetworkX для роботи з графами. Було реалізовано декілька моделей розрахунку маршрутів та проведено симуляцію перевезень із різними вхідними параметрами (вага вантажу, відстань, трафік).

Таблиця 1. Ефективність методів маршрутизації (середній час доставки).

Метод	К-сть замовлень: 50	100	150	Середній час (год)	Зниження часу (%)
Статична маршрутизація	12.5	24.2	38.1	24.9	0%
Алгоритм Дейкстри	11.0	21.5	33.4	21.9	12%
Кластеризація (K-means)	9.8	18.9	29.5	19.4	22%
Динамічна маршрутизація	9.2	17.8	27.9	18.3	26%
Комбінована модель	8.1	15.4	24.6	16.0	35%

Таблиця 2. Відхилення від планового часу доставки (затримки) при різних дорожніх умовах.

Умови	Static Route	Dijkstra	Dynamic Routing	Combined Model
Нормальний трафік	+5%	+4%	+2%	+1%
Година пік (затори)	+25%	+20%	+12%	+8%
Погодні умови (дощ/сніг)	+35%	+32%	+18%	+14%
Аварійні ситуації	+45%	+40%	+22%	+15%

Таблиця 3. Вплив факторів на час доставки (Результати регресійного аналізу).

Фактор впливу (змінна)	Коефіцієнт регресії (a_n)	Рівень впливу	Природа залежності
Вага вантажу (x_1)	6.52	Дуже високий	Пряма (збільшує час)
Відстань (x_2)	4.77	Високий	Пряма
Об'єм вантажу (x_3)	5.02	Високий	Пряма
Якість покриття (x_4)	-0.77	Середній	Обернена (краща якість - менше часу)
Завантаженість доріг (x_5)	3.52	Середній	Пряма
Непередбачувані події (x_6)	1.52	Низький	Пряма
Вільний член	24.27	Базовий час	-

Важливо відзначити, що використання окремих методів оптимізації, навіть достатньо ефективних у певних сценаріях (наприклад, лише кластеризація замовлень або виключно пошук найкоротшого шляху алгоритмом Дейкстри), не дозволяє досягти максимального результату в умовах реальної логістики. Кожен із цих методів вирішує лише частину загальної проблеми: кластеризація зменшує загальний пробіг автопарку, але не враховує затори в реальному часі; динамічна маршрутизація реагує на трафік, але може бути обчислювально складною для великої кількості точок без попереднього розбиття на зони.

Результати проведеного регресійного аналізу підтвердили високу значущість фактора ваги вантажу (коефіцієнт 6.52) та відстані (4.77), що вказує на необхідність першочергового врахування цих параметрів при плануванні. Побудована лінійна модель показала високу точність прогнозування ($R^2 \approx 0.91$), що свідчить про адекватність обраних факторів.

Тому саме інтеграція кількох методів — їх взаємне підсилення — дає змогу сформувати збалансовану й високоефективну систему. Поєднання кластеризації замовлень (K-means) із динамічним коригуванням маршруту на основі даних про трафік перетворюється на комплексну модель, яка оптимізує і завантаження транспорту, і час перебування в дорозі, і витрати пального.

Отримані результати мають практичне значення для розробників логістичного програмного забезпечення (TMS) та транспортних компаній. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність прогнозування часу прибуття (ETA), зменшити операційні витрати та забезпечити стабільність перевезень навіть в умовах невизначеності, що є критично важливим для сучасної економіки

Література

1. Zhao Y., Zhang X., Xue Q. W. Container route optimization in a sea-rail intermodal network. 2016 5th international conference on civil, architectural and hydraulic engineering (ICCAHE 2016), Zhuhai, China, 30–31 July 2016. Paris, France, 2016. URL: <https://doi.org/10.2991/iccahe-16.2016.148> (date of access: 18.11.2025).
2. Toth P., Vigo D. 1. an overview of vehicle routing problems. The vehicle routing problem. 2002. P. 1–26. URL: <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch1> (date of access: 18.11.2025).
3. Utilizing machine learning on freight transportation and logistics applications: a review / K. Tsolaki et al. ICT express. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2022.02.001> (date of access: 18.11.2025).
4. The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics / V. Danchuk et al. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2023. Vol. 2, no. 3 (122). P. 64–73. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277583> (date of access: 18.11.2025).
5. Ahmed S. Optimization of goods transport for multimodal logistic platforms : thesis. 2021. URL: <http://www.theses.fr/2021LILUI002> (date of access: 18.11.2025).
6. Li X. Multiparty coordinated logistics distribution route optimization based on data analysis and intelligent algorithm. Journal of sensors. 2022. Vol. 2022. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/6053332> (date of access: 18.11.2025).
7. Multi-Objective optimization for multimodal transportation routing problem with stochastic transportation time based on data-driven approaches / Y. Peng et al. SSRN electronic journal. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4093003> (date of access: 18.11.2025).
8. Sun Y., Lang M., Wang D. Optimization models and solution algorithms for freight routing planning problem in the multi-modal transportation networks: a review of the state-of-the-art. The open civil engineering journal. 2015. Vol. 9, no. 1. P. 714–723. URL: <https://doi.org/10.2174/1874149501509010714> (date of access: 18.11.2025).
9. The integration of urban freight in public transportation: a systematic literature review / A. M. E. Amrani et al. Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 13. P. 5286. URL: <https://doi.org/10.3390/su16135286> (date of access: 18.11.2025).
10. Cyber-physical logistics system-based vehicle routing optimization / M. Lai et al. Journal of industrial & management optimization. 2014. Vol. 10, no. 3. P. 701–715. URL: <https://doi.org/10.3934/jimo.2014.10.701> (date of access: 18.11.2025).