Вісник ЛДУБЖД
Bulletin of Lviv State University of Life Safety
https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk
ISSN 2078-4643 (print), ISSN 2708-1389 (online)

UDC 614.84 +004.942
DOI: 10.32447/20784643.32.2025.03
This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

В. М. Пилипенко, О. В. Хлевной, Н. В. Жезло-Хлевна, Ю. С. Назар, В. І. Брошко
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5957-4822– В. М. Пилипенко
https://orcid.org/0000-0003-2846-3480 – О. В. Хлевной
https://orcid.org/0009-0005-3768-2863 – Н. В. Жезло-Хлевна
https://orcid.org/0000-0003-0151-8285 – Ю. С. Назар
v.pylypenko@ldubgd.edu.ua

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ІНКЛЮЗИВНИХ ПЛАНІВ ЕВАКУАЦІЇ ПРИ ПОЖЕЖІ

Проблема. Традиційні плани евакуації при пожежі не адаптовані під потреби маломобільних груп населення, що знижує їхню безпеку та ефективність. Відсутність адаптивних маршрутів, доступних інтерфейсів і надійних механізмів у критичних умовах суттєво ускладнює евакуацію.

Мета роботи – розробити та обґрунтувати концепцію інклюзивних планів евакуації при пожежі, що забезпечують адаптивність, доступність і ефективність у реальному часі для всіх груп користувачів.

Методи дослідження. Проаналізовано перспективи застосування SLAM, IoT і AR/VR для створення інклюзивних планів евакуації. Виконано системне моделювання клієнт-серверної архітектури та алгоритмів адаптації маршрутів (A*, Dijkstra). Виконано візуалізацію інтеграції компонентів, інтерфейсів і механізмів надійності. Досліджено принципи інклюзивності через мультимодальні інтерфейси та їхню персоналізацію.

Основні результати дослідження. Розроблено концептуальну модель інтерактивної евакуаційної системи, яка інтегрує SLAM для створення карт, IoT і АПС для моніторингу середовища (задимлення, температура) та AR/VR-інтерфейси (AR-окуляри, мобільні додатки) для мультимодальної взаємодії. Алгоритми A*/Dijkstra генерують адаптивні маршрути, такі як безсходові шляхи для осіб із зниженою мобільністю чи зони відпочинку для людей похилого віку. Інтерфейси надають візуальні, аудіальні та тактильні канали, персоналізовані до фізичних потреб і локалізовані для різних мов. Механізми надійності (офлайн-режим, резервне копіювання, дублювання даних) забезпечують стабільність у критичних умовах. Наведено схеми, що демонструють інтеграцію компонентів, підкреслюючи масштабування та інклюзивність системи, що має низку переваг в порівнянні з традиційними підходами.

Висновки. Розглянуто інноваційні підходи до створення інклюзивних планів евакуації при пожежі. Запропонована концепція системи реалізації інклюзивних планів евакуації при пожежі на основі SLAM, IoT і AR/VR дає змогу забезпечити доступність і безпеку для всіх груп користувачів. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку математичних моделей для оптимізації алгоритмів маршрутизації в умовах невизначеності та створення протоколів інтеграції IoT-сенсорів із різними типами будівельних систем.

Ключові слова: евакуація при пожежі, план евакуації, інклюзивність, SLAM, IoT, доповнена реальність, адаптивні маршрути.

V. M. Pylypenko, O. V. Khlevnoi, N. V. Zhezlo-Khlevna, Yu. S. Nazar, V. I. Broshko
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

INNOVATIVE APPROACHES TO DEVELOPING INCLUSIVE FIRE EVACUATION PLANS

Problem. Traditional fire evacuation plans are not adapted to the needs of low-mobility groups, which reduces their safety and effectiveness. The lack of adaptive routes, accessible interfaces, and reliable mechanisms under critical conditions significantly complicates evacuation for vulnerable populations.

Purpose. The study aims to develop and substantiate the concept of inclusive fire evacuation plans that ensure adaptability, accessibility, and real-time efficiency for all user groups, including individuals with special needs.

Research Methods. The study analyzed the prospects of using SLAM, IoT, and AR/VR technologies for creating inclusive evacuation plans. System modeling was performed for a client-server architecture and route adaptation algorithms (A*, Dijkstra). Visualization of component integration, interfaces, and reliability mechanisms was conducted

using UML-like diagrams. The principles of inclusivity were explored through multimodal interfaces and their personalization.

Key Findings. A conceptual model of an interactive evacuation system was developed, integrating SLAM for map generation, IoT and fire alarm systems for environmental monitoring (e.g., smoke and temperature), and AR/VR interfaces (AR glasses, mobile applications) for multimodal interaction. The A*/Dijkstra algorithms generate adaptive routes, including barrier-free paths for individuals with reduced mobility and rest zones for the elderly. Interfaces provide visual, auditory, and tactile channels, personalized to users' physical needs and localized for different languages. Reliability mechanisms (offline mode, data backup, redundancy) ensure stability under critical conditions. Diagrams illustrate component integration, highlighting the system's scalability and inclusivity, and demonstrate significant advantages over traditional approaches.

Conclusions. Innovative approaches to creating inclusive fire evacuation plans were explored. The proposed system concept, based on SLAM, IoT, and AR/VR technologies, ensures accessibility and safety for all user groups. Future research will focus on developing mathematical models to optimize routing algorithms under uncertainty and on creating protocols for integrating IoT sensors with various building systems.

Keywords: fire evacuation, evacuation plan, inclusivity, SLAM, IoT, augmented reality, adaptive routes.

Аналіз проблеми. Евакуаційний план – це текстово-графічний документ, що містить відомості про шляхи оперативного переміщення в безпечні зони у разі пожежі чи іншої надзвичайної події. Відповідно до вимог чинного законодавства [1] щодо розроблення планів евакуації, ці документи повинні містити схематичні зображення (карти) будівлі або кількох приміщень та сходів відповідно до їх реального розташування та фактичного планування, шляхи евакуації з кожного приміщення, умовні позначення, що включають розташування конкретного евакуаційного плану на карті приміщення, шляхи виходу (стрілки), виходи, пожежні рукави та гідранти, вогнегасники, електрощити, пожежні щити, аптечки, телефони, розташування незадимлюваних приміщень, місця зустрічі представників пожежно-рятувальних підрозділів, текстову інформацію, зокрема, інструкції для користувачів.

Очевидно, що плани евакуації є корисними, оскільки допомагають уникнути паніки, забезпечуючи зрозумілий алгоритм дій для людей, які можуть бути дезорієнтовані через стрес, дим або шум, сприяє прийняттю та оперативному ухваленню правильних рішень. Але їх використання у паперовому варіанті із розміщенням в загальнодоступних місцях має низку обмежень.

