

УДК 004.8:656.2:614.8

О. І. Башинський, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-0243-7519)

М. З. Пелешко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-9315-1590)

А. В. Беседа, н.с. відділу (ORCID 0009-0004-6252-1431)

Р. Р. Кецмур, здобувач вищої освіти (ORCID 0009-0000-5602-8000)

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

АДАПТИВНА МАРШРУТИЗАЦІЯ ЕВАКУАЦІЇ ПАСАЖИРІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Досліджено підходи до моделювання евакуації людей із метрополітену в умовах комбінованих надзвичайних ситуацій та продемонстровано приклад застосування підтримки штучного інтелекту для вибору маршруту евакуації. Актуальність теми зумовлена тим, що метрополітен поєднує високу щільність пасажиропотоку, замкнений підземний простір і залежність від вузьких елементів евакуаційної інфраструктури. Для України ця проблема набуває додаткового значення, оскільки станції метро використовуються не лише як транспортні об'єкти, а і як укриття під час воєнних загроз. Метою дослідження є узагальнення сучасних підходів до моделювання евакуації пасажирів метро в умовах комбінованих надзвичайних ситуацій та демонстрація сценарію, у якому підхід штучного інтелекту до вибору маршруту порівнюється зі статичною схемою евакуації. Методично дослідження поєднує аналіз наукових праць із демонстраційним графовим моделюванням у середовищі Google Colab засобами Python. Станцію метрополітену подано як зважений граф, у якому для кожної ділянки задано довжину, умовний індекс небезпеки та пропускну здатність. Реалізовано два сценарії: евакуацію без штучного інтелекту, де маршрут визначався за найменшою довжиною шляху, і сценарій з підтримкою штучним інтелектом, де вибір маршруту здійснювався з урахуванням ризику та поточного навантаження на ділянки. У результаті встановлено, що за статичної схеми пасажиропотік концентрується на коротшому, але ризикованішому маршруті, тоді як адаптивний підхід дає змогу перенаправити рух в обхід небезпечної зони. У сценарії з підтримкою штучного інтелекту середній індекс ризику зменшився з 9,0 до 1,2, кількість пасажирів у ризиковій зоні скоротилася з 60 до 0, а коефіцієнт перевантаження критичної ділянки знизився з 5,0 до 2,4. Водночас середня довжина маршруту зросла з 3,0 до 4,4. Зроблено висновок, що навіть спрощене підтримане штучним інтелектом моделювання виявляє переваги адаптивної маршрутизації в умовах комбінованих загроз у метрополітені.

Ключові слова: метрополітен, евакуація, надзвичайна ситуація, маршрутизація, штучний інтелект, графове моделювання, пасажиропотік

1. Вступ

Метрополітен належить до об'єктів транспортної інфраструктури з підвищеним рівнем ризику під час надзвичайних ситуацій (НС), оскільки поєднує високу щільність пасажиропотоку, замкнений підземний простір, обмежені можливості швидкого розосередження людей та критичну залежність від вузьких евакуаційних елементів, насамперед сходів, переходів і виходів. За таких умов навіть локальна пожежа або задимлення можуть призводити до різкого погіршення видимості, зниження швидкості руху пасажирів, скупчення людей у вузлах злиття потоків і, як наслідок, до зростання ризику масових втрат. Тому проблема безпечної евакуації набуває особливої актуальності для інженерного проектування та розробки адаптивних підходів до керування пасажиропотоком в умовах динамічної небезпеки.

Особливу складність становлять комбіновані надзвичайні ситуації, коли одночасно діють кілька несприятливих чинників, наприклад пожежа, задимлення, блокування окремих виходів або відмова частини інфраструктури. Тож, орієнтація лише на найкоротший шлях евакуації не гарантує безпеки, оскільки геометрично коротший маршрут може проходити через небезпечну зону або швидко втра-

чати придатність через зміну пожежної обстановки; що зумовлює потребу в дослідженні підходів, які дозволяють враховувати не лише довжину маршруту, а й ризик середовища, поточне навантаження на евакуаційні шляхи та зміну доступності виходів. У даному контексті перспективним є використання підтримки технологій штучного інтелекту (англ. Artificial Intelligence, AI) для вибору маршруту евакуації.

