

МОДЕЛЬ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ЕВАКУАЦІЙНОГО МАРШРУТУ НА БАЗІ НЕЧІТКОГО АЛГОРИТМУ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ

О. С. Тимчук, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: oleh.tymchuk@knu.us

Е. Р. Мідоян, студент магістратури

E-mail: ernestmidoyan1@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Анотація. Побудова евакуаційних маршрутів з міських районів стала актуальною задачею в сучасному світі, оскільки постійно зростає кількість надзвичайних ситуацій. Стандартні алгоритми планування маршрутів не відповідають вимогам швидкої та ефективної евакуації, оскільки в повній мірі не враховують параметри середовища та мають високу обчислювальну складність, а помилкові результати можуть мати критичні наслідки, включаючи втрату життя. У роботі запропоновано модель пошуку оптимального маршруту евакуації в надзвичайних ситуаціях на міських ділянках на базі модифікованого алгоритму мурашиної колонії: мурахі (особи або транспортного засобу) дозволяється розпочати рух не з однієї, а з декількох можливих вершин графу, а також закінчити маршрут в декількох доступних вершинах. Це враховує той факт, що зазвичай існує декілька місць початку евакуації та пунктів призначення. Матриця переходів будується з урахуванням додаткових параметрів, невизначеність яких враховується за допомогою методів обчислень зі словами і теорії нечітких множин і систем другого типу. Для моделювання в роботі було враховано такі додаткові параметри, як якість дорожнього покриття, кількість смуг дороги, рівень заторів, відстань до епіцентру надзвичайної події. Запропонована модель була реалізована та застосована на одному з мікрорайонів міста Києва.

Ключові слова: маршрут, евакуація, надзвичайна ситуація, нечітка множина другого типу, обчислення зі словами, мурашиний алгоритм

Актуальність. У 2022 році було зафіксовано 387 природних небезпек та катастроф у світі, що призвело до гибелі 30 704 людей. Цей показник у три рази більше показника попереднього 2021 року згідно зі звітом Emergency Event Database [1]. У 2023 році в Туреччині та Сирії підтверджено біля 60 000 жертв тільки під час одного землетрусу [2]. Прогнозується, що кількість природних катастроф у наступні 50 років збільшиться в понад п'ять разів [3]. Під час надзвичайних ситуацій основною задачею є ефективна організація процесу евакуації, що допоможе

радикально зменшити та запобігти летальних випадків. Ключовим аспектом під час евакуації є вибір безпечних та швидких маршрутів для знаходження укриття або покидання зони ураження. Традиційні методи базуються в основному на знаходженні шляху, що забезпечує найкоротший час, або географічній близькості, що не завжди дає оптимальний результат. Нині дослідники дотримуються думки, що під час зовнішньої екстреної евакуації при побудові маршруту необхідно враховувати інші показники, оскільки поведінка людей сильно відрізняється від повсякденної. Наприклад, евакуйовані доволі часто покладаються на особисті знайомі маршрути або власний досвід, а не на задокументовані місцевою владою чи ЗМІ матеріали. Такі показники мають значний рівень невизначеності, який також необхідно враховувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема знаходження оптимального шляху евакуації під час надзвичайних ситуацій широко досліджується в науковому середовищі. Так, у роботі [4] пропонується використання апарату нечіткої логіки для моделювання психологічних факторів людської поведінки під час вибору маршруту евакуації; зроблено поділ на панічних та раціональних водіїв, виділено по два фактори нечіткості для кожної категорії. У [5] автори задіяли нечіткий контролер типу Takagi-Sugeno на основі ширини, довжини та наповненості шляху. У [6] знайдено оптимальні шляхи евакуації місцевості, враховуючи ширину та довжину доріг. Зазначені параметри вважаються недостатніми, автори враховують тільки кількісні характеристики дорожнього полотна, оминаючи його якісні характеристики та фактори, що створені надзвичайними ситуаціями. Для знаходження найкоротшого шляху автори використовують алгоритм Dijkstra, який має певні недоліки: необхідність шукати найкоротші відстані до кожної вершини; здійснення сліпого пошуку, який характеризується високою обчислювальною складністю.