По-перше, такі документи не враховують потреб людей зі зниженим зором або мобільністю. У стресовій ситуації складно швидко зрозуміти і оцінити традиційний паперовий план, особливо за наявності диму чи слабкого освітлення. Необхідно враховувати, що досить часто, особливо, коли мова йде про громадські об'єкти, відвідувачі, що опинилися у будівлі вперше, погано орієнтуються в об'ємно-планувальних рішеннях, тому ознайомлення із планом потребує певного часу, який при порятунку є дуже цінним.

По-друге, традиційні плани є статичними та не враховують змін у реальному часі, таких як блокування шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі (задимлення, полум'я, висока температура, критичні концентрації токсичних речовин). Статичний формат не дозволяє інтерактивно отримувати альтернативні маршрути евакуації залежно від поточної ситуації.

По-третє, будь-які зміни в плануванні приміщень або розташуванні обладнання потребують друку нових планів, що є ресурсо- і часозатратним процесом.

Альтернативою традиційним засобам є розробка інтерактивних планів евакуації при пожежі, підходи до розробки яких значно еволюціонують завдяки можливості інтеграції новітніх технологій, таких як SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), IoT (Інтернет речей), віртуальна та доповнена реальність (AR, VR) і мобільних додатків [15]. Ці підходи створюють передумови для доступу до інформації про безпечні маршрути виходу для користувачів у надзвичайних ситуаціях в режимі реального часу (таблиця 1).

Таблиця 1

Порівняння традиційних та інтерактивних планів евакуації за ключовими характеристиками

Характеристика	Традиційні плани	Інтерактивні плани
Формат	Статичний (паперовий)	Динамічний (цифровий, AR/VR)
Оновлення даних	Вимагає передруку	Автоматичне в реальному часі
Адаптація до змін	Відсутня (не враховує задимлення, завалені проходи)	Повна (враховує дані IoT про небезпеку)
Доступність	Обмежена (складно читати при поганому освітленні)	Висока (мобільні додатки, голосові підказки)
Інтеграція з технологіями	Немає (відсутня інтеграція з IoT, AR)	Розширена (SLAM, IoT, AR/VR)
Підтримка інклюзивності	Мінімальна (не підходить для людей з вадами зору)	Повна (голосовий супровід, адаптовані маршрути)

Отже, традиційні евакуаційні плани не забезпечують належної інклюзивності, ускладнюючи евакуацію для осіб з особливими потребами. Статичні схеми на стінах не надають альтернативних (аудіальних та тактильних) каналів інформації, а також не пропонують маршрутів, адаптованих до обмеженої мобільності чи регіональних особливостей. Інноваційні підходи, що поєднують SLAM, IoT та AR/VR, дозволяють створювати інклюзивні системи відповідно до індивідуальних потреб користувачів, забезпечуючи безпеку всіх груп населення під час пожежі.

Аналіз досліджень та публікацій за тематикою дозволив встановити, що перелічені інформаційні технології активно досліджуються та впроваджуються при вирішенні проблем оптимізації пошуку маршрутів евакуації при пожежі. У роботах [2-5] обґрунтовано проблеми та перспективи використання віртуальної та доповненої реальності для відображення шляхів евакуації на екрані смартфона як засобу для полегшення орієнтування у складних умовах. Такі методи суттєво полегшують прийняття рішень щодо вибору маршрутів. При цьому запропоновані заходи не дають змоги враховувати зміну обставини, зокрема, блокування шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі. У [6-7] автори пропонують комплексні рішення щодо інтеграції показників сенсорів задимлення та температури у систему управління евакуацією, що дає змогу оперативно виявляти заблоковані небезпечними чинниками пожежі шляхи та виходи і корегувати процес евакуації. Запропонована у роботах архітектура інформаційних систем управління евакуацією є складною та дороговартісною і може бути використана на великих об’єктах. Роботи [8-10, 13] присвячені розгляду різноманітних аспектів технології SLAM для створення інтерактивних карт приміщень, які б давали змогу оптимізувати пошук евакуаційних шляхів під час виникнення надзвичайних ситуацій. Разом з тим, зважаючи на інноваційність технології, публікації досить часто містять проміжні результати та декларують наступні завдання досліджень, що підтверджує необхідність подальшої роботи у цій сфері з метою формування відповідної бази знань та наповнення пакету безпекоорієнтованих науково-дослідних проектів.

Мета цієї статті полягає в розробці та обґрунтуванні концепції створення інклюзивних планів евакуації при пожежі на основі SLAM, IoT, AR/VR для адаптивності, доступності та ефективності в реальному часі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі ***завдання:***

– проаналізувати перспективи застосування технологій SLAM, IoT та AR/VR для створення інклюзивних планів евакуації;

– розробити концептуальну модель інтерактивної евакуаційної системи з інтеграцією SLAM, IoT та цифрових інтерфейсів для адаптивних маршрутів;

– обґрунтувати основні принципи інклюзивності інтерактивної евакуаційної системи, що забезпечують її доступність для всіх груп користувачів, включаючи осіб із особливими потребами, осіб похилого віку та користувачів із тимчасовими обмеженнями.

Методи дослідження. Дослідження базується на порівняльному аналізі наукових публікацій, технічної документації та нормативних стандартів, присвячених застосуванню технологій одночасного позиціонування та картографування (SLAM), Інтернету речей (IoT), доповненої та віртуальної реальності (AR/VR) у системах евакуації. Аналіз дає оцінку функціональних можливостей цих технологій, їх обмежень та перспектив інтеграції для створення інтерактивних планів евакуації при пожежі.

Для формування загальної концепції використано системне моделювання, яке передбачає синтез SLAM для створення динамічних карт приміщень у реальному часі, IoT для оперативного моніторингу умов середовища, таких як задимлення, температура чи блокування проходів, а також цифрових інтерфейсів, зокрема мобільних додатків та AR-систем, для відображення адаптивних евакуаційних маршрутів.

Розробка принципів доступної візуалізації маршрутів, особливо для користувачів з особливими потребами, здійснена шляхом аналізу вимог до інклюзивних інтерфейсів та синтезу рішень, що включають мультимодальні канали, адаптовані маршрути та персоналізацію. Для структурування принципів використано метод концептуального моделювання, що дозволило визначити ключові компоненти системи та їх взаємодію для забезпечення доступності.

