

DOI: 10.32347/2412-9933.2026.65.150-155

УДК 004.9:004.75:656.1

Пасєка Павло ІвановичORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-7300>*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна*

Аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

Теренчук Світлана АнатоліївнаORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-4123>*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна*

Кандидат фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

Історія статті:

Надійшла: 28.01.2026

Прийнята: 25.02.2026

Опублікована: 26.03.2026

**КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНОГО ПІДХОДУ
ДО ФОРМУВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ МАРШРУТІВ**

Анотація. Досліджено розвиток інформаційних систем формування логістичних маршрутів, що застосовуються у сфері транспортної логістики, та проаналізовано алгоритмічні підходи до вирішення задачі маршрутизації транспортних засобів. Основною метою цього дослідження є визначення концепції розвитку цих систем у напрямі вдосконалення їхньої здатності функціонувати в динамічному і стохастичному середовищі в режимі реального часу. Розглянуто такі класичні алгоритмічні підходи до задач маршрутизації, як пошук найкоротшого шляху, задача комівояжера, транспортна задача та їхні модифікації, що орієнтовані на роботу з обмеженнями реального часу. Досліджено інтелектуальні та гібридні системи динамічного планування маршрутів, що використовують евристичні методи, машинне навчання і навчання з підкріпленням. Показано, що більшість існуючих систем маршрутизації використовують спрощені або фрагментарні моделі середовища, що обмежує їхню здатність адаптуватися до суттєвих змін умов руху, інфраструктури або зовнішніх факторів. Виявлено, що ключовими обмеженнями сучасних підходів є недостатня універсальність подання даних про середовище, слабка інтеграція між аналітичними та інтелектуальними компонентами, а також відсутність експертного рівня узгодження рішень щодо визначення найкращого маршруту. Обґрунтовано доцільність використання графових моделей середовища як універсальної форми зберігання й обробки логістичних даних, яка придатна і для класичних алгоритмів маршрутизації, і для методів штучного інтелекту. Запропоновано концепцію інтегрованого підходу до формування логістичних маршрутів, що поєднує класичні алгоритми пошуку маршрутів з інтелектуальними методами аналізу середовища і мультиагентними системами. Ця концепція створює передумови для підвищення адаптивності, стійкості та масштабованості систем формування логістичних маршрутів без відмови від перевірених алгоритмічних методів.

Ключові слова: адаптивність; динамічне середовище; експерт; інформаційна система; машинне навчання; мультиагентна система; транспортна логістика; штучний інтелект

Вступ

Проблема формування логістичних маршрутів у транспортних системах має тривалу історію і представлена значною кількістю наукових праць.

Проте ця задача досі лишається однією з ключових у транспортній логістиці та інформаційних системах управління перевезеннями, оскільки вибір маршруту транспортного засобу безпосередньо впливає на:

– ефективність використання транспортних ресурсів;

– рівень витрат;
– безпеку перевезень;
– час доставки;
– стійкість логістичних процесів до змін зовнішнього середовища.

Основою більшості сучасних рішень лишаються класичні алгоритмічні підходи, що детально описані у фундаментальних роботах з теорії графів [1] і оптимізації [2]. При цьому традиційні підходи до маршрутизації дедалі частіше стикаються з обмеженнями, які пов'язані зі зростанням обсягів

перевезень, погіршенням стану транспортних мереж і динамічним стохастичним характером зовнішнього середовища.

Сучасні інформаційні системи маршрутизації активно використовують дані щодо стану середовища, які надходять із різних джерел, включаючи зовнішні інформаційні платформи, навігаційні сервіси і телеметрію транспортних засобів. Проте більшість існуючих рішень, які використовуються в цих системах, орієнтовані на обмежений набір факторів і не забезпечують комплексного інтелектуального аналізу середовища. Це зумовлює необхідність переосмислення підходів до формування маршрутів з використанням методів штучного інтелекту (ШІ) і сучасних інформаційних технологій.

Мета дослідження

Метою дослідження є визначення концепції розвитку інформаційних систем формування логістичних маршрутів для вдосконалення їх здатності функціонувати в динамічному і стохастичному середовищі в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Алгоритм пошуку найкоротшого шляху в графі з невід'ємними вагами вперше запропоновано в роботі [1]. Перевагою цього підходу є гарантія знаходження оптимального рішення і формальна строгість. Основними недоліками цього підходу вважаються обмежена масштабованість і відсутність механізмів адаптації до динамічних змін середовища.

