

УДК 004.02[004.9:614.8.084]

В.В. БЕГУН*, С.В. КРУК**

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ВІДВІДУВАЧІВ ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОГО ЦЕНТРУ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

Анотація. У роботі представлено розвиток теми безпеки відвідувачів ТРЦ, а саме опис розробленого алгоритму та програмного забезпечення (ПЗ) розрахунку евакуації з ТРЦ (адмінбудівлі) відповідно до стандартизованого за ДСТУ алгоритму. Незважаючи на відомий алгебраїчний алгоритм, таке ПЗ розроблено вперше. Особливості роботи і статті в тому, що у її основі лежить виконана випускником 2024 року магістратури КНУ дипломна робота. У статті максимально збережено текст оригіналу дипломної роботи через те, що вона на захисті отримала високу оцінку та рекомендацію державної екзаменаційної комісії до друку у науковому журналі. При розробці програми було використано парадигму об'єктно-орієнтованого програмування, що дозволило оптимізувати обчислення шляхом перетворень окремих блоків програми в активні об'єкти. Для моделювання схем маршрутів і часу евакуації у роботі було обрано графи через їх універсальність та здатність ефективно вирішувати задачі, пов'язані з аналізом мережі зв'язків між вузлами. Використана основна перевага графів, яка полягає в їх здатності репрезентувати складні системи зв'язків між об'єктами у простий та зрозумілий спосіб. Кожна ділянка будівлі моделюється як вершина графа, а зв'язки між ними відображають можливі маршрути евакуації. Мовою програмування обрано Python, розробка велась у середовищі PyCharm, що надає широкий спектр функціональностей, спрощуючи процес написання, відлагодження та управління проєктами на мові Python. Було створено класи стандартних модулів на основі об'єктів, необхідних у контексті задачі, та обрані відповідні основні алгоритми обходу графів DFS (Depth-First Search) та BFS (Breadth-First Search), що дозволило цілком переглянути усі маршрути та шляхи евакуації. Стаття є продовженням теми моделювання процесів забезпечення безпеки ТРЦ, яка викликала великий інтерес та численні пропозиції публікацій за тематикою розробки ІТ для безпеки, тобто робота з цієї тематики представляє суспільний інтерес у багатьох країнах світу.

Ключові слова: безпека, торговельний центр, евакуація, план евакуації, час евакуації, алгоритм інформаційної технології, програмне забезпечення, маршрут евакуації.

Abstract. The paper presents the development of the topic of visitor safety in shopping malls, namely, describes the developed algorithm and software for calculating evacuation from a shopping mall (administrative building) in accordance with the algorithm standardized by DSTU. Despite the well-known algebraic algorithm, such software has been developed for the first time. The peculiarity of the work and the article is that it is based on a master's thesis completed by a graduate of Taras Shevchenko National University of Kyiv in 2024. The article preserves the original text as much as possible because, at the thesis defense, the work was highly praised and recommended by the State Examination Commission for publication in a scientific journal. The software has been developed using the object-oriented programming paradigm, which allows for optimizing calculations by transforming individual program blocks into active objects. To model evacuation routes and times, graphs have been chosen because of their versatility and ability to effectively solve problems related to the analysis of the network of connections between nodes. The main advantage of graphs is their ability to represent complex systems of connections between objects in a simple and understandable way. Each building section is modeled as a vertex of the graph, and the connections between them represent possible evacuation routes. Python has been chosen as the programming language, and the development has been carried out in the PyCharm environment, which provides a wide range of functionality, simplifying the process of writing, debugging, and managing Python projects. Some classes of standard modules have been created based on the objects required in the context of the task, and the corresponding basic graph traversal algorithms DFS (Depth-First Search) and BFS

(Breadth-First Search) have been selected, which allowed us to completely review all the routes and evacuation paths. The article continues the topic of modeling safety assurance processes in shopping malls, which has aroused great interest and multiple proposals for publications on the topic of developing IT for security, that is, the work on this subject is of public interest in many countries around the world.

Keywords: security, shopping center, evacuation, evacuation plan, evacuation time, information technology algorithm, software, evacuation route.