Результати дослідження

Аналіз сучасних інформаційних технологій для створення інклюзивних планів евакуації. Для реалізації інклюзивних планів евакуації при пожежі ключове значення мають сучасні інформаційні технології, зокрема одночасне позиціонування та картографування (SLAM), Інтернет речей (IoT), а також доповнена та віртуальна реальність (AR/VR) [20]. Проведений аналіз наукових публікацій та технічної документації дозволив оцінити потенціал цих технологій у контексті створення адаптивних, доступних та ефективних евакуаційних систем.

Технологія SLAM забезпечує створення динамічних карт приміщень [25] у реальному часі та визначення позиції користувача в умовах, де традиційні методи, такі як GPS, є неефективними через відсутність сигналу в закритих просторах. Використовуючи дані з лідарів, камер та інерційних вимірювальних одиниць (IMU), SLAM здатна адаптувати карти до змін у середовищі, таких як завалені проходи чи задимлені зони, що критично важливо під час пожежі. Дослідження [8, 9, 13] демонструють, що алгоритми SLAM, зокрема EKF (Extended Kalman Filter) та Graph-based SLAM, забезпечують високу точність картографування навіть у складних умовах, хоча потребують значних обчислювальних ресурсів.

Інтернет речей (IoT) відіграє важливу роль у моніторингу умов середовища. Мережа сенсорів, що вимірюють задимлення, температуру та концентрацію токсичних газів, дозволяє оперативно виявляти небезпечні зони та передавати дані для оновлення евакуаційних маршрутів. Роботи [6, 7] доводять, що інтеграція IoT із системами управління евакуацією підвищує швидкість реагування, хоча складність таких систем може обмежувати їх застосування в невеликих об'єктах.

Технології AR та VR забезпечують інтуїтивну візуалізацію евакуаційних маршрутів [16]. Доповнена реальність дозволяє накладати маршрути на реальне зображення приміщення через екрани смартфонів чи AR-окуляри, що полегшує орієнтацію в умовах стресу чи обмеженої видимості. Віртуальна реальність використовується для тренувань, допомагаючи користувачам заздалегідь ознайомитися з евакуаційними шляхами. Роботи [1, 2, 5] показують, що AR/VR значно покращують сприйняття інформації порівняно зі статичними планами, хоча потребують адаптації для людей з особливими потребами.

Таблиця 2 узагальнює можливості та обмеження технологій, демонструючи їх взаємодоповнюваність [18].

Таблиця 2

Характеристики технологій для інклюзивних планів евакуації

Технологія	Функція	Переваги	Обмеження
SLAM	Створення карт, позиціонування	Висока точність, адаптація до змін	Високі обчислювальні вимоги
IoT	Моніторинг умов (задимлення, температура)	Оперативність, автоматизація	Складність розгортання
AR/VR	Візуалізація маршрутів	Інтуїтивність, можливості тренування	Потреба в адаптації для особливих груп

Для ілюстрації їх взаємодії розроблено схему (рисунок 1), яка відображає потік даних від сенсорів IoT через SLAM до візуалізації в AR/VR, що формує основу концептуальної моделі системи.

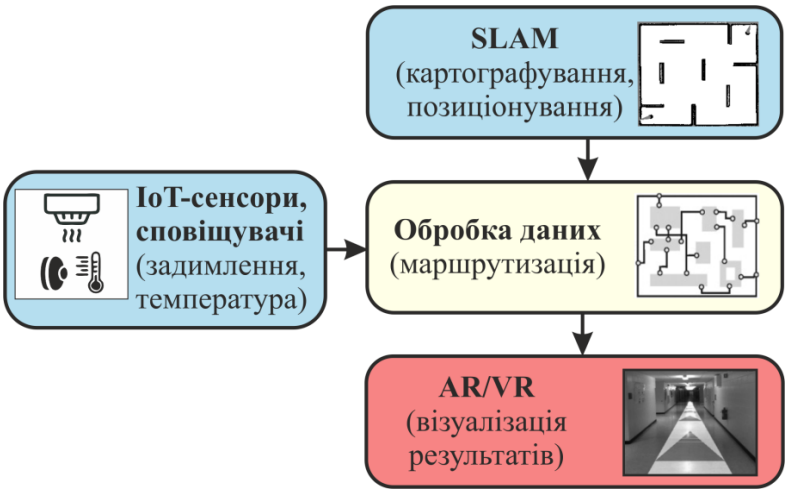

Рисунок 1 – Схема інтеграції технологій для інклюзивних планів евакуації

Проведений аналіз свідчить, що технології SLAM, IoT та AR/VR створюють основу для інклюзивних евакуаційних систем. SLAM забезпечує точне позиціонування для всіх користувачів, IoT дозволяє моніторити умови для адаптації маршрутів під потреби користувачів з різною мобільністю, а AR/VR підтримує мультимодальні інтерфейси, що відповідають потребам осіб із порушеннями зору чи слуху. При цьому сучасні рішення часто є фрагментарними, що вказує на необхідність розробки комплексної концепції, яка поєднує ці технології.

Розробка концептуальної моделі системи з інтеграцією SLAM, IoT та цифрових інтерфейсів для адаптивних маршрутів. Для реалізації концептуальної моделі інклюзивної евакуаційної системи запропоновано приклад клієнт-серверної архітектури, яка забезпечує ефективну обробку даних і адаптацію маршрутів у реальному часі. Архітектура передбачає інтеграцію даних від IoT-сенсорів (задимлення, температура), сповіщувачів автоматичної пожежної сигналізації (АПС) та модуля SLAM, зберігаючи карти приміщень і профілі користувачів у постійному сховищі, а динамічні дані – у тимчасовому буфері. Обробний модуль, використовуючи алгоритми A* і Dijkstra, формує маршрути, адаптовані до потреб осіб із зниженою мобільністю [24]. Цифрові інтерфейси (AR, мобільні додатки) забезпечують інклюзивну візуалізацію маршрутів, включаючи голосові підказки та вібраційні сигнали [21]. Наведена схема (рисунок 2) деталізує взаємодію компонентів системи.