Це зумовлює потребу в підходах, які дозволяють враховувати не лише довжину маршруту, а й ризик середовища, поточне навантаження на евакуаційні шляхи та зміну доступності виходів. Отже, актуальність дослідження полягає в необхідності розроблення та апробації простих відтворюваних моделей, здатних демонструвати переваги адаптивної маршрутизації пасажиропотоку в метрополітені при комбінованих НС.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження евакуації пасажирів метрополітену, яке здійснили Т. Мандал, К. Р. Рао та Г. Тіварі [1], наведено узагальнення підходів до евакуації метро, де охоплено симуляційні моделі, поведінкові дослідження, VR-експерименти та аналіз інфраструктурних вузьких місць. Цінність цієї праці полягає у систематизації напрямку, однак вона не пропонує прикладної схеми порівняння статичної та адаптивної маршрутизації для конкретного комбінованого сценарію. У дослідженні Дж. Цінь, К. Лю та К. Хуан [2] на основі Pathfinder показано, що критичне перевантаження під час евакуації формується біля входів на сходи, але розглянуто переважно пожежний сценарій без урахування алгоритмічного перерозподілу потоку. Натомість Н. Чжан, Ю. Лян, К. Чжоу, М. Нью та Ф. Ван [3], поєднавши BIM із моделюванням диму та безпечної евакуації, переконливо довели важливість конфігурації станції та параметрів середовища, однак запропонований підхід орієнтований на повномасштабне інженерне моделювання, що ускладнює його використання у спрощених прикладних дослідженнях.

Подальший розвиток проблематики пов'язаний з інтелектуалізованою маршрутизацією. У праці С. Цуо [4] запропоновано алгоритм Dynamic Avoid Smoke A-Star, у якому під час вибору шляху враховуються температура, видимість і концентрація CO, проте модель потребує детального опису пожежного середовища. Близький за логікою підхід запропонували П. Хуан [5], реалізували підхід на основі SARSA (англ. «state – action – reward – state – action»), орієнтований на реагування в реальному часі, але його застосування передбачає складнішу процедуру налаштування та навчання. В українському науковому дискурсі С. В. Бункус, О. Огнєва [6], А. Губенко [7], Н. Б. Мітіна [8], С. О. Попко [9], С. П. Потеряйко [10–11] та інші висвітлюють питання планування евакуації, безпеки в умовах воєнного стану, моделювання ризиків і можливостей використання штучного інтелекту для попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій у метрополітені. Водночас проблема адаптивного вибору маршруту саме для метрополітену при комбінованих загрозах залишається розкритою фрагментарно.

Отже, невирішеною частиною проблеми є відсутність простої відтворюваної моделі, яка давала б змогу в межах одного демонстраційного сценарію порівняти статичну схему евакуації з адаптивним вибором маршруту із використанням підтримки штучного інтелекту в умовах одночасної дії кількох небезпечних чинників. Саме на вирішення цієї частини проблеми спрямовано дане дослідження.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є обґрунтування доцільності використання адаптивної маршрутизації евакуації пасажирів метрополітену в умовах комбінованих надзвичайних ситуацій на основі порівняння статичного та адаптивного сценаріїв руху пасажиропотоку. В межах обраної мети було сформовано низку завдань дослідження:

- дослідити сучасні наукові підходи до моделювання евакуації пасажирів метрополітену та чинники ризику, що впливають на безпечність евакуації в підземних транспортних спорудах;
- систематизувати базові сценарії евакуації пасажирів метрополітену в умовах одиничних і комбінованих загроз;
- розробити демонстраційну графову модель станції метрополітену та порівняти статичний і адаптивний сценарії маршрутизації пасажиропотоку.

4. Матеріали і методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес евакуації пасажирів метрополітену в умовах комбінованої надзвичайної ситуації. Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що адаптивний вибір маршруту з урахуванням ризику та перевантаження забезпечує безпечнішу евакуацію, ніж орієнтація лише на найкоротший шлях.

Предметом дослідження є методичні засади графового моделювання та адаптивного вибору маршруту евакуації пасажирів метрополітену з урахуванням довжини шляху, умовного індексу небезпеки та поточного навантаження на ділянки евакуаційної інфраструктури.

У дослідженні прийнято такі припущення та спрощення: станцію подано у вигляді спрощеного графа; вплив пожежі та задимлення репрезентовано умовним індексом небезпеки; усі пасажирів стартують із платформи; часову динаміку пожежі та мікросимуляцію натовпу не відтворювали.

Для проведення дослідження було використано спрощене графове моделювання евакуації пасажирів метрополітену в середовищі Google Colab засобами мови Python. У кодї було використано бібліотеки NetworkX для побудови графа станції та розрахунку маршрутів, Matplotlib для графічної візуалізації сценаріїв і Pandas для формування підсумкової таблиці результатів.

Станцію метрополітену подано у вигляді зваженого графа, в якому вузли відповідали ключовим точкам переміщення пасажирів: платформа (P), сходові марші (S1, S2), вестибюль (V) та виходи (E1, E2). Ребра графа відображали можливі шляхи руху між цими точками. Для кожного ребра було задано довжину ділянки (distance), умовний індекс небезпеки (risk) та пропускну здатність маршруту (capacity); що дозволило включити, крім довжини шляху, вплив небезпечних умов та потенційного скупчення пасажирів.

