

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-64>  
УДК 004.6

**ПИРИГ ЯРОСЛАВ**

Національний університет «Львівська політехніка»  
<https://orcid.org/0009-0001-2104-8439>  
e-mail: [yaroslav.r.pyrih@lpnu.ua](mailto:yaroslav.r.pyrih@lpnu.ua)

**ПИРИГ ЮЛІЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»  
<https://orcid.org/0000-0002-8973-4005>  
e-mail: [yuliia.v.klymash@lpnu.ua](mailto:yuliia.v.klymash@lpnu.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ У «РОЗУМНОМУ МІСТІ»

*Розглянуто визначення маршруту транспортного засобу у «розумному місті» на основі розробленого багатокритеріального методу із використанням генетичного алгоритму, який враховує найменшу відстань та рівень завантаженості доріг, використовуючи відповідні коефіцієнти та штрафи. Для оптимізації пошуку маршруту застосовано еволюційні оператори генетичного алгоритму, зокрема турнірний відбір, впорядковане схрещування та мутацію на основі перемішування. Розглянуто сценарій пошуку оптимального маршруту з використанням таких критеріїв як довжина маршруту та рівень завантаженості дорожніх ділянок, що дозволяє оцінити не лише відстань, а й пропускну здатність маршруту. На основі результатів імітаційного моделювання показано, що використання запропонованого рішення дозволило визначити оптимальний маршрут і множини альтернативних маршрутів для Сихівського району міста Львова. Таким чином, представлений алгоритм може бути інтегрований в інтелектуальні транспортні системи «розумного» міста.*

*Ключові слова:* маршрут транспортного засобу, «розумне місто», генетичний алгоритм, граф.

**PYRIH YAROSLAV, PYRIH YULIA**

Lviv Polytechnic National University

## RESEARCH ON DETERMINING THE ROUTE OF A TRANSPORT VEHICLE IN A SMART CITY

*The article is devoted to the development of a multicriteria approach to vehicle routing in a smart city using a genetic algorithm. The proposed solution combines the principles of evolutionary optimisation while taking into account distance and traffic load indicators, which enables the formation of efficient routes under dynamic changes in the transport environment. The algorithm implements a combination of tournament selection, ordered crossover, and shuffle-based mutation, ensuring a balanced trade-off between convergence speed and solution diversity. A fitness function is presented that determines the quality (optimality) of each potential route by considering the Euclidean distance between nodes and four levels of road congestion. A scenario for optimal route search based on such criteria as route length and road segment congestion level is analysed, which makes it possible to evaluate not only the distance but also the capacity of the route. For simulation modelling, it is assumed that the smart city nodes are randomly distributed within the considered area, subject to a constraint on the maximum communication range. In addition to random placement, nodes are installed at each intersection and road turn, which improves network connectivity and ensures communication at points where the direction of movement changes. The graph of the investigated smart city network is presented. The simulation results, demonstrated using the Sykiv district of Lviv as a case study, confirm the algorithm's ability to provide adaptive regulation of traffic flows and to determine a set of alternative routes, thereby offering greater flexibility in route selection under congested traffic conditions. The practical value of the study lies in the possibility of integrating the proposed approach into intelligent transport management systems.*

*Keywords:* vehicle route, smart city, genetic algorithm, graph.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.12.2025  
Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026  
Опубліковано / Published 29.01.2026



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/)

© Пиріг Ярослав, Пиріг Юлія

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із ключових викликів розвитку сучасних мегаполісів є забезпечення ефективної транспортної логістики, що передбачає зменшення заторів, скорочення часу пересування, зниження рівня забруднення повітря та раціональне використання дорожньої інфраструктури. У контексті концепції «розумного міста» [1] важливу роль відіграє інтеграція транспортних засобів і дорожньої інфраструктури через системи комунікації Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Roadside Unit (RSU) та Vehicle-to-Everything (V2X), що базуються на безпроводних технологіях зв'язку п'ятого покоління (5G) та інтелектуальних сенсорних мережах.