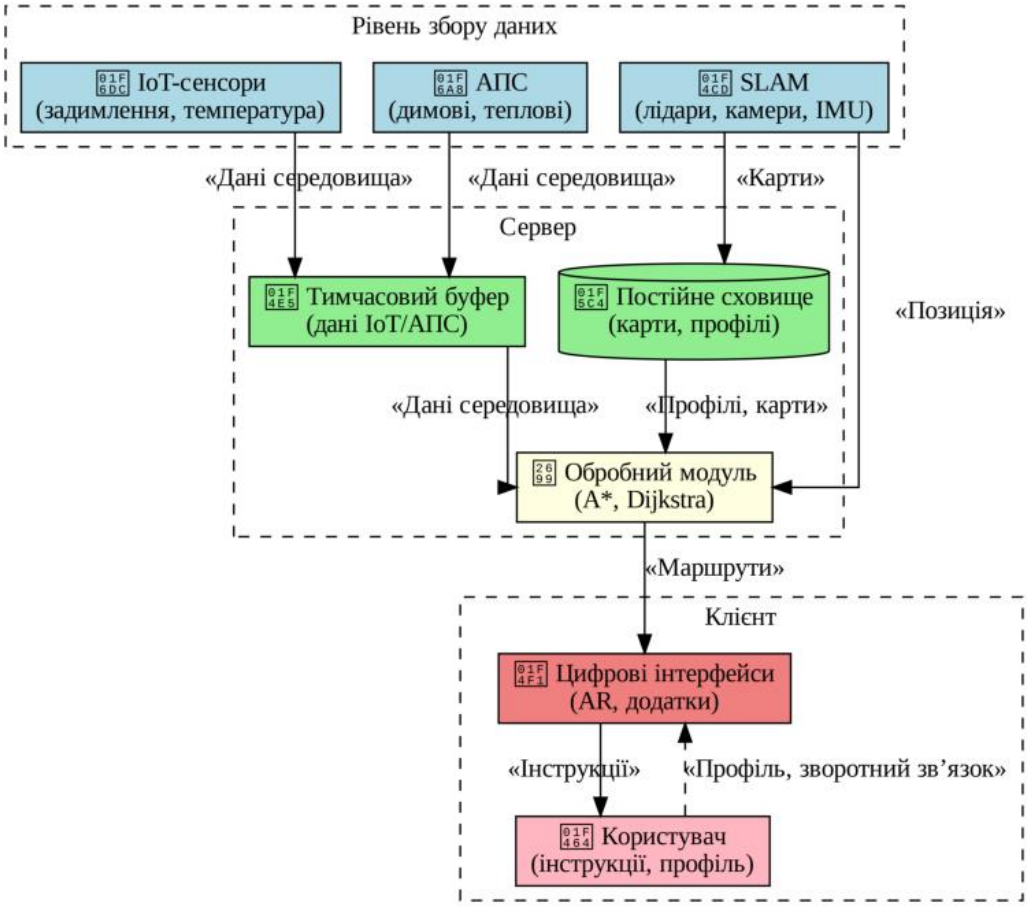

Рисунок 2 – Клієнт-серверна архітектура інтерактивної системи інклюзивного планування евакуації

Модель забезпечує створення динамічних карт приміщень, моніторинг умов у реальному часі та відображення адаптивних евакуаційних маршрутів, що враховують небезпечні зони, такі як задимлення чи високі температури (таблиця 3)

Таблиця 3

Послідовність роботи системи

Етап	Компонент	Дія	Результат
1. Картографування	SLAM (лідари, камери, IMU)	Створення 3D-карти, визначення позиції	Тривимірна карта, координати користувача
2. Моніторинг	IoT-сенсори, сповіщувачі АПС	Збір даних про задимлення, температуру	Оновлені дані про середовище
3. Обробка	Обробний модуль (A*, Dijkstra)	Оновлення карти, розрахунок маршрутів	Оптимальний маршрут
4. Візуалізація	Цифрові інтерфейси (AR, додатки)	Відображення маршрутів	Інструкції у AR або додатку
5. Оновлення	Система в цілому	Періодичне оновлення даних	Адаптивний маршрут

Концептуальна модель інклюзивної евакуаційної системи передбачає послідовну взаємодію компонентів для створення адаптивних маршрутів під час пожежі. На першому етапі модуль одночасного позиціонування та картографування (SLAM), використовуючи дані з лідарів, камер та інерційних вимірювальних одиниць (IMU), створюватиме тривимірну карту приміщення в реальному часі. Ця карта слугуватиме основою для визначення поточної позиції користувача з точністю до метра, навіть у закритих просторах без GPS-сигналу.

На другому етапі моніторинг середовища здійснюватиметься за допомогою IoT-сенсорів або сповіщувачів автоматичної пожежної сигналізації (АПС), таких як димові, теплові чи комбіновані датчики[19]. Ці пристрої безперервно збиратимуть дані про рівень задимлення, температуру, концентрацію токсичних газів і фізичні перешкоди, такі як завалені проходи чи заблоковані евакуаційні виходи. Дані передаватимуться до центрального обробного модуля через бездротові мережі (Wi-Fi, Bluetooth) для IoT-сенсорів або стандартні протоколи зв'язку АПС (наприклад, BACnet, Modbus).

На третьому етапі модуль обробки аналізуватиме отримані дані, оновлюватиме карту, позначатиме небезпечні зони та розраховуватиме оптимальні евакуаційні маршрути за допомогою алгоритмів маршрутизації, таких як A* або Dijkstra.

На четвертому етапі цифрові інтерфейси, такі як мобільні додатки (або AR-окуляри), відображатимуть адаптовані маршрути у зрозумілому форматі. Наприклад, AR-інтерфейс накладатиме стрілки напрямку на реальне зображення приміщення, а мобільний додаток надаватиме покрокові інструкції з позначками зон відпочинку чи пандусів. Інтерфейси враховуватимуть індивідуальні потреби, забезпечуючи чіткість і доступність інформації.

На п'ятому етапі система періодично оновлюватиме маршрути (кожні 5–10 секунд) на основі нових даних від IoT-сенсорів і сповіщувачів АПС, забезпечуючи адаптивність до динамічних умов, таких як поширення вогню чи задимлення. У разі втрати зв'язку передбачається офлайн-режим, де SLAM і кешовані маршрути підтримуватимуть базову функціональність, що гарантує надійність системи.

Обґрунтування принципів забезпечення інклюзивності. Концептуальна модель системи передбачає адаптацію евакуаційних маршрутів до потреб осіб із зниженою мобільністю, зокрема тих, хто використовує колісні крісла, протези, допоміжні засоби (ходунки, милиці) або має обмеження через похилий вік [22]. Це можливо реалізувати за допомогою даних профілю користувача, отриманих через мобільний додаток або сенсори (наприклад, швидкість руху, тип допоміжного засобу), та інформації від систем автоматичної пожежної сигналізації чи IoT-сенсорів про стан середовища (блокування евакуаційних виходів) [23]. Алгоритми маршрутизації дозволяють врахувати об'ємно-планувальні рішення приміщень, надаючи пріоритет безсходовим шляхам, широким коридорам і зонам із мінімальними перешкодами. Наприклад, для користувачів колісних крісел система може будувати маршрути, які не пролягають через сходи або вузькі дверні прорізи, пропонуючи протипожежні ліфти або пандуси. Для осіб похилого віку або тих, хто використовує протези чи опори, маршрути можуть враховувати знижену швидкість пересування та потреби в періодичних зупинках.