У межах дослідження було реалізовано (1) сценарій, який умовно позначено як статичний сценарій евакуації, де маршрут для пасажирів визначався за критерієм найменшої довжини шляху, тобто без урахування ризику та перевантаження ділянок; та (2) адаптивний сценарій із використанням підтримки штучного інтелекту, у якому маршрут обчислювався за інтегральною функцією вартості:

$$\text{Cost} = \text{distance} + \alpha \cdot \text{risk} + \beta \cdot \text{congestion}; \quad (1)$$

де distance – довжина ділянки; risk – умовний індекс небезпеки; congestion – від-

ношення поточного навантаження на ділянку до її пропускнуої здатності; α і β – вагові коефіцієнти впливу ризику та перевантаження, які становлять 2,2 та 0,5 відповідно.

Запропонована методика має демонстраційний характер і не претендує на повномасштабне інженерне відтворення пожежної динаміки чи мікросимуляцію натовпу. Водночас вона є достатньою для прикладної наукової статті, оскільки дозволяє формалізувати комбіновану надзвичайну ситуацію, показати відмінність між статичною та адаптивною маршрутизацією й обґрунтувати доцільність використання адаптивної маршрутизації для вибору безпечнішого шляху евакуації.

5. Результати моделювання евакуації пасажирів

5.1. Узагальнення чинників ризику евакуації

Наразі моделювання евакуації людей із метрополітену розвивається переважно у трьох взаємопов'язаних напрямках [3], а саме: (1) дослідження поширення пожежі та диму в підземних транспортних спорудах; (2) імітаційне моделювання руху пасажиропотоку під час надзвичайної ситуації; а також (3) розробка інтелектуальних алгоритмів вибору маршруту евакуації. Крім того, сучасні дослідження метро-евакуації в умовах переходу від суто статичних схем до динамічних моделей реагування наголошують на перспективності використання симуляційних підходів, проведення VR-експериментів, включення поведінкових аспектів та необхідності аналізу інфраструктурних вузьких місць [1].

Для підземних станцій метрополітену ключовими факторами небезпеки є не тільки сам факт загоряння, а насамперед поширення диму, зниження видимості, накопичення CO₂, зміна швидкості руху натовпу та перевантаження окремих елементів евакуаційної інфраструктури. Зокрема, такі фактори як температура, видимість і концентрація CO₂ прямо впливають на еквівалентну довжину маршруту та повинні враховуватися під час пошуку безпечної траєкторії. Водночас оцінка безпечної евакуації має спиратися на аналіз характеристик пожежі, будівлі та людей, а також на зіставлення параметрів диму, токсичних газів і температури з критеріями безпечності середовища [4]. І, крім того, критичні перевантаження в метро виникають не обов'язково на фінальному виході назовні, а часто на підходах до сходів, ескалаторів і в місцях злиття потоків [9]. У низці емпіричних досліджень спеціальної станції метро показано, що головний тиск евакуації формується саме біля входів на сходи, тоді як збільшення ширини виходу не завжди істотно послаблює перевантаження [2].

5.2. Систематизація сценаріїв евакуації пасажирів

В українському контексті проблема безпечної евакуації з метрополітену має додатковий вимір, оскільки підземні станції фактично виконують не лише транспортну, а й захисну функцію. Це узгоджується із Кодексом цивільного захисту України [12], який передбачає використання споруд подвійного призначення для тимчасового перебування людей у разі небезпеки під час НС і воєнних дій, а також із вимогою забезпечення цілодобового та безперешкодного доступу до таких об'єктів. У практиці столиці цей підхід реалізується через використання станцій київського метрополітену як укриттів під час повітряних тривог. Тому було встановлено основні сценарії метро-евакуації, що наведено у табл. 1.

Табл. 1. Основні сценарії евакуації пасажирів метрополітену

Сценарій	Умови	Очікувана поведінка потоку	Ризики
Базовий	Небезпечні чинники відсутні, всі виходи доступні	Пасажири рухаються до найближчого виходу	Статична схема є достатньою
Пожежа	Осередок загоряння на платформі, без блокування виходів	Частина пасажирів змінює маршрут із запізненням	Зростає роль диму та видимості
Комбінована ситуація зі статичною маршрутизацією	Пожежа, задимлення і блокування одного виходу	Формується скупчення біля звичного маршруту, зростає ризик затору	Статична евакуація втрачає ефективність
Комбінована ситуація з адаптивною маршрутизацією	Ті самі умови, але маршрут обирається за критеріями безпеки та завантаження	Потік перерозподіляється у бік менш небезпечного маршруту	Підвищується узгодженість і безпека евакуації

Джерело: сформовано авторами на основі [1–6].

За таких умов маршрутизація пасажиропотоку має враховувати не лише швидкість виходу людей із небезпечної зони, а й необхідність безпечного розосередження та переміщення людей у просторі, який одночасно функціонує як елемент транспортної інфраструктури і як об'єкт цивільного захисту.

5.3. Моделювання статичного сценарію евакуації

Для метрополітену найбільш доцільно розглядати не одиничну, а комбіновану надзвичайну ситуацію саме через те, що поєднання кількох небезпечних чинників змінює ризик евакуації суттєвіше, ніж проста сума окремих впливів, а різні конфігурації комбінованої події по-різному впливають на евакуаційну спроможність станції. Базовий сценарій евакуації без використання штучного інтелекту, у межах якого пасажиропотік спрямовується за найкоротшим маршрутом «P–S1–V–E1», що наведено на рис. 1.

