

УДК 004.942:614.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.30>

Олексій ХОНІН

аспірант,

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»,

oleksii.o.khonin@e-u.edu.ua

ORCID: 0009-0007-9328-7870

Олена СКЛЯРЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

завідувач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування,

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID: 0000-0001-6555-1223

Scopus-Author ID: 57192677216

АЛГОРИТМИ ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ СЛУЖБ ЕКСТРЕНИХ РЕАГУВАНЬ

Анотація. Метою дослідження є питання підвищення ефективності реагування служб надзвичайних ситуацій шляхом оптимізації алгоритмів маршрутизації та розробка математичної моделі маршрутизації та алгоритмів, які забезпечують найкоротші шляхи з урахуванням змін дорожньої ситуації в реальному часі.

Методологія. У дослідженні використано методи теорії графів, евристичні та адаптивні алгоритми, а також симуляційне моделювання для порівняння ефективності різних підходів.

Наукова новизна. Уперше запропоновано комплексний підхід до побудови маршруту з урахуванням динамічної зміни дорожньої обстановки в реальному часі, що базується на адаптивному алгоритмі з механізмом перепланування. На відміну від класичних методів, розроблений алгоритм дозволяє своєчасно коригувати маршрут у разі виявлення заторів, аварій чи перекриттів, забезпечуючи стійкість рішень та мінімізацію часу прибуття. Крім того, дослідження передбачає масштабованість алгоритмів для різних типів населених пунктів – від мегаполісів до сільської місцевості – з урахуванням особливостей дорожньої інфраструктури. Важливою складовою новизни є інтеграція моделі в реальні системи підтримки прийняття рішень, що дає змогу не лише моделювати, але й практично застосовувати результати.

Висновки. Запропонований адаптивний підхід до маршрутизації дозволяє суттєво зменшити середній час реагування служб надзвичайних ситуацій, що підтверджено результатами симуляційного моделювання. Розроблені алгоритми забезпечують гнучке врахування динамічної дорожньої обстановки в режимі реального часу та можуть бути інтегровані у сучасні диспетчерські системи. Масштабованість і технологічна сумісність рішення робить його перспективним для впровадження у різних адміністративно-територіальних умовах України.

Ключові слова: алгоритми маршрутизації, служби надзвичайних ситуацій, оптимізація, час реагування, теорія графів, адаптивні алгоритми, транспортна модель.

Oleksii KHONIN, Olena SKLIARENKO. OPTIMAL ROUTING ALGORITHMS FOR EMERGENCY RESPONSE SERVICES

Abstract. The purpose of this study is to enhance the efficiency of emergency response services by optimizing routing algorithms and developing a mathematical model and algorithms that ensure the shortest paths while accounting for real-time changes in road conditions.

Methodology. The study employs methods of graph theory, heuristic and adaptive algorithms, as well as simulation modeling to compare the effectiveness of various approaches.

Scientific novelty. A comprehensive approach to route planning is proposed for the first time, taking into account dynamic changes in traffic conditions in real time. It is based on an adaptive algorithm with a replanning mechanism. Unlike classical methods, the developed algorithm allows for timely route adjustments in case of traffic jams, accidents, or road closures, ensuring solution robustness and minimizing arrival time. Moreover, the study considers the scalability of the algorithms for various types of settlements – from large metropolitan areas to rural regions – while accounting for specific features of the transportation infrastructure. An important aspect of the novelty lies in the integration of the model into real-world decision support systems, enabling not only simulation but also practical implementation of the results.

Conclusions. The proposed adaptive routing approach significantly reduces the average response time of emergency services, as confirmed by simulation results. The developed algorithms provide flexible handling of real-time traffic dynamics and can be integrated into modern dispatch systems. The solution's scalability and technological compatibility make it promising for implementation in various administrative and territorial contexts of Ukraine.

Key words: routing algorithms, emergency response services, optimization, response time, graph theory, adaptive algorithms, transportation model.

© О. Хонін, О. Скляренко, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Вступ. Швидкість прибуття служб екстреного реагування є визначальним чинником для збереження життів та мінімізації збитків у надзвичайних ситуаціях. В умовах зростання урбанізації та транспортного навантаження вибір оптимального маршруту ускладнюється динамікою дорожньої обстановки. Актуальність дослідження зумовлена зростанням навантаження на служби реагування в умовах урбанізації, інтенсивного автомобільного руху та частих надзвичайних подій.