Задача оптимальної маршрутизації транспортних засобів у таких умовах ускладнюється високою динамічністю дорожньої ситуації, неоднорідністю трафіку та впливом зовнішніх факторів (ремонт, погодні умови, аварії) [2]. Традиційні підходи, які враховують лише мінімізацію відстані або часу руху, є недостатніми для досягнення адаптивності та стійкості системи в реальному часі [3]. Тому актуальним науковим і практичним завданням є розроблення багатокритеріального методу маршрутизації, який забезпечує адаптивний вибір маршрутів з урахуванням багатьох змінних параметрів транспортного середовища та підвищує ефективність управління потоками у «розумному» місті.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Стрімкий розвиток концепції «розумного міста» зумовлює зростання вимог до ефективності функціонування інтелектуальних транспортних систем, що безпосередньо пов'язане із маршрутизацією транспортних засобів. Оптимальний вибір маршруту впливає на пропускну здатність дорожньої мережі, рівень

транспортного навантаження, час переміщення, споживання енергетичних ресурсів та екологічні показники міського середовища. У зв'язку з цим питання пошуку маршруту транспортного засобу активно досліджується багатьма науковцями.

У роботі [4] розглянуто задачу оптимізації шляху автобусів для вибору найкоротшого шляху. Її вирішення пропонується за допомогою генетичних алгоритмів шляхом отримання відповідних значень вартості в режимі реального часу з використанням інформації з Google Maps. Експериментальні результати показали, що генетичний алгоритм, як еволюційний алгоритм, може генерувати прийнятні рішення для проблем маршрутизації шкільних автобусів. Автори [5] представили персоналізований додаток для маршрутизації, який дозволяє кінцевим користувачам гнучко налаштувати свої уподобання щодо маршруту, включаючи відстань подорожі, орієнтовний час подорожі та рівень безпеки. Результати валідації запропонованого рішення наведено з використанням реалістичного набору даних з міста Манчестер в Англії.

Робота [6] пропонує авторську стратегію маршрутизації, засновану на глибокому навчанні з підкріпленням. Ідея полягає у виконанні дій маршрутизації в режимі реального часу з урахуванням фактичної дорожньої ситуації на загальній дорожній мережі. Для оцінки ефективності запропонованого рішення реалізовано процедуру спільного проектування, що включає симулятор дорожнього руху та середовище MATLAB для інтеграції інформації, яка надходить з дорожніх карт та траєкторій стану транспортних засобів. Показано, що запропонований алгоритм може успішно реалізовувати рішення щодо маршрутизації в режимі реального часу та покращити накопичений час очікування, незважаючи на динамічні зміни всередині дорожнього середовища. Стаття [7] описує стратегію планування маршруту для групи транспортних засобів на основі алгоритму мурашиної колонії. Результати моделювання показують, що запропонований алгоритм може розумно використовувати ресурси дорожньої мережі та забезпечувати найменший час прибуття всіх транспортних засобів до місця призначення.

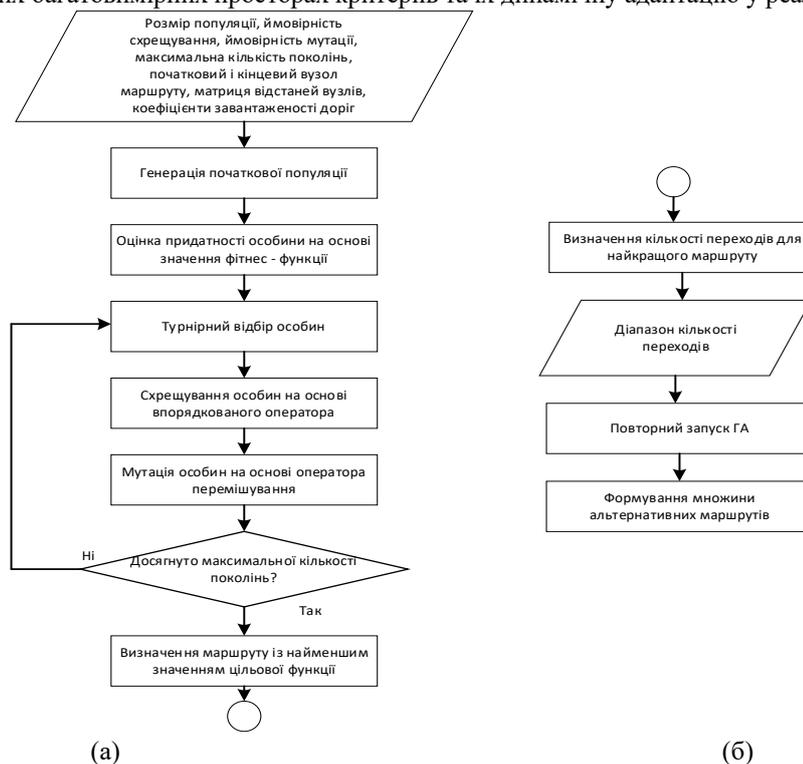
Отже, враховуючи багатокритеріальний характер задачі маршрутизації транспортних засобів у міському середовищі, а також необхідність оперативного врахування реальної дорожньої ситуації, подальші дослідження у напрямі оптимального пошуку маршрутів є обґрунтованими та науково доцільними.