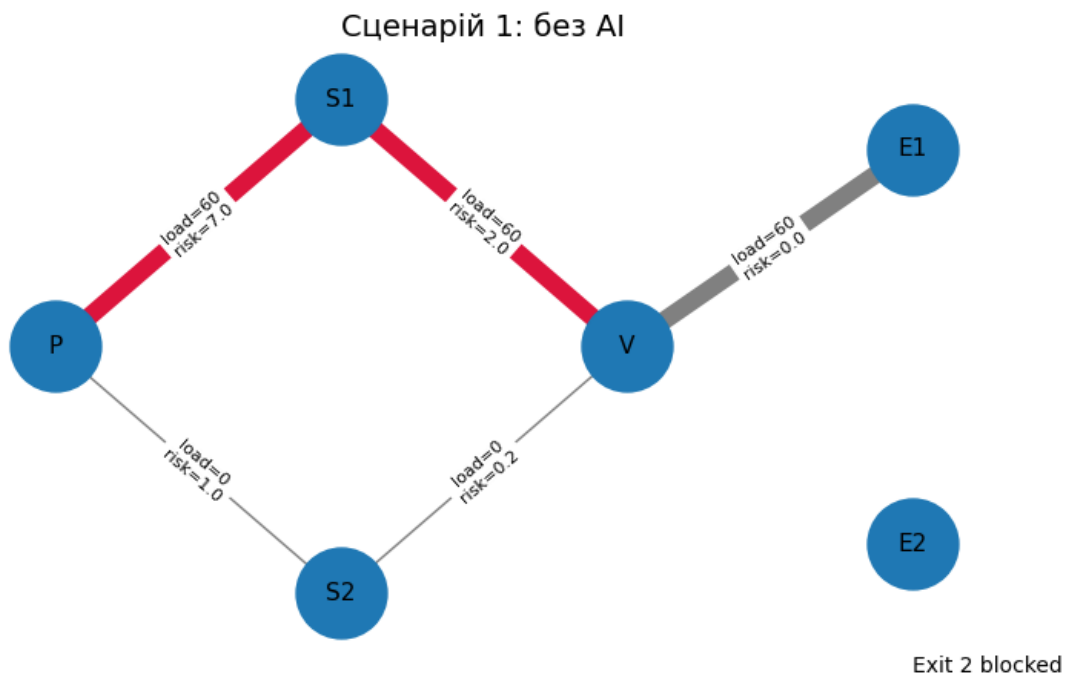


Рис. 1. Сценарій евакуації пасажирів метрополітену при комбінованій надзвичайній ситуації зі статичною маршрутизацією

Саме тому в межах даного дослідження здійснено демонстраційне моделювання евакуації пасажирів метрополітену при комбінованій НС, яке показало суттєву різницю між сценарієм стандартної маршрутизації та сценарієм підтриманого штучним інтелектом вибору шляху.

5.4. Моделювання адаптивного сценарію евакуації

За такого підходу весь потік із 60 пасажирів проходить через ділянку «P–S1», яка в моделі позначена як найбільш ризикована через умовний вплив пожежі та задимлення. Таким чином, спостерігається високе навантаження саме на небезпечний маршрут і формує концентрацію потоку в зоні підвищеного ризику. Візуально це відображено потовщенням і виділенням відповідних ребер графа, що свідчить про домінування одного шляху евакуації та відсутність адаптивного перерозподілу потоку. Натомість на рис. 2 відображено сценарій підтриманої штучним інтелектом евакуації, у межах якого алгоритм обирає маршрут не лише за мінімальною довжиною, а й з урахуванням ризику та поточного навантаження на ділянки графа.