Традиційні алгоритми маршрутизації, як-от Дейкстра чи A^* , не враховують зміни в реальному часі, що знижує їхню ефективність. Це зумовлює необхідність розробки адаптивних рішень, здатних швидко реагувати на затори, аварії та інші перешкоди.

Метою дослідження є створення алгоритмів маршрутизації для служб 101/112, які забезпечують мінімальний час реагування завдяки врахуванню змін дорожніх умов у реальному часі.

Постановка проблеми. Служби екстреного реагування часто стикаються з проблемою вибору найшвидшого маршруту до місця події в умовах динамічної дорожньої ситуації. Традиційні алгоритми не враховують затори, аварії або перекриття доріг у реальному часі, що призводить до затримок і зниження ефективності реагування. Відсутність адаптивних алгоритмів, здатних оперативно перебудовувати маршрут з урахуванням актуальних даних, обмежує можливості сучасних диспетчерських систем. Це створює потребу у нових підходах до оптимізації маршрутів із використанням інтелектуальних методів і симуляційного моделювання [1; 4].

Аналіз досліджень і публікацій. Проблема побудови ефективних маршрутів у транспортних мережах розглядається в науковій літературі вже понад півстоліття. Серед класичних підходів до вирішення задач маршрутизації найпоширенішими є алгоритм Дейкстри, алгоритм A^* та алгоритм Флойда-Уоршелла [8]. Ці алгоритми забезпечують знаходження найкоротшого шляху в зважених графах, однак мають певні обмеження щодо масштабованості та адаптації до динамічних змін трафіку.

У сучасних дослідженнях усе більше уваги приділяється адаптивним та інтелектуальним методам оптимізації. Зокрема, розглядаються підходи на основі динамічних графів, у яких ваги ребер змінюються в режимі реального часу, залежно від навантаження та заторів [3]. Використання методів машинного навчання для прогнозування затримок, вибору маршруту або оцінки ризиків дозволяє підвищити точність та ефективність планування [2].

Особливої актуальності набувають алгоритми маршрутизації в контексті систем екстреного реагування. У таких системах важливим є не лише скорочення відстані, а й мінімізація часу з урахуванням пріоритетів, типу надзвичайної ситуації та ресурсів підрозділів. У літературі представлено різноманітні підходи: багатокритеріальна оптимізація, моделі із часовими вікнами, використання геоінформаційних систем (ГІС) у поєднанні з GPS [5; 6; 8].

Попри значні напрацювання, досі спостерігається низка обмежень: недостатня адаптація алгоритмів до умов міських мереж з високим рівнем нестабільності; обмежена інтеграція з оперативними диспетчерськими системами; відсутність повноцінної перевірки рішень у реальних сценаріях, зокрема в українських умовах [1; 4].

Це вказує на необхідність розроблення нових або вдосконалених моделей, що враховують особливості роботи служб реагування в умовах обмеженого часу, високого навантаження на дороги та змінного середовища.

Мета та завдання дослідження. Метою статті є підвищення ефективності реагування служб надзвичайних ситуацій шляхом розробки та впровадження алгоритмів маршрутизації, здатних адаптуватися до змін дорожніх умов у реальному часі [9; 10].

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні завдання:

- побудова математичної моделі маршрутизації, яка враховує часові затримки, завантаженість доріг та тип події;
- аналіз ефективності класичних і сучасних алгоритмів на основі експериментального моделювання;
- розробка адаптивного алгоритму маршрутизації для екстрених служб з динамічною переоцінкою ваг ребер у графі;
- реалізація програмного прототипу системи маршрутизації;
- оцінка масштабованості рішень для умов різних міських і сільських локацій.

Виклад основного матеріалу. У рамках дослідження було розроблено адаптивний алгоритм маршрутизації, який поєднує класичні методи графового пошуку з механізмами динамічного оновлення даних про дорожню ситуацію в режимі реального часу. В основі рішення – модифікований алгоритм A^* , розширений блоком оцінювання актуального стану транспортної мережі, що базується на телематичних та GPS-даних.

Для перевірки ефективності було побудовано транспортну модель міської мережі, що враховує типи доріг, обмеження швидкості, ймовірність виникнення заторів та непередбачених подій (аварій,

ремонтів). Проведено серію симуляцій з порівнянням роботи класичних та адаптивних алгоритмів на різних сценаріях. Результати демонструють скорочення середнього часу прибуття на 12–27%, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

Запропоноване рішення може бути інтегроване в системи диспетчеризації служб 101/112 та масштабовано для застосування в містах з різною інфраструктурною складністю.