Для забезпечення універсальної доступності системи сформульовано принципи, які враховують потреби всіх груп користувачів (таблиця 4).

Таблиця 4

Принципи забезпечення доступності інтерактивної евакуаційної системи

Принцип	Опис	Застосування
Мультимодальність інтерфейсів	Візуальні, аудіальні, тактильні канали	Голосові підказки, AR-стрілки, вібрація
Адаптація маршрутів	Маршрути за фізичними можливостями	Безсходові шляхи, швидкість руху
Персоналізація та локалізація	Багатомовність, налаштування інтерфейсу	Регіональні стандарти, контрастність
Надійність у критичних умовах	Офлайн-режими, резервні канали	Локальні обчислення, Bluetooth

Перший принцип – мультимодальність інтерфейсів, що полягає в підтримці кількох каналів передачі інформації: візуальні (AR-окуляри, мобільні додатки), аудіальні (голосові підказки) та тактильні (вібраційні сигнали). Наприклад, для осіб із вадами зору доцільно використовувати голосові інструкції, які описують маршрут у реальному часі, тоді як для осіб із вадами слуху – чіткі візуальні вказівки, такі як стрілки чи миготливі позначки в AR. Дослідження [5, 9, 17] підтверджують, що мультимодальні інтерфейси підвищують ефективність сприйняття інформації в стресових умовах (рисунок 3).

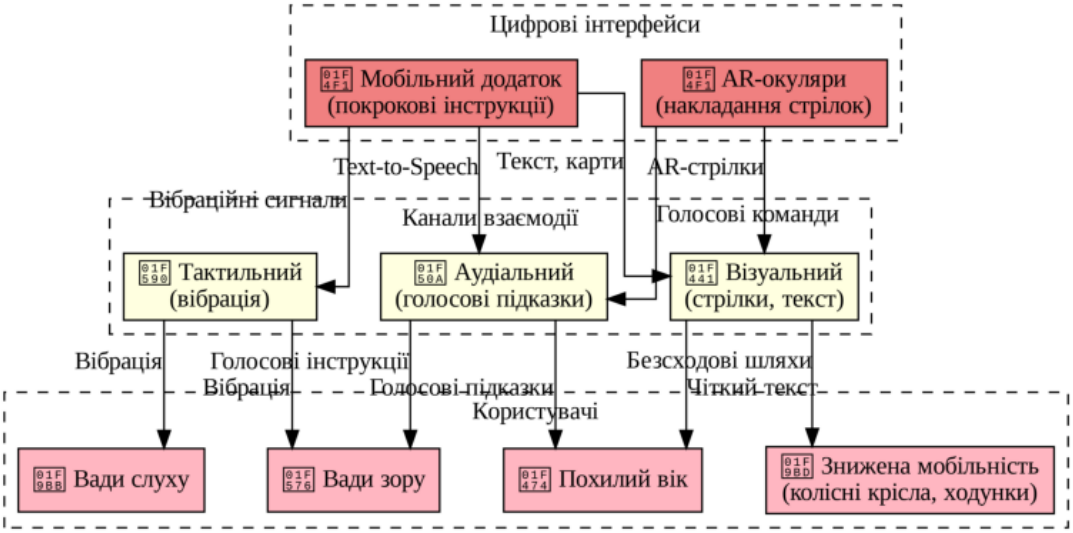

Рисунок 3 – Мультимодальні інтерфейси для доступності

Другий принцип – адаптація маршрутів до індивідуальних потреб. Оптимальним рішенням є використання даних про фізичні можливості користувача, отриманих через профіль у мобільному додатку або автоматично визначених сенсорами (наприклад, швидкість руху). Це дає змогу пропонувати маршрути, які не передбачають рух сходами або крізь вузькі проходи для осіб з обмеженою мобільністю, а також оптимізувати шлях за критерієм найкоротшого часу для інших користувачів. Алгоритми маршрутизації, такі як A*, можна адаптувати до цих вимог, враховуючи дані IoT про небезпечні зони (рисунок 4).

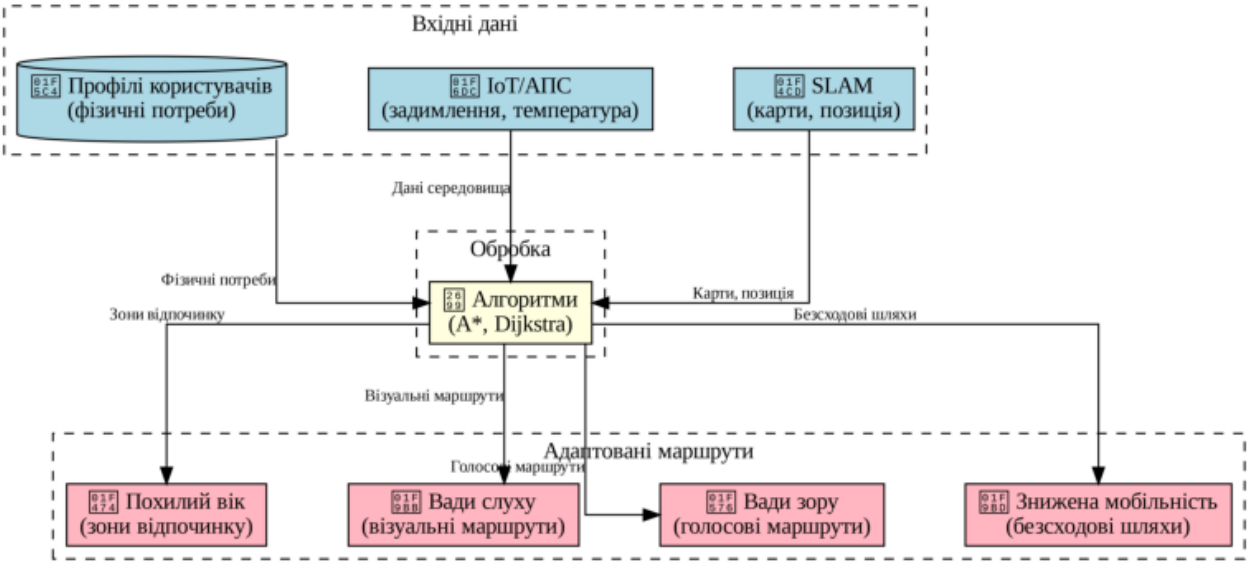

Рисунок 4 – Схема адаптації евакуаційних маршрутів

Третій принцип – персоналізація та локалізація. Доцільно підтримувати багатомовні голосові підказки та текстові повідомлення, що може забезпечити доступність для іноземців. Локалізація інтерфейсу – це можливість здійснювати адаптацію до регіональних стандартів евакуації, таких як позначення виходів чи сигналізації. Крім того, для забезпечення інклюзивності необхідно передбачити налаштування розміру шрифту, контрастності чи гучності (рисунок 5).