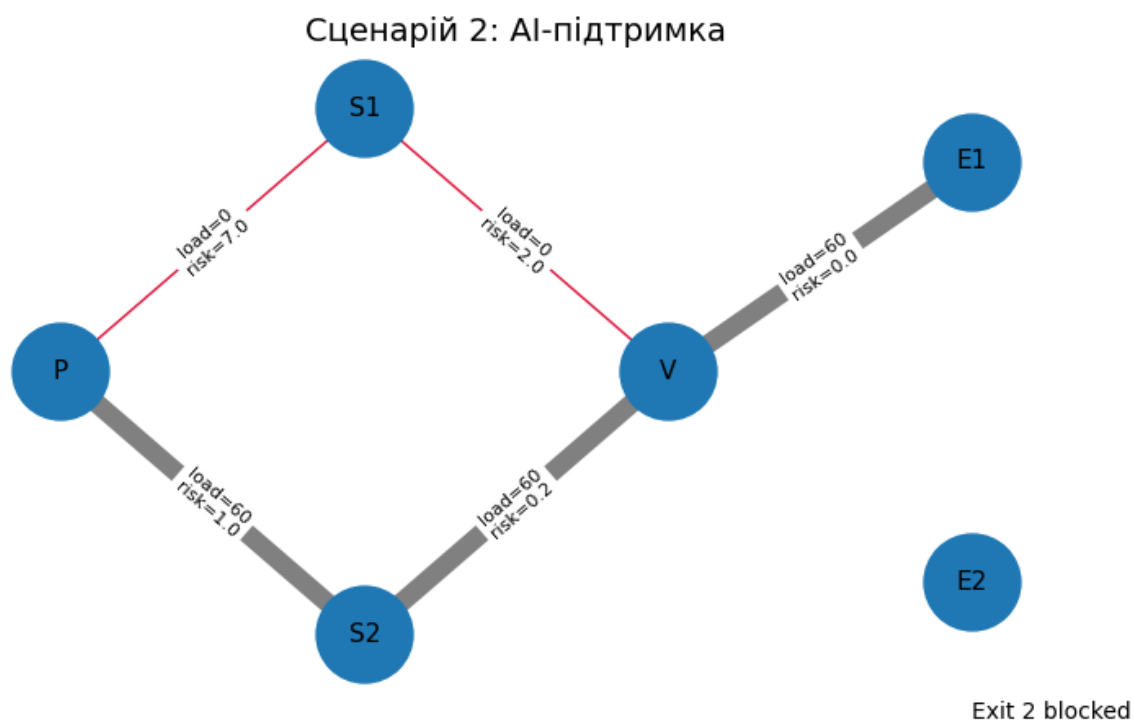


Рис. 2. Сценарій евакуації пасажирів метрополітену при комбінованій надзвичайній ситуації з адаптивною маршрутизацією

У такому випадку домінуючим маршрут виглядає дещо інакше («P–S2–VE1»), тобто пасажиропотік перенаправляється в обхід небезпечної зони. Така зміна траєкторії руху свідчить про адаптивний характер маршрутизації, в межах якого новий шлях може бути довшим, водночас забезпечуючи значно нижчий рівень умовного ризику та зменшує перебування пасажирів у зоні впливу небезпечних факторів. Зі схеми видно, що навантаження переноситься на безпечнішу ділянку «P–S2», тоді як ризикований маршрут через S1 фактично не використовується. Кількісне порівняння двох вищевказаних сценаріїв наведено у табл. 2.

Зважаючи на це, у базовому сценарії середня довжина маршруту становила 3,0, однак середній індекс ризику досягав 9,0, а всі 60 пасажирів проходили через ризикову зону. Найбільш завантаженою ділянкою в цьому випадку була «P–S1»,

для якої коефіцієнт перевантаження становив 5,0. Натомість у сценарії з підтримкою штучного інтелекту середня довжина маршруту зросла до 4,4, що є логічним наслідком вибору обхідного шляху, однак середній індекс ризику зменшився до 1,2, а кількість пасажирів у ризиковій зоні скоротилася до 0. Найбільш завантаженою ділянкою стала «P-S2», проте коефіцієнт її перевантаження був нижчим і становив 2,4.

Табл. 2. Порівняння показників евакуації аналізованих сценаріїв

Сценарій	Домінуючий маршрут	Середня довжина маршруту	Середній індекс ризику	Пасажири в ризиковій зоні	Найбільш завантажена ділянка	Коефіцієнт перевантаження
Комбінована ситуація зі статичною маршрутизацією	P-S1-V-E1	3,0	9,0	60	P-S1	5,0
Комбінована ситуація з адаптивною маршрутизацією	P-S2-V-E1	4,4	1,2	0	P-S2	2,4

Тому вважаємо, що підхід з використанням підтримки штучного інтелекту у запропонованому демонстраційному сценарії не мінімізує довжину маршруту, але забезпечує зниження ризику евакуації, усунення проходження пасажирів через небезпечну зону та зменшення критичного навантаження на ризикові ділянки інфраструктури. Такі висновки підтверджують доцільність використання адаптивної маршрутизації в умовах комбінованих надзвичайних ситуацій, коли вибір найкоротшого шляху не є оптимальним з позиції безпеки.

6. Обговорення результатів моделювання евакуації

Отримані результати закривають ту частину проблеми, яку було визначено раніше, а саме потребу у простій відтворюваній моделі порівняння статичної та адаптивної маршрутизації в умовах комбінованої НС у метрополітені. Запропоноване рішення показало, що навіть за спрощеного графового подання станції можливо виявити принципову різницю між вибором найкоротшого та безпечнішого шляху. Це пояснюється тим, що в моделі одночасно враховано два чинники, критичні для метро-евакуації: умовний ризик ділянки та її поточне навантаження.