Незважаючи на наявність великої кількості публікацій, присвячених досліджуваному питанню, все ще залишаються відкритими такі питання:

- виявлення та врахування більшої кількості показників, які впливають на формування маршруту евакуації;

- врахування в достатній мірі невизначеності, яка притаманна цим показникам;
- формування маршруту евакуації за прийнятний час.

Мета дослідження – розробити модель визначення оптимального маршруту евакуації під час надзвичайних ситуацій. Невизначеність показників, що впливають на формування маршруту, враховувати за допомогою методів теорії дискретних інтервальних нечітких множин другого типу (DIT2FSs) [7], а для зменшення обчислювальної складності використовувати алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ACO) [8].

Матеріали і методи дослідження. У цій роботі моделювання певної міської ділянки здійснюється на орієнтованому зваженому графі $G(V, A)$, де безліч вершин графа $V = \{1..n\}$ відповідає перехрестям, а безліч ребер між вершинами $A = \{(i, j): i, j \in V\}$ - шляхам сполучення між цими перехрестями. З A асоціюється матриця $D = \|d_{ij}\|$, де d_{ij} є вартістю переходу з i -ї вершини в j -ю. Якщо $d_{ij} = 0$, то між перехрестями проїзд відсутній. Під вартістю зазвичай розуміють відстань, час або вартість поїздки між перехрестями i та j .

Традиційно мурашиний алгоритм формулюється через задачу комівояжера (TSP), яка полягає у пошуку найвигіднішого маршруту, що проходить через вершини графу рівно один раз. Сформулюємо задачу пошуку оптимального маршруту евакуації під час надзвичайних ситуацій в термінах ACO та TSP:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ijk} \rightarrow \min, k = \overline{1, m}, \quad (1)$$
$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in \text{маршруту } k \text{ - го комівояжера} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \forall (i, j) \in A, k \in M,$$
$$x_{ij}^{start} \in S, S \in V,$$
$$x_{ij}^{end} \in E, E \in V,$$

де x_{ijk} – бінарна ознака включення переходу (i, j) в маршрут k -го комівояжера, m – кількість комівояжерів, S – множина стартових точок евакуації, E – множина кінцевих точок евакуації.

У роботі вартість переходу з i -ї вершини в j -ю d_{ij} розраховується на базі апарату обчислень зі словами, запропонований Jerry M. Mendel [7], а лінгвістична невизначеність параметрів враховується за допомогою методів теорії DIT2FSs.

$$d_{ij} = W_{ij} \circ R_{ij}, \quad (2)$$

де W_{ij} – набір гранульованих термів, які описують параметри, що впливають на вартість d_{ij} . R_{ij} – відношення, яке описує нечіткі відносини між W_{ij}, \circ – композиційне правило виведення Заде (MAX MIN).

Кожен параметр описується одним термом із певного словника V (codebook). Гранульований терм в свою чергу подається у вигляді слова і DIT2FS.

$$V = \langle v_j \rangle, j \in \{1, \dots, m\}, \quad (3)$$

$$v_j = \langle T_j, \tilde{Y}_j \rangle,$$

де v_j – гранульований терм, T_j – слово, \tilde{Y}_j – DIT2FS, що описує слово.

В даній роботі для моделювання маршруту було використано 4 параметри

$$W_{ij} = (w_1, w_2, w_3, w_4), \quad (4)$$

де w_1 – якість дорожнього покриття на певній ділянці дороги, словник складається з 4 слів: «bad», «fair», «good», «perfect». w_2 – кількість смуг дороги, що доступні для руху, словник складається з 4 слів: «tiny», «small», «medium», «high»; w_3 – рівень заторів на ділянці дороги, словник складається з 4 слів: «unblocked», «mild», «moderate», «serious»; w_4 – відстань до епіцентру надзвичайної події, словник складається з 4 слів «close», «moderate», «far», «too far».

Відповідні DIT2FSs, що описують слова із словників, приведено на рис. 1.

Для отримання результату у числовому вигляді потрібно здійснити зниження типу $\tilde{Y}(t)$ і дефазифікацію. Для зниження типу може бути виконано за допомогою алгоритму ЕКМ для DIT2FS, а дефазифікація – за допомогою методу центра ваги.