Четвертий принцип – надійність у критичних умовах. Схема (рисунок 6) ілюструє механізми забезпечення надійності системи в критичних умовах, таких як кібератаки, втрата мережі, задимлення чи перевантаження системи. Вона демонструє, як офлайн-режим, резервне копіювання карт і профілів, дублювання даних IoT/АПС та ранжування критичних даних за пріоритетністю дозволить забезпечити стабільну роботу, гарантуючи інклюзивність і безпеку в надзвичайних ситуаціях.

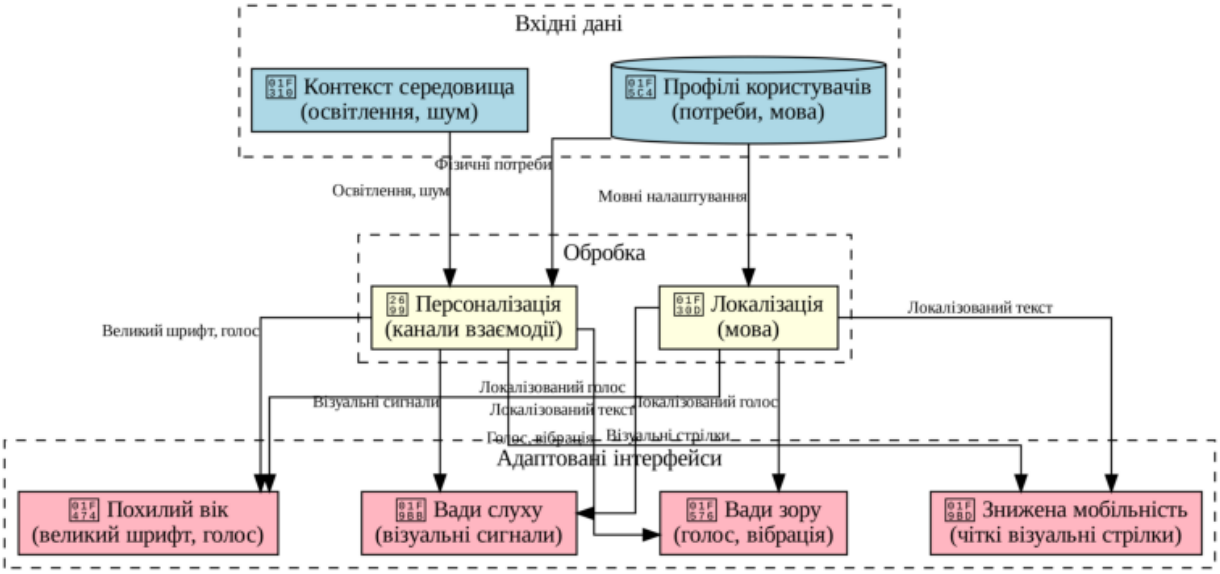

Рисунок 5 – Схема персоналізації і локалізації інтерфейсу

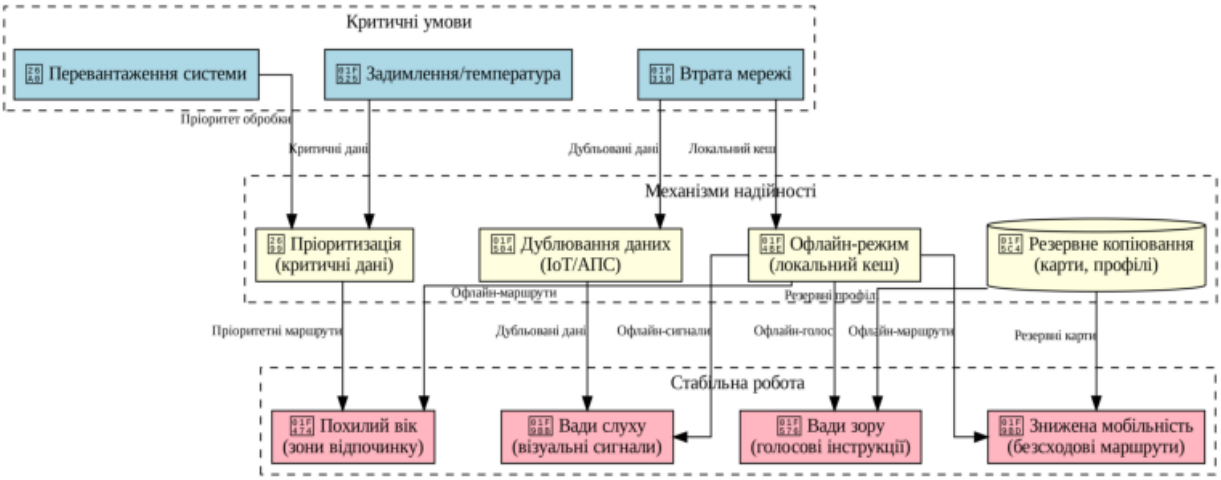

Рисунок 6 – Схема забезпечення надійності в критичних умовах

Запропоновані принципи можуть забезпечити інклюзивність системи, дозволяючи всім користувачам, незалежно від їхніх фізичних чи когнітивних особливостей, ефективно евакуюватися під час пожежі. Їх реалізація базується на модульній архітектурі системи, що полегшує впровадження нових функцій доступності.

Висновки. Дослідження, проведене в рамках статті, дозволило розробити загальну концепцію створення інклюзивних планів евакуації при пожежі на основі інноваційних інформаційних технологій, зокрема одночасного позиціонування та картографування (SLAM), Інтернету речей (IoT) та доповненої/віртуальної реальності (AR/VR). Аналітичний характер статті забезпечено шляхом виконання трьох ключових завдань, що охоплюють аналіз технологій, розробку концептуальної моделі системи та визначення принципів доступності.

Порівняльний аналіз наукових джерел і технічної документації показав, що SLAM забезпечує точне картографування та позиціонування в реальному часі, IoT дозволяє оперативно моніторити умови середовища (задимлення, температура), а AR/VR полегшують інтуїтивну візуалізацію маршрутів. Встановлено, що інтеграція цих технологій є необхідною умовою для створення адаптивних евакуаційних систем.

Запропонована концептуальна модель інтерактивної евакуаційної системи інтегрує SLAM для створення динамічних карт, IoT для збору даних про небезпечні зони та цифрові інтерфейси (AR, мобільні додатки) для відображення адаптивних маршрутів. Модель базується на модульній архітектурі, що забезпечує її масштабованість і придатність для різних типів будівель.