**Формулювання цілей статті**

**Метою роботи є:** розробка та дослідження ефективності застосування генетичного алгоритму для визначення маршруту транспортного засобу у «розумному місті».

**Виклад основного матеріалу**

З огляду на розвиток концепції «розумного» міста, де транспортна система є інтегрованою частиною єдиного інформаційного простору, виникає потреба у застосуванні адаптивних алгоритмів, здатних аналізувати та синтезувати дані з різномірних джерел – сенсорних мереж, транспортних засобів, дорожніх елементів і хмарних сервісів. Такий підхід дає змогу здійснювати багатокритеріальну маршрутизацію, враховуючи не лише геометричні параметри шляху, але й показники щільності трафіку, рівня завантаженості вузлів, що впливають на загальну ефективність транспортного потоку. У зв'язку з чим розроблено багатокритеріальний метод на основі генетичного алгоритму (ГА) [8] (рис. 1), використання якого забезпечує можливість пошуку оптимальних маршрутів у складних багатовимірних просторах критеріїв та їх динамічну адаптацію у реальному часі.



**Рис. 1.** Узагальнена блок-схема роботи розробленого алгоритму: (а) пошуку оптимального маршруту, (б) множини резервних маршрутів по критерію кількості транзитів

Мережа розглядається як граф  $G(V, E)$ , де  $V$  – множина вершин (місць розташування),  $E$  – множина ребер (відстаней між вузлами (вершинами)). На етапі генерації початкової популяції здійснюється формування особин (маршрутів)  $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ , для кожної з яких початкова та кінцева точка є однаковими. Фітнес-функція  $F(X_i)$  визначає якість (оптимальність) кожного потенційного маршруту:

$$F(X_i) = \min \sum_{j=1}^{n-1} (w_1 d(v_j, v_{j+1}) + w_2 d(v_j, v_{j+1}) + w_3 d(v_j, v_{j+1}) + w_4 d(v_j, v_{j+1})), \quad (1)$$

де  $d(v_j, v_{j+1})$  – Евклідова відстань між вузлами,  $w_1 \dots w_4$  – коефіцієнти для оцінки рівня завантаженості доріг (чим більше значення коефіцієнта, тим більша завантаженість):  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 1.5$ ,  $w_3 = 2$ ,  $w_4 = 3$ . Для здійснення оцінки придатності кожного маршруту використовується багатокритеріальна матриця, у якій розміщуються дані про вузли, відстань між ними із урахуванням коефіцієнтів із (1), та штрафи у розмірі 10 000, які використовуються у випадку відсутності прямого шляху між двома вершинами і при недоступності такого шляху через ремонтні роботи та інші форс-мажорні обставини.

Формування множини альтернативних маршрутів здійснюється на основі визначення діапазону кількості переходів, який базується на значенні цього параметра для найкращого маршруту.

Альтернативні маршрути дозволяють адаптуватися до змін дорожньої інфраструктури (аварії, затори, тощо) без необхідності повторного обчислення оптимального шляху. Крім цього, їх використання дозволяє рівномірніше розподіляти транспортні потоки, оскільки при виборі одного маршруту усіма транспортними засобами збільшується імовірність заторів.

Для проведення імітаційного моделювання прийнято, що вузли «розумного» міста (сенсори, RSU тощо) випадково розміщені на розглянутій території з урахуванням обмеження на максимальну дальність зв'язку. Радіус дії кожного вузла не перевищує 200 метрів. Окрім випадкового розподілу, вузли встановлюються на кожному перехресті та поворотах транспортної мережі, що дозволяє покращити зв'язність та забезпечити зв'язок у місцях зміни напрямку руху. Для проведення дослідження обрано територію Сихівського району міста Львова, який є одним із найбільших та найдинамічніших районів міста з розвинутою транспортною інфраструктурою. У дослідженні розглядається визначення маршруту між двома контрольними точками: точка А (відправлення): вул. Коломийська, 10; точка В (прибуття): вул. Зелена, 283. Встановлено відстані між усіма вузлами на основі Евклідової метрики та внесено їх до матриці відстаней. Загалом у межах досліджуваної території розміщено 73 вузли.

Далі розглянуто сценарій пошуку оптимального маршруту з використанням таких критеріїв як довжина маршруту та рівень завантаженості дорожніх ділянок, що дозволяє оцінити не лише відстань, а й пропускну здатність маршруту (рис. 2). З урахуванням коефіцієнтів відповідно до (1) транспортну мережу досліджуваної території представлено на рис. 2, де зелений колір відповідає  $w_1 = 1$ , жовтий –  $w_2 = 1.5$ , оранжевий –  $w_3 = 2$ , червоний –  $w_4 = 3$ .