Розвиток евристичних алгоритмів [2], дозволив прискорити пошук шляхів за рахунок використання евристичних оцінок. Сильною стороною цих алгоритмів є ефективність у великих графах, однак їхня якість істотно залежить від вибору евристики. Ця залежність суттєво ускладнює застосування евристичних алгоритмів в умовах середовища, якому притаманна невизначеність. При цьому до сучасних логістичних систем все частіше висувається саме вимога працювати в умовах неповної, суперечливої інформації, яка швидко змінюється.

Сфера застосування сучасних інформаційних систем формування логістичних маршрутів варіюється від цивільних ланцюгів постачання до військової логістики і реагування на надзвичайні ситуації, що передбачає сприйняття середовища, роботу з невизначеністю і адаптивне коригування маршруту в режимі реального часу.

Задачі маршрутизації транспортного засобу та їх узагальнення систематизовано в [3]. Ці дослідження важливі для формалізації логістичних обмежень, проте більшість моделей орієнтовані на статичні чи квазістатичні умови і саме тому такі

традиційні моделі оптимізації, як детермінована маршрутизація транспортного засобу або статичне планування втрачають свою адекватність в умовах швидких змін зовнішнього середовища [4].

Евристичні та метаевристичні методи [5; 6], які використовуються для моделювання руху транспортних засобів дорожньою мережею міста дозволяють знаходити наближені рішення задачі пошуку найкоротшого шляху. Основною перевагою цих методів є гнучкість, проте вони не забезпечують стабільної якості рішень в умовах швидких змін середовища.

В останні роки в задачах маршрутизації з'явилася значна кількість робіт, які присвячені використанню машинного навчання і навчання з підкріпленням. Зокрема, в [7] продемонстровано можливість навчання моделей для вирішення цієї задачі без явного програмування правил. Подібні підходи, що описані в [8; 9], демонструють високий потенціал у вирішенні логістичних задач, але потребують значних обсягів даних і складні в інтерпретації.

Окрему групу становлять дослідження мульти-агентних систем [10 – 12], у яких логістичні задачі розв'язуються децентралізовано. Такі системи демонструють високу масштабованість, однак у більшості випадків агенти розглядаються як виконавці, а не суб'єкти прийняття рішень – ШІ-експерти.

Сучасні дослідження дедалі частіше підкреслюють важливість формального подання логістичного середовища у вигляді динамічних графів, що дозволяє компактно й гнучко представляти просторові та часові залежності між об'єктами системи.

Так в роботі [13] запропоновано Просторово-часове навчання для динамічної маршрутизації. В цій роботі топологія логістичної мережі моделюється як граф, створений із GPS-даних з використанням просторового кластерінгу. Подальше застосування графових нейронних мереж дозволяє виявляти взаємозв'язки у просторі і часі для прогнозування ризиків заторів і адаптивного оновлення ваг ребер маршруту транспортного засобу. Цей підхід показує високу ефективність у балансуванні між ефективністю доставки та оперативністю реакції на зміни, що відбуваються з середовищем. Це забезпечує радикальне зменшення ризику і збереження збалансованого шляху.

Аналогічно, [14] демонструє, що ієрархічні розподілені графові моделі значно підвищують масштабованість і адаптивність маршрутизації у великих міських мережах при швидких змінах транспортних умов, що є однією з ключових вимог сучасних логістичних систем. Перевага графового представлення полягає в універсальності як для класичних алгоритмічних так і для ШІ-методів.

Графи виступають природною абстракцією для транспортних мереж, де вершини відповідають локаціям чи транспортним вузлам, а ребра – шляхам із вагами, що можуть змінюватися в часі.

В огляді застосувань графових загорткових нейромереж у логістиці зазначено, що графові структури дозволяють інтегрувати складну топологію мережі з інформацією про динаміку транспортних потоків і цим самим поєднувати традиційний пошук маршруту з прогнозуванням і оптимізацією на основі ШІ [15].

Роботи з навчанням з підкріпленням на графах для багатокористувацьких систем планування маршрутів підкреслюють, що графова структура природно поєднується з алгоритмами навчання з підкріпленням, де стан середовища і дії агентів моделюються як графи. Це значно полегшує навчання моделей і підвищує адаптивність роботи системи у динамічних умовах [16].

Виклад основного матеріалу

Проведений аналіз показав, що жоден з існуючих підходів не забезпечує комплексного розв'язання задачі формування логістичних маршрутів у динамічному середовищі. Водночас, кожна група методів має сильні сторони, які доцільно використовувати в інтегрованому рішенні.

На рисунку показано узагальнену концепцію поєднання класичних алгоритмічних методів і інтелектуальних підходів для задач транспортної логістики в умовах динамічного середовища.