Результати досліджень та їх обговорення. Запропонована модель була реалізована та застосована на одному з районів міста Києва. Мережа доріг є орієнтованим графом та включає в себе 34 вершини та 83 ребра (рис. 2). Червоним кольором позначені стартові точки евакуації – 23, 27, 30. Зеленим кольором позначені кінцеві точки евакуації – 10, 19. Нечіткі фактори генерувалися

випадковим чином у межах відповідних універсальних змінних, окрім відстані до епіцентру надзвичайної ситуації, що обчислювалася як відстань між двома точками на поверхні Землі (таблиця).

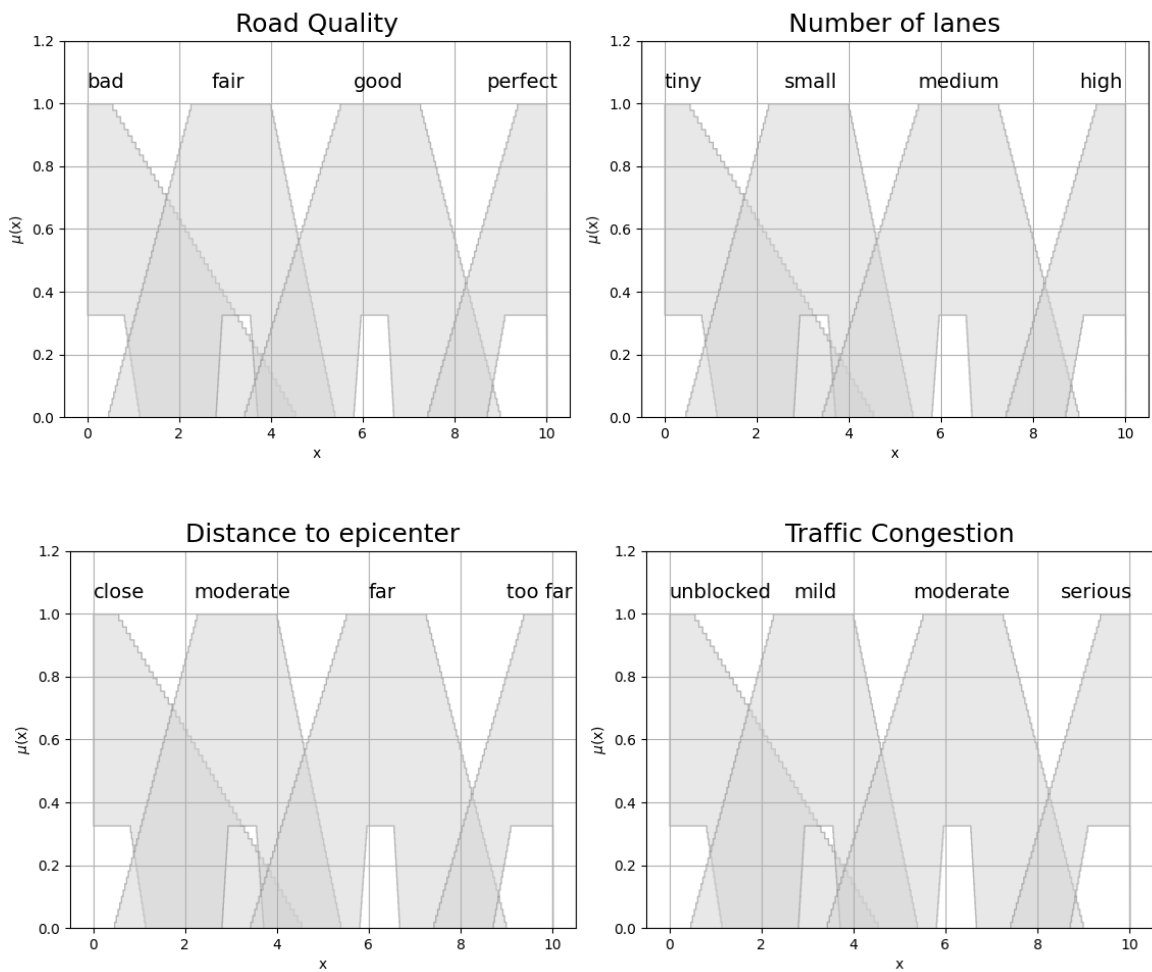


Рис. 1. DIT2FSs відповідних словників з кортежу W

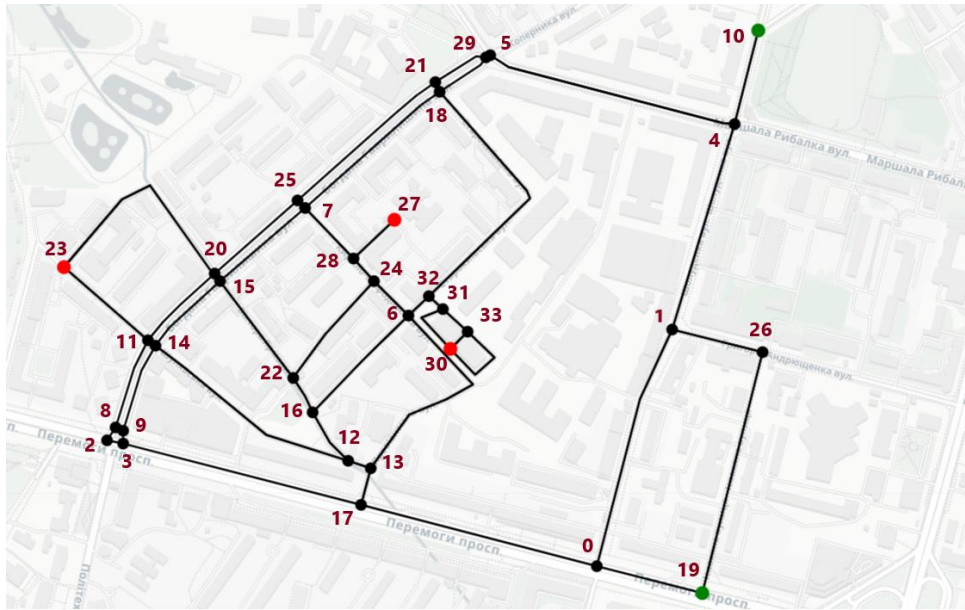


Рис. 2. Мережа доріг для моделювання

Фрагмент вхідних даних для моделювання маршруту евакуації

$(i, j), x_{ij} \neq 0$	Фактична довжина ділянки	Відстань до епіцентру надзвичайної ситуації	α
(0, 1)	352.31	458.33	.44
(1, 4)	302.3	419.73	.46
(4, 5)	360.09	196.18	.50
(15, 22)	172.06	645.30	.62
(22, 24)	178.68	495.02	.67

Алгоритм оптимізації мурашиної колонії виконувався за такими параметрами: start_position = 27; end_position = 19; $\alpha = 0.3$; $\beta = 2.5$; $\rho = 0$; $m = 500$.