Результати моделювання підтвердили, що вибір найкоротшого маршруту не завжди є безпечним у разі комбінованої надзвичайної ситуації. У статичному сценарії пасажиропотік спрямовувався маршрутом «P-S1-V-E1», який мав меншу середню довжину – 3,0 умовні одиниці, але водночас характеризувався високим середнім індексом ризику – 9,0. Усі 60 пасажирів проходили через ризикову зону, а коефіцієнт перевантаження критичної ділянки «P-S1» становив 5,0. Це свідчить про те, що статична схема евакуації забезпечує коротший, але менш безпечний шлях, оскільки не враховує зміну небезпеки середовища та навантаження на окремі ділянки.

Натомість адаптивний сценарій маршрутизації забезпечив перенаправлення пасажиропотоку маршрутом «P-S2-V-E1». Середня довжина маршруту зросла з 3,0 до 4,4 умовних одиниць, тобто адаптивний варіант не скорочував шлях евакуації. Проте основний безпековий ефект полягав у зменшенні середнього індексу ризику з 9,0 до 1,2, скороченні кількості пасажирів у ризиковій зоні з 60 до 0 та зниженні коефіцієнта перевантаження критичної ділянки з 5,0 до 2,4. Отже, отримані чисельні результати показують, що адаптивна маршрутизація є доцільною не

з позиції мінімізації довжини маршруту, а з позиції зменшення ризику та підвищення безпечності руху пасажирів.

У цьому аспекті результати дослідження узгоджуються з оглядом Т. Мандал, К. Р. Рао та Г. Тіварі [1], які показали, що сучасні дослідження метро-евакуації зміщуються від статичних схем до динамічних моделей, поведінкових підходів і алгоритмів підтримки рішень. У нашому випадку це підтверджується тим, що порівняння двох сценаріїв показало принципову різницю між вибором найкоротшого та безпечнішого шляху навіть у спрощеній графовій моделі. Також слід відзначити, що отримані результати узгоджуються з підходом С. Цуо [4], які довели, що безпечніший евакуаційний шлях у пожежному середовищі не обов'язково є найкоротшим. Отримані результати також співвідносяться з підходом Дж. Ціня, К. Лю та К. Хуана [2], які показали, що критичні перевантаження під час евакуації можуть формуватися не лише на виходах, а й біля сходів та у вузлах злиття пасажиропотоків.

Перевагою дослідження порівняно з роботами, орієнтованими на повномасштабне ВІМ-моделювання або складні алгоритми реального часу, є відтворюваність і прикладна простота запропонованого рішення. Воно не замінює інженерної симуляції, але дозволяє швидко оцінити наслідки маршрутизаційних рішень у комбінованому сценарії та врахувати український контекст використання станцій метро як укриттів. Подальший розвиток дослідження може полягати у переході від умовного індексу ризику до динамічної моделі диму, ускладненні геометрії станції, розміщенні кількох початкових точок пасажиропотоку та верифікації моделі на даних реальних станцій.

Водночас дослідження має низку обмежень. По-перше, станцію метрополітену подано у вигляді спрощеного графа, який не відтворює повної просторової конфігурації реального об'єкта. По-друге, ризик пожежі та задимлення задано умовним індексом, а не результатами фізичного моделювання поширення диму, температури та токсичних газів. По-третє, у моделі не відтворено мікродинаміку натовпу, індивідуальну поведінку пасажирів, різну швидкість руху людей і часову зміну небезпечної зони. По-четверте, отримані чисельні значення мають демонстраційний характер і не можуть безпосередньо використовуватися як нормативні показники для конкретної станції без додаткової інженерної верифікації.

Попри зазначені обмеження, запропонована модель має практичне значення, оскільки демонструє принципову відмінність між статичною та адаптивною логікою евакуації. Для українського контексту це особливо важливо, адже станції метрополітену виконують не лише транспортну, а й захисну функцію під час воєнних загроз. Подальший розвиток дослідження доцільно пов'язати з ускладненням геометрії станції, включенням часової динаміки задимлення, моделюванням кількох початкових точок пасажиропотоку, використанням реальних даних про пропускну здатність переходів і верифікацією результатів на прикладі конкретних станцій метрополітену.

8. Висновки

За результатами проведеного дослідження, яке поєднувало узагальнення наукових підходів і демонстраційне графове моделювання, сформульовано наступні висновки:

1. Узагальнення наукових підходів показало, що в умовах комбінованих надзвичайних ситуацій для метрополітену вирішальне значення мають не лише довжина маршруту, а й рівень небезпеки окремих ділянок, димовий вплив та можливе перевантаження вузлів евакуації; що підтверджує доцільність переходу від статичних схем евакуації до моделей, у яких враховуються умови середовища та зміна навантаження на критичні елементи інфраструктури.

2. Систематизація базових сценаріїв метро-евакуації дала змогу обґрунтувати вибір комбінованого сценарію «пожежа + задимлення + блокування одного виходу» як найбільш показового для демонстраційного моделювання. На основі графового моделювання встановлено, що за статичної схеми пасажиропотік концентрується на коротшому, але ризикованішому маршруті, тоді як підтриманий штучним інтелектом підхід перенаправляє рух в обхід небезпечної зони; що дозволило відобразити принципову відмінність між вибором маршруту за критерієм мінімальної довжини та маршрутизацією, що враховує ризик і поточне навантаження на ділянки.