Рисунок – Концепція інтегрованого підходу до формування логістичних маршрутів у динамічному середовищі

Запропонована концепція передбачає, що для сприйняття середовища (виділення релевантних об'єктів, подій і контекстів) використовуються моделі комп'ютерного зору, аудіоаналізу і обробки сенсорних сигналів.

Далі:

1. При формуванні моделі логістичного середовища спостереження перетворюються у граф знань, вершини якого описують об'єкти, а ребра – просторово-часові чи логічні зв'язки між ними. Цей граф виступає «моделлю світу» системи формування логістичних маршрутів.

2. Ця «модель світу» використовується як класичними алгоритмами маршрутизації, що забезпечують формальну оптимальність і відтворюваність рішень, так і методами інтелектуального аналізу даних, що орієнтовані на виявлення прихованих закономірностей та прогнозування змін середовища.

При цьому:

2.1. Дані щодо середовища, які надходять з гетерогенних джерел, формалізуються:

- X_1 – стан ділянки дорожньої мережі;
- X_2 – стан покриття дороги;
- X_3 – щільність транспортного потоку;
- X_4 – швидкість транспортного потоку;
- X_5 – дані щодо транспортних засобів в околі користувача;
- X_{6n} – n -на ($n = \overline{1, N}$) нестандартна ситуація;
- X_{6k} – k -й фактор ризику ($k = \overline{1, K}$).

В загальному вигляді $X_{jn(k)}$, j ($j = \overline{1, J}$) – індекс фактора; n , k – індекси, що відповідають рівню подальшої деталізації відповідних факторів.

2.2. Сет суттєвих даних, які відображають актуальний стан логістичного середовища оновлюється у режимі реального часу.

3. При алгоритмічному пошуку маршруту застосовуються класичні підходи до маршрутизації, що базуються на строгій математичній формалізації транспортної мережі у вигляді зваженого графа. Алгоритми Dijkstra і A^* широко використовуються завдяки їхній прогнозованості і надійності [1; 2]. Сильною стороною цих алгоритмів є детермінованість і можливість формального аналізу складності. Водночас, ці алгоритми передбачають, що параметри графа відомі і відносно стабільні. Проте в реальному логістичному середовищі це припущення часто не виконується через вплив трафіку, погодних умов і непередбачуваних подій. Саме тому можливим напрямом покращення систем формування логістичних маршрутів є динамічна адаптація ваг ребер графу знань, однак класичні алгоритми не містять вбудованих механізмів інтелектуальної інтерпретації таких змін.

4. Для аналізу динаміки середовища можна використовувати інтелектуальні та гібридні системи динамічної маршрутизації. Такі комерційні системи маршрутизації, як Google Maps, OpenRouteService і HERE використовують гібридні підходи, що поєднують класичні алгоритми з аналізом великих потоків даних у реальному часі.

Сильною стороною цих систем є масштабованість і здатність швидко реагувати на зміну дорожньої ситуації. Проте вони орієнтовані переважно на мінімізацію часу чи відстані і не враховують специфічні логістичні контексти. У системах fleet management гібридні рішення доповнюються евристичними, проте залишаються жорстко прив'язаними до конкретних сценаріїв використання. Разом з тим, ці системи є закритими з точки зору внутрішніх моделей прийняття рішень.

4.1. При інтелектуальному аналізі можливе використання навчання з підкріпленням [7 – 9] Цей підхід демонструє можливість формувати маршрутні стратегії на основі накопиченого досвіду. Його перевагою є здатність враховувати складні нелінійні залежності між параметрами середовища, що надає можливість аналізувати невизначеність середовища. Основним недоліком цього підходу є відсутність прозорості рішень і складність інтеграції. Крім того, більшість робіт розглядають навчання як автономний процес без експертної корекції [7 – 9].

4.2. На експертному рівні пропонується використовувати мульти-агентні системи, в яких ШІ-агенти виконують роль експертів. При цьому стан середовища у майбутній момент часу формується на основі впливу дій агентів на середовище і результатах спостережень післядії, що надає можливість оцінювати ризики і виконувати адаптацію критеріїв, а ШІ-агенти можуть взаємодіяти, використовуючи генеративні моделі для формування стратегій альтернативних маршрутів, а також представляти транспортні засоби, логістичні вузли і сервіси. Сильною стороною цих систем є масштабованість і стійкість до відмов. Водночас, в існуючих мульти-агентних системах ШІ-агенти зазвичай діють за наперед визначеними правилами і не виконують ролі експерта.