У результаті моделювання були отримані задовільні результати (візуально на рис. 3 відображено маршрут евакуації). Отриманий маршрут евакуації складається з 10 вершин (27-28-7-18-29-5-4-1-26-19) і має фактичну довжину 1664.85 одиниць та ефективну довжину 821.20 одиниць, після 30 прогонів - середній час виконання алгоритму оптимізації мурашиної колонії - 0.20 с, середній час обчислення вагових коефіцієнтів для 83 ребер графу за допомогою нечіткої логічної системи другого типу – 1.89 с, даний маршрут обирався мурахами 400 разів із 500.



Рис. 3. Розрахований маршрут евакуації

Висновки і перспективи. Використання методів обчислень зі словами теорії нечітких множин і систем другого типу, а також ройового інтелекту при визначення оптимального маршруту евакуації під час надзвичайних ситуацій дозволяє врахувати невизначеність параметрів, які враховуються під час формування маршруту, а також значно зменшити обчислювальну складність алгоритму.

Відкритим залишається питання підвищення ефективності моделі шляхом використання більшої кількості нечітких факторів, таких як психологічні особливості людей, що евакуюються, параметри довколишнього середовища тощо. Також доцільно дослідити можливість розробки універсального нечіткого контролеру на базі представленої моделі, модифікуючи набір вхідних змінних, в залежності від типу надзвичайної ситуації та здійснити його тестування із симуляцією евакуації у реальному часі на основі часових рядів з динамічною кількістю та притоком/відтоком людей.