Запропоновано чотири принципи доступності системи для всіх користувачів, включаючи осіб з

особливими потребами: мультимодальність інтерфейсів, адаптація маршрутів, персоналізація та локалізація, а також надійність у критичних умовах. Реалізація цих принципів можлива завдяки використанню візуальних, аудіальних, тактильних каналів, адаптації до фізичних можливостей користувачів, багатомовності і офлайн-режиму побудови інклюзивних планів евакуації.

Аналітичний підхід дав нам змогу не лише узагальнити можливості сучасних технологій, а й запропонувати цілісну концепцію інклюзивних планів евакуації, яка враховує як технічні, так і соціальні аспекти. При цьому низка питань потребує подальшого дослідження. Серед них, зокрема, розробка математичних моделей для оптимізації алгоритмів маршрутизації в умовах невизначеності, створення протоколів інтеграції IoT-сенсорів із різними типами будівельних систем, проектування інтерфейсів із розширеними функціями для осіб із когнітивними порушеннями. Ці завдання стануть основою для наступних досліджень, спрямованих на практичну реалізацію концепції.

Список літератури:

1. Lovreglio, R., & Kinateder, M. (2020). Augmented reality for pedestrian evacuation research: Promises and limitations. Safety Science, 128, 104750. https://doi.org/10.1016/j.ssci. 2020.104750

2. Kinateder, Max & Ronchi, Enrico & Nilsson, Daniel & Kobes, Margrethe & Müller, Mathias & Pauli, Paul & Mühlberger, Andreas. (2014). Virtual Reality for Fire Evacuation Research. 10.13140/2.1.3380.9284.

3. Cao, Lijun & Lin, Jing & Li, Nan. (2018). A Virtual Reality based Study of Indoor Fire Evacuation after Active or Passive Spatial Exploration. Computers in Human Behavior. 90. 10.1016/j.chb.2018.08.041.

4. Arias, S., La Mendola, S., Wahlqvist, J. et al. Virtual Reality Evacuation Experiments on Way-Finding Systems for the Future Circular Collider. Fire Technol 55, 2319–2340 (2019). https://doi.org/ 10.1007/s10694-019-00868-y

5. Lorusso, Paola & de Iuliis, Melissa & Marasco, Sebastiano & Domaneschi, Marco & Cimellaro, Gian & Villa, Valentina. (2022). Fire Emergency Evacuation from a School Building Using an Evolutionary Virtual Reality Platform. Buildings. 12. 223. 10.3390/buildings12020223.

6. Zualkernan, Imran & Aloul, Fadi & Sakkia, Vikram & Al Noman, Hassan & Sowdagar, Salman & al-hammadi, Omar. (2019). An IoT-based Emergency Evacuation System. 62-66. 10.1109/IoTaIS47347.2019.8980381.

7. Ziyang Zhang, Lingye Tan, Robert L.K. Tiong, Fire emergency management of large shopping malls: IoT-based evacuee tracking and dynamic path optimization, Alexandria Engineering Journal, Volume 107, 2024, P. 652-664.

8. Ibrahim, Z. and He, J. (2024) Slam Technology on Disaster Response. World Journal of Engineering and Technology, 12, 695-714. doi: 10.4236/wjet.2024.123043.

9. Po-Yen Tseng, Jacob J. Lin, Ying-Chieh Chan, Albert Y. Chen, Real-time indoor localization with visual SLAM for in-building emergency response, Automation in Construction, Volume 140, 2022, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104319.

10. Заріцький С., Хлевной О. Розроблення координаційної інформаційної системи управління евакуацією з приміщень для людей із вадами зору. 2023. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/ jspui/bitstream/123456789/14334/1/%D0%97%D0 %B0%D1%80%D1%96%D1%86%D1%8C%D0% BA%D0%B8%D0%B9.pdf

11. Jing, Jingliang. (2024). Simulation Analysis of Fire-Fighting Path Planning Based On SLAM. Highlights in Science, Engineering and Technology. 85. 434-442. 10.54097/35ybya58.

12. Ahn, J., & Han, R. (2011). RescueMe: An indoor mobile augmented-reality evacuation system by personalized pedometry. In *Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference (APSCC)* (pp. 70–77). https://doi.org/10.1109/ APSCC.2011.26

13. Lee J, Park H, Kim Y, et al. Multi-Level Indoor Path Planning and Clearance-Based Path Optimization for Search and Rescue Operations [J]. IEEE Access, 2023.

14. Valizadeh, M., Ranjgar, B., Niccolai, A., Hosseini, H., Rezaee, S., & Hakimpour, F. (2024). Indoor augmented reality (AR) pedestrian navigation for emergency evacuation based on BIM and GIS. Heliyon, 10(12), e32852. https://doi.org/10.1016/ j.heliyon.2024.e32852

15. Hung M., Lin Y., Hsiao C. Virtual reality in building evacuation: A review // Safety Science. 2025. Vol. 178. 104972.

16. Alshowair F., Al-Amri S., Al-Ghunaim S. Use of virtual reality exercises in disaster preparedness: A scoping review // Frontiers in Virtual Reality. 2024. Vol. 5. Article 1368813.

17. Zeng L., Wang R., Hu Z. Using virtual reality to explore the effect of multimodal alarms on human emergency evacuation behaviours // Virtual Reality. 2025. DOI: 10.1007/s10055-025-01141-0.

18. Yen S.-H., Huang Y.-J., Tsai W. Intelligent evacuation sign control mechanism in IoT-enabled buildings // Sensors. 2024. Vol. 24 No. 4. P. 10893.

19. Chen S. The integration of Internet of Things (IoT) technology into fire evacuation plan in high-rise buildings // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2024. Vol. 16 No. 7. P. 42–49.

20. AlQahtani A. S., Alshehri M., Alzahrani F. A. From inception to innovation: A comprehensive review and bibliometric analysis of IoT-enabled fire safety systems // Preprints. 2024. Article 202411.1414.

21. Saputra H., Rahman A., Ismail N. Urban resilience through IoT-based disaster response: An integrative framework // Progress in Disaster Science. 2025. Vol. 19. 102123.

22. Mocanu M., Pavel D., Pop A. Support system integrating assistive technologies for fire evacuation // Applied Sciences. 2025. Vol. 15 No. 21. Article 11416.

23. Ji K., Bills T. S. Wildfire recovery and resilience strategies for resource-constrained and vulnerable communities. Los Angeles : University of California, Institute of Transportation Studies, 2025. 24 с. URL: https://www.its.ucla.edu/publication/wildfire-recovery-and-resilience-strategies-for-resource-constrained-and-vulnerable-communities/

24. Lu Z., Zhou Y., Li Y. A virtual reality exit choice experiment to assess the impact of social influence and fire wardens in a metro station evacuation // Fire Technology. 2025. DOI: 10.1007/s10694-025-01746-6.