У роботі використано орієнтований граф $G = (V, E)$ $G = (V, E)$ $G = (V, E)$, де:

- VV – множина вершин, що представляють ключові точки дорожньої мережі (перехрестя, вузли доступу);

- EE – множина дуг з динамічними вагами $w_e(t)$ $w_e(t)$ $w_e(t)$, які змінюються в залежності від поточної ситуації (затор, обмеження швидкості, аварії).

Ваги дуг визначаються як:

$$w_e(t) = d_{e(t)} + \delta_e(t) \quad w_e(t) = \frac{d_{e(t)}}{v_e(t)} + \delta_e(t) \quad w_e(t) = v_e(t)d_e + \delta_e(t), \text{ де:}$$

- $d_{e(t)}$ – довжина ділянки;
- $v_e(t)$ – фактична швидкість на ділянці у момент t ;
- $\delta_e(t)$ – затримка, зумовлена особливими обставинами (наприклад, аварією або перекриттям).

Псевдочод запропонованого адаптивного алгоритму:

Input: граф $G(V, E)$, початкова вершина s , цільова вершина t

Ініціалізувати чергу пріоритетів Q :

Для кожної вершини $v \in V$: $\text{dist}[v] \leftarrow \infty$

$\text{dist}[s] \leftarrow 0$

$Q.\text{enqueue}(s, \text{priority}=0)$

Поки Q не порожня:

$u \leftarrow Q.\text{dequeue}()$

Якщо $u == t$: завершити

Для кожного сусіда v з u :

$w \leftarrow \text{обчислити_вагу}(u, v, t)$

Якщо $\text{dist}[v] > \text{dist}[u] + w$:

$\text{dist}[v] \leftarrow \text{dist}[u] + w$

$Q.\text{enqueue}(v, \text{priority}=\text{dist}[v])$

Якщо під час руху виявлено перекриття ребра:

оновити вагу $w_e \rightarrow \infty$

повторити розрахунок маршруту з поточної вершини

Адаптація маршруту в реальному часі:

- кожні NN секунд система отримує оновлені GPS- або трафік-дані;
- переоцінює ваги найближчих ребер;
- у разі перевищення допустимого порогу затримки – виконує *replanning* (повторне планування маршруту).

Симуляційне моделювання виконувалося з використанням SUMO (Simulation of Urban Mobility) на основі реальних карт міст України, імпортованих з OpenStreetMap. Було змодельовано понад 500 сценаріїв руху для служб реагування у різних умовах.

Програмний прототип алгоритму реалізовано у вигляді модуля, що інтегрується із диспетчерськими системами та працює у зв'язці із симулятором трафіку. Проведено серію експериментів, де порівнювалися класичні алгоритми маршрутизації з адаптивним.

Скорочення часу реагування склало від 1,0 до 2,4 хвилин у середньому. У 83% випадків маршрут, обраний адаптивним алгоритмом, не потребував корекції навіть при зміні умов.

Також була протестована інтеграція з прототипом диспетчерської системи, яка дозволяла у реальному часі візуалізувати маршрут і час прибуття.

Отримані результати підтверджують ефективність адаптивного алгоритму у порівнянні з класичними підходами. Зниження часу реагування на 12–27% є суттєвим показником, особливо в умовах, коли кожна хвилина може мати вирішальне значення для порятунку життя чи мінімізації шкоди. Запропонована методика виявилась ефективною як у міських умовах із високим трафіком, так і в умовах сільської місцевості з обмеженим вибором маршрутів.

Таблиця 1

Середній час прибуття в різних підходах (в хвилинах)

Алгоритм	Час (середній)	Відхилення (%)
Дейкстра	9,8	+ 21
A*	9,1	+ 12
Floyd-Warshall	10,5	+ 32
Запропонований	8,1	0

Джерело: сформовано авторами на основі [1; 4; 7]

Завдяки динамічній зміні ваг графа в режимі реального часу, система здатна оперативно адаптуватися до аварій, заторів та перекриттів. Переваги розробленого підходу:

- висока швидкість розрахунку маршрутів навіть при великій кількості вершин (до 5000);
- стійкість до змін у дорожній ситуації;
- сумісність з сучасними геоінформаційними системами;
- можливість використання у вже існуючих диспетчерських центрах.