5. Результатом роботи системи є рішення щодо вибору маршруту з множини прийнятних альтернатив. Остаточне рішення формується на основі інтеграції алгоритмічних і експертних компонентів, що дозволяє досягти балансу між оптимальністю, адаптивністю та стійкістю до змін зовнішніх умов. При цьому множина прийнятних маршрутів буде регулярно (кожні 5 секунд) зберігатися у вигляді дерев рішень, оновлюючись з урахуванням змін параметрів і прогнозу подальших змін середовища.

Збереження усієї множини прийнятних маршрутів необхідно для динамічного прогнозування розвитку логістичного середовища, оскільки при суттєвому погіршенні рекомендованого маршруту через непередбачувані зміни середовища система може оцінити динаміку альтернативних маршрутів і змінити результуюче рішення.

Також варто враховувати можливий вплив подій зміни маршруту на середовище, вплив такого людського фактора, як затримки сприйняття водієм потреби зміни маршруту, і запобігати переключенню між рекомендованими маршрутами у випадках коли певні маршрути по чергово стають кращими за рахунок переваги над іншими у межах похибки.

В цій статті поза увагою залишились роботи, в яких мульти-агентні системи розглядаються як інструмент для децентралізованого прийняття рішення. Проте аналіз досліджень [17 – 19] показав доцільність використання в задачі транспортної логістики контрольованого алгоритму XGBoost. Цей алгоритм є ефективним рішенням завдяки високій точності, швидкості прогнозування та можливості врахування багатьох параметрів. Його імплементація дозволить значно покращити вибір маршрутів на експертному рівні, зменшити затримки і оптимізувати витрату ресурсів. До ключових переваг XGBoost також можна віднести високу точність прогнозування, гнучкість у роботі з різними типами ознак, швидке виконання і можливість роботи в реальному часі і, нарешті, можливість врахування експертних знань у процесі навчання. Ця робота є перспективою подальшого розвитку.

Висновки

Аналіз сучасних інформаційних систем формування логістичних маршрутів показав, що існуючі підходи, попри активне використання ШІ, не забезпечують повноцінного експертного рівня прийняття рішень в умовах сучасного динамічного стохастичного середовища. Саме тому доцільним є збереження класичних алгоритмів маршрутизації як обчислювального ядра системи, що забезпечує формальну оптимальність і передбачуваність результатів.

Такий підхід створює передумови для підвищення адаптивності, обґрунтованості та стійкості маршрутних рішень, а також відкриває можливість для подальшого розширення функціональності систем за рахунок інтеграції нових джерел даних, експертних стратегій та інтелектуальних методів аналізу.

Передбачається, що в межах запропонованої концепції ШІ-агенти виконують оцінку стану

середовища, ризиків, узгодження критеріїв, оптимізацію і адаптацію маршрутних рішень у режимі реального часу. Для аналізу та інтерпретації стану середовища, прогнозування змін і адаптації параметрів графової «моделлю світу» системи формування логістичних маршрутів доцільно застосовувати інтелектуальні методи машинного навчання.

Запропонована концепція поєднує класичні алгоритми маршрутизації з інтелектуальним аналізом середовища і мульти-агентними системами, що дозволяє подолати фрагментарність існуючих рішень, підвищити адаптивність системи і створити основу для побудови інтегрованої інформаційної інтелектуальної системи формування логістичних маршрутів у near real-time режимі.

Результати роботи можуть бути використані як теоретична і методологічна основа для подальших наукових досліджень і розробки інтегрованих інформаційних інтелектуальних систем логістичної маршрутизації. У таких системах передбачається формування множини допустимих маршрутів із

використанням класичних алгоритмічних методів, інтелектуального рівня, де ШІ-агенти, які функціонують у складі мульти-агентної системи, виконують роль експертів, здійснюючи оцінювання альтернативних маршрутів з урахуванням динамічних змін середовища, множини критеріїв оптимізації та можливої невизначеності.

Конфлікт інтересів. Автори підтверджують відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

Фінансування. Дослідження було проведено без фінансової підтримки.

Доступність даних. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту. Автори підтверджують, що при створенні даної роботи вони не використовували інструментальні засоби штучного інтелекту.