3. Розроблена демонстраційна графова модель статичного сценарію евакуації показала, що за орієнтації лише на найкоротший шлях пасажиропотік концентрується на маршруті «P-S1-V-E1». У зазначеному сценарії середня довжина маршруту становила 3,0 умовні одиниці, однак середній індекс ризику досягав 9,0, усі 60 пасажирів проходили через ризикову зону, а коефіцієнт перевантаження критичної ділянки «P-S1» становив 5,0. Отже, статична маршрутизація забезпечує коротший шлях, не враховуючи небезпеку середовища та поточне навантаження на евакуаційні ділянки.

4. Порівняння статичного та адаптивного сценаріїв засвідчило, що адаптивна маршрутизація не мінімізує довжину евакуаційного шляху, але істотно підвищує його безпечність. В адаптивному сценарії домінуючим став маршрут «P-S2-V-E1», середня довжина маршруту зросла з 3,0 до 4,4 умовних одиниць, проте середній індекс ризику зменшився з 9,0 до 1,2, кількість пасажирів у ризиковій зоні скоротилася з 60 до 0, а коефіцієнт перевантаження критичної ділянки знизився з 5,0 до 2,4. Тобто адаптивний вибір маршруту є доцільним для комбінованих надзвичайних ситуацій у метрополітені, незважаючи на те, що запропонована модель має демонстраційний характер і потребує подальшої перевірки на даних реальних станцій.

Література

1. Mandal T., Rao K. R., Tiwari G. Evacuation of metro stations: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023. Vol. 140. Art. 105304. doi: 10.1016/j.tust.2023.105304
2. Qin J., Liu C., Huang Q. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 21. Art. 100677. doi: 10.1016/j.csite.2020.100677
3. Zhang N., Liang Y., Zhou C., Niu M., Wan F. Study on fire smoke distribution and safety evacuation of subway station based on BIM. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 24. Art. 12808. doi: 10.3390/app122412808
4. Zuo S., Mao Z., Fan C., Chen X., Gong M., Ren J. et al. Dynamic planning of crowd evacuation path for metro station based on Dynamic Avoid Smoke A-Star algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024. Vol. 154. Art. 106145. doi: 10.1016/j.tust.2024.106145
5. Huang P., Lin X., Liu C., Fu L., Yu L. A real-time automatic fire emergency evacuation route selection model based on decision-making processes of pedestrians. *Safety Science*. 2024. Vol. 169. Art. 106332. doi: 10.1016/j.ssci.2023.106332
6. Бункус С., Огнєва О. Дослідження методів моделювання сценаріїв евакуації в умовах надзвичайних ситуацій. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 226–235. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.4.29
7. Курило А. Г., Кустов М. В., Зімін С. І., Губенко А. О. Моделювання ризиків каскадних аварій на залізничному транспорті в умовах війни. *Проблеми надзвичай-*

них ситуацій. 2025. Вип. 2(42).С. 123–137. doi: 10.52363/2524-0226-2025-42-9

8. Мітіна Н. Б., Плис М. М., Рогальов М. В., Малиновська Н. В. Методично-практичні аспекти планування та організації евакуації в умовах надзвичайних ситуацій. Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Серія: Безпека життєдіяльності. 2018. Вип. 105. С. 148–153. doi: 10.30838/P.CMM.2415.250918.151.144

9. Попко С. О., Колокольніков В. О., Черепньов І. А. Можливість використання штучного інтелекту для попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій в метрополітені. Безпека людини у сучасних умовах: збір. доп. 17-ї Міжн. наук.-метод. конф., 4–5 грудня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 143–145. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/96596>

10. Потеряйко С. П., Белікова К. Г., Твердохліб О. С. Проблемні питання евакуації населення в безпечні місця в умовах воєнного стану. Український кейс. Публічне урядування. 2022. № 5(33). С. 58–63. doi: 10.32689/2617-2224-2022-5(33)-8

11. Потеряйко С. П., Белікова К. Г., Твердохліб О. С., Орлова Н. С. Економіко-математичне моделювання прогнозного оцінювання дієвості функціонування єдиної державної системи цивільного захисту. Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії та практики. 2022. № 1(42). С. 293–303. doi: 10.55643/fcaptp.1.42.2022.3676

12. Кодекс цивільного захисту України: Кодекс України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