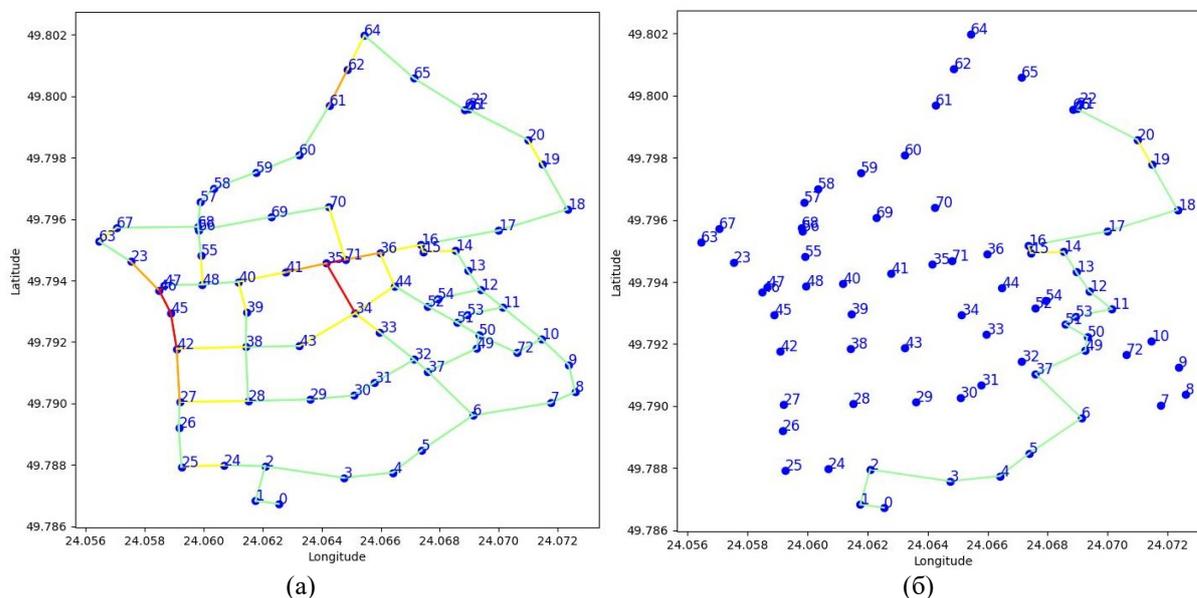


Рис. 2. Транспортна мережа досліджуваної території із завантаженістю доріг (а) та (б) оптимальний маршрут при використанні розробленого ГА

Відповідно до другого етапу роботи розробленого методу для альтернативних маршрутів вибрано діапазон у межах  $k_{trans\_best\_r} \pm 4$ , де  $k_{trans\_best\_r}$  – кількість переходів для найкращого маршруту. Оскільки для найкращого маршруту цей параметр становив 23, відповідно вибраний діапазон [19;27]. Для зручності порівняння наведених результатів моделювання перші 4 альтернативні маршрути представлено у таблиці 1.

Для визначення часу руху транспортного засобу у роботі для цього випадку, прийнято, що швидкість руху становить 30 км/год.

Таблиця 1

**Отримані маршрути при використанні розробленого ГА із урахуванням двох критеріїв**

Номер маршруту	Вузли утвореного маршруту	Кількість переходів	Значення оцінки маршруту	Час руху транспортного засобу, с
1	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 53, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	23	2655	318.6
2	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	20	2680	321.6
3	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 54, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	23	2682	321.84
4	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	22	2710	325.2

Таким чином, представлений метод здатний адаптуватися до різних сценаріїв, використання альтернативних маршрутів забезпечує більшу гнучкість щодо вибору шляху в умовах завантаженості транспортної мережі.

**Висновки з даного дослідження  
і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Робота присвячена визначенню маршруту транспортного засобу у «розумному місті» на основі розробленого багатокритеріального методу із використанням генетичного алгоритму, який враховує найменшу відстань та рівень завантаженості доріг, використовуючи відповідні коефіцієнти та штрафи. Для оптимізації пошуку маршруту застосовано еволюційні оператори генетичного алгоритму, зокрема турнірний відбір, впорядковане схрещування та мутацію на основі перемішування. На основі результатів імітаційного моделювання показано, що використання пропонованого рішення дозволило визначити оптимальний маршрут і множину альтернативних маршрутів для Сихівського району міста Львова. Таким чином, представлений алгоритм може бути інтегрований в інтелектуальні транспортні системи «розумного» міста для аналізу дорожньої ситуації та адаптивного планування маршрутів транспортних засобів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення представленого методу маршрутизації з урахуванням більшої кількості динамічних факторів транспортного середовища, таких як погодні умови та стан дорожнього покриття.