Список використаних джерел / References

1. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
2. Hart, P., Nilsson, N. & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4 (2), 100–107.
3. Toth, P. & Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications*. SIAM.
4. Pasięka, P., Terenchuk, S., Poltorachenko, N. & Yeremenko, B. (2025). Methodology for decision making by an autonomous system in a complex logistical environment. *Proceedings of "Information technologies and security"*.
5. Dorigo, M. & Stützle, T. (2016). *Ant colony optimization*. MIT Press.
6. Gendreau, M. & Potvin, J.-Y. (2019). *Handbook of metaheuristics*. Springer.
7. Nazari, M. et al. (2018). Reinforcement learning for solving the vehicle routing problem. *NeurIPS*.
8. Kool, W., van Hoof, H. & Welling, M. (2019). Attention, learn to solve routing problems. *ICLR*.
9. Chen, X. et al. (2020). Dynamic vehicle routing with deep reinforcement learning. *Transportation Research Part C*, 113, 102577.
10. Wooldridge, M. (2020). *An introduction to multiagent systems*. Wiley.
11. Shen, W. et al. (2018). Multi-agent systems for transportation logistics. *IEEE Systems Journal*, 12 (1), 428–439.
12. Zhang, Y. & Chen, M. (2022). Multi-agent decision making in dynamic logistics environments. *Applied Soft Computing*, 116, 108364.
13. Xue, Z., Liu, Y., Zhang, H. & Wang, J. (2026). Resilient routing: Risk-aware dynamic routing in smart logistics via spatiotemporal graph learning. *arXiv preprint*. URL: <https://arxiv.org/abs/2601.13632>
14. Han, Z., Meng, L. & Zhang, J. (2025). A distributed hierarchical spatio-temporal edge-enhanced graph neural network for city-scale dynamic logistics routing. *arXiv preprint*. URL: <https://arxiv.org/abs/2512.18441>
15. Monemi, N., Ghobadi, S. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2025). Graph convolutional networks for logistics optimization: A survey of scheduling and operational applications. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 185, 103450.
16. Kuliavets, A. & Burov, Y. (2025). A method for predicting delivery delays and route optimisation based on graph neural networks in logistics systems. *System Analysis & Information Technologies*, 18 (1), 45–56.
17. Maulud, D. & Abdulazeez, A. M. (2020). A review on linear regression comprehensive in machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 1 (4), 140–147.
18. Charbuty, B. & Abdulazeez, A. (2021). Classification based on decision tree algorithm for machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2 (1), 20–28.
19. Bentéjac, C., Csörgő, A. & Martínez-Muñoz, G. (2021). A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*, 54 (3), 1937–1967.

Pavlo Pasieka

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-7300>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

PhD student of the Department of Information Technologies of Design and Applied Mathematics

Svitlana Terenchuk

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-4123>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

PhD (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Information Technologies of Design and Applied Mathematics

**CONCEPT OF DEVELOPING AN INTEGRATED APPROACH
TO THE FORMATION OF LOGISTIC ROUTES**

Abstract. *The development of information systems for the formation of logistic routes used in the field of transport logistics is studied, and algorithmic approaches to solving the vehicle routing problem are analyzed. The main goal of this study is to define the concept of developing these systems toward improving their ability to function in dynamic and stochastic environments in real time. Classical algorithmic approaches to routing problems, such as the shortest path search, the traveling salesman problem, the transportation problem, and their modifications oriented towards real-time constraints, are considered. Intelligent and hybrid dynamic route planning systems using heuristic methods, machine learning, and reinforcement learning are investigated. It is shown that most existing routing systems use simplified or fragmentary environmental models, which limits their ability to adapt to significant changes in traffic conditions, infrastructure, or external factors. It is revealed that the key limitations of current approaches are the insufficient universality of environmental data representation, weak integration between analytical and intelligent components, and the lack of an expert level of decision coordination regarding the determination of the best route. The expediency of using graph models of the environment as a universal form of storage and processing of logistic data, suitable for both classical routing algorithms and artificial intelligence methods, is substantiated. A concept of an integrated approach to the formation of logistic routes is proposed, combining classical route search algorithms with intelligent environmental analysis methods and multi-agent systems. This concept creates the prerequisites for increasing the adaptability, resilience, and scalability of logistic route formation systems without abandoning proven algorithmic methods.*

Keywords: *adaptability; dynamic environment; expert; information system; machine learning; multi-agent system; transport logistics; artificial intelligence*

Посилання на публікацію

APA Pasieka, P. & Terenchuk, S. (2026). Concept of developing an integrated approach to the formation of logistic routes. *Management of Development of Complex Systems*, 65, 150–155, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.150-155](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.150-155).

ДСТУ Пасека П. І., Теренчук С. А. Концепція розвитку інтегрованого підходу до формування логістичних маршрутів. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2026. № 65. С. 150 – 155, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.150-155](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.150-155).