Обмеження:

- необхідність наявності надійних джерел даних про стан дорожньої мережі;
- неповне врахування людського фактора (наприклад, поведінка інших учасників руху);
- потреба у регулярному оновленні бази даних маршрутів.

Для перевірки масштабованості та стабільності роботи алгоритму проведено тестування на картах міст різного розміру та щільності забудови: умовно мале (100 тис. жителів), середнє (300 тис.) і велике (понад 500 тис.). При збільшенні кількості вершин графа з 1000 до 5000 час обчислення маршруту залишався в межах 1,2–2,3 с, що є допустимим у реальному часі.

Було також проведено серію симуляцій у сільських районах з мінімальною кількістю альтернативних маршрутів. У таких умовах алгоритм демонстрував менший приріст ефективності (приблизно 8–12%), але зберігав стабільну роботу та адаптацію до змін. Запропоноване рішення також протестовано для: швидкої медичної допомоги – з врахуванням типу виклику; ДСНС – з пріоритетами для пожеж, обвалів, затоплень; поліції – у випадках термінового затримання або охорони об'єктів; газових та електроаварійних служб – у разі обривів мереж або загрози вибухів.

Висновки. У межах даного дослідження було розроблено і протестовано адаптивний алгоритм маршрутизації для служб екстреного реагування. Результати показали зменшення середнього часу реагування на 12–27% порівняно з традиційними методами (алгоритми Дейкстри та A*), що підтверджує ефективність запропонованого підходу. Практична цінність роботи полягає у можливості інтеграції алгоритмів у системи диспетчеризації служб 101/112, а також у масштабованості рішення для різних міст і регіонів України.

Запропонований підхід дозволяє враховувати динамічні зміни дорожньої ситуації, забезпечує зменшення часу реагування на надзвичайні події і демонструє хорошу масштабованість. Наукова новизна полягає в поєднанні класичних евристичних методів (Dijkstra, A*) з динамічним переобрахунком ваг графа та процедурою replanning. Практична цінність – у можливості впровадження в системи диспетчеризації служб 101/112 або міських геоінформаційних платформ. Напрями подальших досліджень:

- розширення алгоритму з урахуванням погодних умов, часу доби, сезонності;
- інтеграція з розумними транспортними системами SmartCity;
- створення повноцінного веб-інтерфейсу для оперативного доступу диспетчерів;
- тестування у реальних умовах спільно з обласними та міськими підрозділами служб.

Список використаних джерел:

1. Hojat B., Ilbeigi M. Adaptive Emergency Evacuation Routing: A Graph-Based Approach. Tongji University Press / Elsevier, 2024, 292 p.
2. Lakhno V. A., Kasatkin D. Y., Skliarenko O. V., Kolodinska Y. O. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, Vol. 269, pp. 9–22. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-7996-4_2
3. Li X., Shahidehpour M. Urban emergency routing and traffic resilience with real-time data. *IEEE Transactions on Smart Transportation Systems*. 2021. Vol. 2, No. 3. P. 214–225.
4. Mahmoud K., Taha M. Dynamic route optimization for emergency vehicle dispatch using real-time traffic data. *Egyptian Informatics Journal*. 2022. Vol. 23, No. 1. P. 27–35.
5. Shiri D., Akbari V., Salman F. S. Online algorithms for ambulance routing in disaster response with time-varying victim conditions. *OR Spectrum*. 2024. Vol. 46, pp. 785–819. doi:10.1007/s00291-024-00744-4

6. Talaat F. M., Gamel S. A. Smart navigation system for emergency vehicles (SNSEV): utilizing fog and cloud computing technology for real-time traffic management. *Neural Computing and Applications*. 2025. Vol. 37, pp. 15547–15571.
7. Taylor & Francis Group, Evolutionary Optimization Algorithms. Chichester, UK: Taylor & Francis Group, 2021.
8. Toth P., Vigo D. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. SIAM, 2024 (updated edition), 527 p.
9. Trisolvena M. N., Wattimena F. Y., Untajana P. P. Logistics Efficiency in Product Distribution with Genetic Algorithms for Optimal Routes. *International Journal of Software Engineering and Computer Science (IJSECS)*, 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 247–262. Accessed on: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://journal.lembagakita.org/index.php/ijsecs/article/view/2045>
10. Zverovich V. Modern Applications of Graph Theory. Oxford University Press, 2021, 368 p.

Дата надходження статті: 18.06.2025

Дата прийняття статті: 25.06.2025

Опубліковано: 23.09.2025