**Література**

1. Kaur M., Aron R. Connecting Cities: IoST Innovation for Smarter Cities // 2024 International Conference on Recent Innovation in Smart and Sustainable Technology (ICRISST), Bengaluru, India. – 2024. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICRISST59181.2024.10922069.
2. Hou Y., Wang J., Du Y., Han H. Vehicle Routing Model Based on Real-Time Road Conditions Considering Carbon Emissions // 2024 International Conference on New Trends in Computational Intelligence (NTCI), Qingdao, China. – 2024. – P. 522–526. – DOI: 10.1109/NTCI64025.2024.10776332.
3. Messaoud E., El Bouzekri El Idrissi A., El Alaoui A. E. The green dynamic vehicle routing problem in sustainable transport // 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL), Le Havre, France. – 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/GOL.2018.8378096.
4. Ozmen M., Sahin H. Real-Time Optimization of School Bus Routing Problem in Smart Cities Using Genetic Algorithm // 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India. – 2021. – P. 1152–1158. – DOI: 10.1109/ICICT50816.2021.9358666.
5. Hayes S., Wang S., Djahel S. Personalized Road Networks Routing with Road Safety Consideration: A Case Study in Manchester // 2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). – Piscataway, NJ, USA, 2020. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ISC251055.2020.9239085.
6. Giannini F., Franzè G., Pupo F., Fortino G. Autonomous Vehicles in Smart Cities: a Deep Reinforcement Learning Solution // IEEE International Conference on Dependable, Autonomous and Secure Computing, Pervasive Intelligence and Computing, Cloud and Big Data Computing, Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech), Falerna, Italy. – 2022. – P. 1–6.
7. Tong N., Jin M., Hun J. Vehicle group path planning algorithm considering equilibrium // 2022 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Hengyang, China. – 2022. – P. 357–361. – DOI: 10.1109/ICITBS55627.2022.00083.
8. Pyrih Y., Pyrih Y., Maksymyuk T., Dumych S., Klymash M. Genetic Algorithm based Routing in Wireless Sensor Networks with Various Distance Metrics // International Journal of Computing. – 2024. – Vol. 23, № 4. – P. 715–725.

**References**

1. Kaur, M., & Aron, R. (2024). Connecting cities: IoST innovation for smarter cities. In 2024 International Conference on Recent

- Innovation in Smart and Sustainable Technology (ICRISST), Bengaluru, India (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRISST59181.2024.10922069>
2. Hou, Y., Wang, J., Du, Y., & Han, H. (2024). Vehicle routing model based on real-time road conditions considering carbon emissions. In 2024 International Conference on New Trends in Computational Intelligence (NTCI), Qingdao, China (pp. 522–526). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NTCI64025.2024.10776332>
  3. Messaoud, E., El Bouzekri El Idrissi, A., & El Alaoui, A. E. (2018). The green dynamic vehicle routing problem in sustainable transport. In 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL), Le Havre, France (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378096>
  4. Ozmen, M., & Sahin, H. (2021). Real-time optimization of school bus routing problem in smart cities using genetic algorithm. In 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India (pp. 1152–1158). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICT50816.2021.9358666>
  5. Hayes, S., Wang, S., & Djahel, S. (2020). Personalized road networks routing with road safety consideration: A case study in Manchester. In 2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Piscataway, NJ, USA (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISC251055.2020.9239085>
  6. Giannini, F., Franzè, G., Pupo, F., & Fortino, G. (2022). Autonomous vehicles in smart cities: A deep reinforcement learning solution. In IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Pervasive Intelligence and Computing, Cloud and Big Data Computing, Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech), Falerna, Italy (pp. 1–6).
  7. Tong, N., Jin, M., & Hun, J. (2022). Vehicle group path planning algorithm considering equilibrium. In 2022 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Hengyang, China (pp. 357–361). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICITBS55627.2022.00083>
  8. Pyrih, Y., Pyrih, Y., Maksymyuk, T., Dumych, S., & Klymash, M. (2024). Genetic algorithm based routing in wireless sensor networks with various distance metrics. *International Journal of Computing*, 23(4), 715–725.