Список використаних джерел

1. CRED. 2022 Disasters in numbers. Brussels: CRED; 2023. URL: https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf
2. 2023 Turkey–Syria earthquake. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2023_Turkey–Syria_earthquake (дата звернення 05.05.2023).
3. Lee H. L., Lee C. Building Supply Chain Excellence in Emerging Economies. Springer Science & Business Media. 2007. P. 93-111.
4. Chen S., Fu H., Qiao Y. and Wu N. Route Choice Behavior Modeling for Emergency Evacuation and Efficiency Analysis Based on Type-II Fuzzy Theory. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, No. 7. P. 6934-6949.
5. Ivanciu L.-N., Oltean G. Crowd evacuation using multi-objective optimization and Takagi-Sugeno fuzzy logic system. *Acta Technica Napocensis*. 2017. Vol. 58, No. 1. P. 12.
6. Afandi N., Mayasari Z. An Evacuation Route In Bengkulu City Based On Fuzzy Dijkstra Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1863, No. 1, P. 012007.
7. Liu, F., Mendel, J. M. (2008). Encoding Words Into Interval Type-2 Fuzzy Sets Using an Interval Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(6), 1503–1521. doi:10.1109/tfuzz.2008.2005002.
8. Dorigo M., Gambardella L. M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 1997. Vol. 1, No. 1. P. 53-66.

References

1. CRED. 2022 Disasters in numbers. Available at: https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf.
2. 2023 Turkey–Syria earthquake. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/2023_Turkey–Syria_earthquake.
3. Lee, H. L., Lee, C. (2007). Building Supply Chain Excellence in Emerging Economies. Springer Science & Business Media.
4. Chen, S., Fu, H., Qiao, Y., Wu, N. (2021). Route Choice Behavior Modeling for Emergency Evacuation and Efficiency Analysis Based on Type-II Fuzzy Theory. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6934–6949. doi:10.1109/tits.2021.3064085.
5. Ivanciu, L.-N., Oltean, G. (2017). Crowd evacuation using multi-objective optimization and Takagi-Sugeno fuzzy logic system. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS*, 58(1). http://users.utcluj.ro/~ATN/papers/ATN_1_2017_3.pdf.
6. Afandi, N., Mayasari, Z. M. (2021). An Evacuation Route In Bengkulu City Based On Fuzzy Dijkstra Algorithm. *Journal of Physics*, 1863(1), 012007. doi:10.1088/1742-6596/1863/1/012007.
7. Liu, F., Mendel, J. M. (2008). Encoding Words Into Interval Type-2 Fuzzy Sets Using an Interval Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(6), 1503–1521. doi:10.1109/tfuzz.2008.2005002.

8. Dorigo, M., Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53–66. doi:10.1109/4235.585892.

EVACUATION ROUTE PLANNING MODEL BASED ON THE FUZZY ANT COLONY OPTIMIZATION ALGORITHM

O. Tymchuk, E. Midoian

Abstract. *The construction of evacuation routes from urban areas has become an urgent task in the modern world, as the number of emergencies is constantly increasing. Standard route planning algorithms do not meet the requirements of fast and efficient evacuation because they do not fully consider the environmental parameters and have a high computational complexity, and erroneous results can have critical consequences, including loss of life. The paper proposes a model of finding an optimal evacuation route in emergencies in urban areas based on a modified ant colony optimization algorithm: an ant (a person or a vehicle) is allowed to start moving from several possible vertices of the graph, as well as to end the route at several available vertices. It is connected with the fact that there are usually multiple evacuation start points and destinations. The transitions matrix is built using additional parameters, the uncertainty of which is taken into account using the methods of computing with words and the theory of type-2 fuzzy sets and systems. For modeling, in the paper such additional parameters as the quality of the road surface, the number of road lanes, the level of traffic jams, and the distance to the epicenter of the emergency were used. The proposed model was implemented and applied in one of the quarter of Kyiv.*

Key words: *route, evacuation, emergency, type-2 fuzzy set, computing with words, ant colony optimization algorithm*