M. Bashynskiy, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

N. Peleshko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

A. Beseda, Researcher of the Department

R. Ketsmur, Student

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ADAPTIVE ROUTING FOR SUBWAY PASSENGER EVACUATION

The article explores approaches to modeling the evacuation of people from the subway in combined emergency situations and demonstrates an example of using artificial intelligence support to select an evacuation route. The relevance of the topic is due to the fact that the subway combines high passenger density, a closed underground space, and dependence on narrow elements of the evacuation infrastructure. For Ukraine, this problem acquires additional importance, since metro stations are used not only as transport facilities, but also as shelters during military threats. The purpose of the study is to generalize modern approaches to modeling the evacuation of subway passengers in combined emergency situations and demonstrate a scenario in which the artificial intelligence approach to route selection is compared with a static evacuation scheme. Methodologically, the study combines the analysis of scientific papers with demonstration graph modeling in the Google Colab environment using Python. The metro station is presented as a weighted graph, in which the length, conditional hazard index, and throughput are given for each section. Two scenarios were implemented: evacuation without artificial intelligence, where the route was determined by the shortest path length, and a scenario with artificial intelligence support, where the route selection was carried out taking into account the risk and current load on the sections. As a result, it was found that under a static scheme, passenger flow is concentrated on a shorter but riskier route, while the adaptive approach allows you to redirect traffic to bypass the dangerous zone. In the scenario with artificial intelligence support, the average risk index decreased from 9.0 to 1.2, the number of passengers in the risk zone decreased from 60 to 0, and the overload factor of the critical section decreased from 5.0 to 2.4. At the same time, the average route length increased from 3.0 to 4.4. It is concluded that even simplified AI-supported modeling reveals the benefits of adaptive routing in the context of combined threats in the metro.

Keywords: subway, evacuation, emergency, routing, artificial intelligence, graph modeling, passenger flow

References

1. Mandal, T., Rao, K. R., Tiwari, G. (2023). Evacuation of metro stations: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140, 105304. doi: 10.1016/j.tust.2023.105304
2. Qin, J., Liu, C., Huang, Q. (2020). Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100677. doi: 10.1016/j.csite.2020.100677
3. Zhang, N., Liang, Y., Zhou, C., Niu, M., Wan, F. (2022). Study on fire smoke distribution and safety evacuation of subway station based on BIM. *Applied Sciences*, 12(24), 12808. doi: 10.3390/app122412808
4. Zuo, S., Mao, Z., Fan, C., Chen, X., Gong, M., Ren, J. (2024). Dynamic planning of crowd evacuation path for metro station based on Dynamic Avoid Smoke A-Star algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 154, 106145. doi: 10.1016/j.tust.2024.106145
5. Huang, P., Lin, X., Liu, C., Fu, L., Yu, L. (2024). A real-time automatic fire emergency evacuation route selection model based on decision-making processes of pedestrians. *Safety Science*, 169, 106332. doi: 10.1016/j.ssci.2023.106332
6. Bunkus, S. V., Ohnieva, O. (2024). Doslidzhennia metodiv modeliuвання stsenariiv evakuatsii v umovakh nadzvychainykh sytuatsii. *Visnyk Khersonskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu*, 4(91), 226–235. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.4.29
7. Kurylo A. H., Kustov M. V., Zimin S. I., Hubenko A. O. (2025). Modelyuvannya ryzykiv kaskadnykh avariy na zaliznychnomu transporti v umovakh viyny. *Problemy nadzvychainykh sytuatsiy*, 2(42), 123–137. doi: 10.52363/2524-0226-2025-42-9
8. Mitina, N. B., Plys, M. M., Rohalov, M. V., Malynovska, N. V. (2018). Metodychno-praktychni aspekty planuvannya ta orhanizatsii evakuatsii v umovakh nadzvychainykh sytuatsii. *Budivnytstvo, Materialoznavstvo, Mashynobuduvannya. Serii: Bezpeka Zhyttiediialnosti*, 105, 148–153. doi: 10.30838/P.CMM.2415.250918.151.144
9. Popko, S. O., Kolokolnikov, V. O., Cherepnov, I. A. (2025). Mozhlyvist vykorystannia shtuchnoho intelektu dlia poperedzhennia ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii v metropoliteni. In S. O. Vambol (Ed.), *Bezpeka liudyny u suchasnykh umovakh: zbirnyk dopovidei 17-i Mizhnarodnoi naukovo-metodychnoi konferentsii*, 143–145. NTU “KhPI”. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/96596>
10. Poteriaiko, S. P., Bielikova, K. H., Tverdokhlib, O. S. (2022). Problemni pytan- nia evakuatsii naseleння v bezpechni mistsia v umovakh voiennoho stanu. *Ukrainskyi keis [Problematic issues of evacuating the population to safe places under martial law: The Ukrainian case]*. *Publichne Uriaduvannya*, 5(33), 58–63. doi: 10.32689/2617-2224-2022-5(33)-8
11. Poteriaiko, S. P., Bielikova, K. H., Tverdokhlib, O. S., Orlova, N. S. (2022). Ekonomiko-matematychnе modeliuвання prohnznoho otsiniuvannya diievosti funktsionuvannya yedynoi derzhavnoi systemy tsyvilnoho zakhystu. *Finansovo-Kredytna Diialnist: Problemy Teorii ta Praktyky*, 1(42), 293–303. doi: 10.55643/fcaptop.1.42.2022.3676
12. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Code of Civil Protection of Ukraine], № 5403-VI (2012). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026