25. Kaur R., Singh A., Yadav P. Integrating AI-based visual SLAM with AR navigation for adaptive fire evacuation systems // Automation in Construction. 2025. Vol. 151. 105152. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.105152.

References:

1. Lovreglio, R., & Kinateder, M. (2020). Augmented reality for pedestrian evacuation research: Promises and limitations. Safety Science, 128, 104750. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104750

2. Kinateder, M., Ronchi, E., Nilsson, D., Kobes, M., Müller, M., Pauli, P., & Mühlberger, A. (2014). Virtual reality for fire evacuation research. https://doi.org/10.13140/2.1.3380.9284

3. Cao, L., Lin, J., & Li, N. (2018). A virtual reality based study of indoor fire evacuation after active or passive spatial exploration. Computers in Human Behavior, 90, 37–45. https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.08.041

4. Arias, S., La Mendola, S., Wahlqvist, J., Rios, O., Nilsson, D., & Ronchi, E. (2019). Virtual reality evacuation experiments on way-finding systems for the future circular collider. Fire Technology, 55, 2319–2340. https://doi.org/10.1007/s10694-019-00868-y

5. Lorusso, P., de Iuliis, M., Marasco, S., Domaneschi, M., Cimellaro, G. P., & Villa, V. (2022). Fire emergency evacuation from a school building using an evolutionary virtual reality platform. Buildings, 12(2), 223. https://doi.org/10.3390/buildings12020223

6. Zualkernan, I., Aloul, F., Sakkia, V., Al Noman, H., Sowdagar, S., & Al-Hammadi, O. (2019). An IoT-based emergency evacuation system. In 2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS) (pp. 62–66). https://doi.org/10.1109/IoTaIS47347.2019.8980381

7. Zhang, Z., Tan, L., & Tiong, R. L. K. (2024). Fire emergency management of large shopping malls: IoT-based evacuee tracking and dynamic path optimization. Alexandria Engineering Journal, 107, 652–664. https://doi.org/10.1016/j.aej. 2024.09.008

8. Ibrahim, Z., & He, J. (2024). SLAM technology on disaster response. World Journal of Engineering and Technology, 12, 695–714. https://doi.org/10.4236/wjet.2024.123043

9. Tseng, P.-Y., Lin, J. J., Chan, Y.-C., & Chen, A. Y. (2022). Real-time indoor localization with visual SLAM for in-building emergency response. Automation in Construction, 140, 104319. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104319

10. Заріцький, С., & Хлевной, О. (2023). Розроблення координаційної інформаційної системи управління евакуацією з приміщень для людей із вадами зору. Retrieved from https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/14334/1/Заріцький.pdf

11. Ahn, J., & Han, R. (2011). RescueMe: An indoor mobile augmented-reality evacuation system by personalized pedometry. In Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference (APSCC) (pp. 70–77). https://doi.org/10.1109/APSCC.2011.26

12. Lee, J., Park, H., Kim, Y., & Jung, J. (2023). Multi-level indoor path planning and clearance-based path optimization for search and rescue operations. IEEE Access, 11, 13645–13657. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3242438

13. Jing, J. (2024). Simulation analysis of fire-fighting path planning based on SLAM. Highlights in Science, Engineering and Technology, 85, 434–442. https://doi.org/10.54097/35ybya58

14. Valizadeh, M., Ranjgar, B., Niccolai, A., Hosseini, H., Rezaee, S., & Hakimpour, F. (2024). Indoor augmented reality (AR) pedestrian navigation for emergency evacuation based on BIM and GIS. Heliyon, 10(12), e32852. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32852

15. Hung, M., Lin, Y., & Hsiao, C. (2025). *Virtual reality in building evacuation: A review.* SafetyScience, 178, 104972. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.104972

16. Alshowair, F., Al-Amri, S., & Al-Ghunaim, S. (2024). *Use of virtual reality exercises in disaster preparedness: A scoping review.* Frontiers in Virtual

Reality, 5, 1368813. https://doi.org/10.3389/ frvir.2024.1368813

17. Zeng, L., Wang, R., & Hu, Z. (2025). *Using virtual reality to explore the effect of multimodal alarms on human emergency evacuation behaviours.* Virtual Reality. https://doi.org/ 10.1007/ s10055-025-01141-0

18. Yen, S.-H., Huang, Y.-J., & Tsai, W. (2024). *Intelligent evacuation sign control mechanism in IoT-enabled buildings.* Sensors, 24(4), 10893. https://doi.org/10.3390/s240410893

19. Chen, S. (2024). *The integration of Internet of Things (IoT) technology into fire evacuation plan in high-rise buildings.* International Journal of Intelligent Systems and Applications, 16(7), 42–49. doi.org/10.5815/ ijisa.2024.07.05

20. AlQahtani, A. S., Alshehri, M., & Alzahrani, F. A. (2024). *From inception to innovation: A comprehensive review and bibliometric analysis of IoT-enabled fire safety systems.* Preprints, 202411.1414.org/10.20944/preprints202411.1414.v1

21. Saputra, H., Rahman, A., & Ismail, N. (2025). *Urban resilience through IoT-based disaster response: An integrative framework.* Progress in Disaster Science, 19, 102123. https://doi.org/ 10.1016/j.pdisas.2025.102123

22. Mocanu, M., Pavel, D., & Pop, A. (2025). *Support system integrating assistive technologies for fire evacuation.* Applied Sciences, 15(21), 11416. https://doi.org/10.3390/app152111416

23. Ji, K., & Bills, T. S. (2025). *Wildfire recovery and resilience strategies for resource-constrained and vulnerable communities.* Los Angeles: University of California, Institute of Transportation Studies. https://www.its.ucla.edu /publication/wildfire-recovery-and-resilience-strategies-for-resource-constrained-and-vulnerable-communities/

24. Lu, Z., Zhou, Y., & Li, Y. (2025). *A virtual reality exit choice experiment to assess the impact of social influence and fire wardens in a metro station evacuation.* Fire Technology. https://doi.org/ 10.1007/ s10694-025-01746-6

25. Kaur, R., Singh, A., & Yadav, P. (2025). *Integrating AI-based visual SLAM with AR navigation for adaptive fire evacuation systems.* Automation in Construction, 151, 105152. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.105152

© В. М. Пилипенко, О. В. Хлевной, Н. В. Жезло-Хлевна,
Ю. С. Назар, В. І. Брошко, 2025.
Науково-методична стаття.
Надійшла до редакції 15.10. 2025.
Прийнято до публікації 26.11.2025.