DOI: 10.34121/1028-9763-2024-3-4-78-92

1. Вступ

Опис цих об'єктів критичної інфраструктури (КІ) й проблеми безпеки, які з цим пов'язані, детально наведено в [1–3]. В цій роботі досліджуються процеси евакуації людей у ТРЦ під час надзвичайних ситуацій (НС), зокрема, їхні часові характеристики, вплив різних факторів на швидкість і ефективність евакуації на модельному експерименті. У нашій державі існують нормативні вимоги розрахунку часу евакуації, але вручну розрахунків виконати складно, тому для більшості об'єктів КІ, які є громадськими будівлями, ТРЦ тощо, його немає, що призводить до конфлікту господарів з інспекторами. Отже, кваліфікаційні роботи випускників ВНЗ мають відповідати потребам суспільства, так як і взагалі уся діяльність ВНЗ має відстежувати потреби суспільства та всесвітній тренд цифровізації економіки, тому робота була доручена магістру КНУ імені Тараса Шевченка.

Метою статті є рішення науково-практичної задачі з безпеки об'єкта КІ, а саме дослідження стандартної методики обрахунку часу евакуації людей, розроблення алгоритму ІТ й ПЗ для обчислень цього критичного параметра. Другою метою було доведення факту, що студенти старших курсів КНУ мають необхідні компетенції у моделюванні складних систем і здатні розв'язувати актуальні задачі.

Автор метою своєї магістерської роботи бачить створення програми, яка, базуючись на плані евакуації ТРЦ, зможе розрахувати час, необхідний для евакуації людей за визначеним алгоритмом. У рамках дослідження передбачено комплексний аналіз існуючих методів та програмних рішень у цій сфері. Визначення основних чинників, що впливають на час евакуації, та розробка ефективного алгоритму розрахунку є ключовими завданнями дослідження. Крім того, програму можна буде тестувати на реальних або віртуальних моделях ТРЦ із метою перевірки її ефективності та невизначеності прогнозних оцінок.

Час евакуації людей є критичним параметром у розрахунках, пов'язаних із безпекою у випадку НС, таких як пожежі, природні катастрофи тощо. Цей показник є важливим для проведення подальших калькуляцій щодо безпеки персоналу та відвідувачів. Він дозволяє проводити аналіз ризиків та розробляти ефективні заходи щодо покращення безпеки, наприклад, визначення припустимого часу реакції пожежної служби чи рятувальних служб на виклик, урахування часу, необхідного для виходу людей із будівлі, а також порівняння швидкості розповсюдження пожежі.

У подальших калькуляціях безпеки будівель важливо враховувати різноманітні сценарії та умови, щоб забезпечити максимальну ефективність заходів безпеки та мінімізувати можливі ризики для людей, що перебувають у будівлі [1, 2].

Отже, час евакуації людей є ключовим параметром у подальших розрахунках та аналізах, спрямованих на забезпечення безпеки та захисту життя й здоров'я людей. Він має бути таким, щоб імовірність впливу будь-якого небезпечного чинника пожежі (НЧП) була менша допустимого значення. Небезпечними чинниками пожежі є полум'я та іскри, підвищена температура оточуючого середовища, токсичні продукти згоряння і термічного розкладання, дим, знижена концентрація кисню.

2. Аналіз проблеми безпеки ТРЦ

2.1. Вербальний опис об'єкта КІ

Торговельно-розважальний центр — це будівля, яка функціонує з метою обслуговування відвідувачів. Зазвичай це багатопверхова будівля, що містить у собі [1–3]:

- комплекс крамниць: одягу, техніки, аптек, продуктів;
- підприємства побутового обслуговування (ательє, ремонт одягу);
- заклади громадського харчування: кав'ярні, ресторани, бари, заклади швидкого харчування;
- розважальні зони: атракціони, кінотеатри, дитячі центри;
- куточки надання послуг зі сфери краси.

Велика кількість відвідувачів повинна відчувати себе комфортно. Задля цього ТРЦ облаштовані вбиральнями, ескалаторами, системами клімат-контролю, безкоштовним паркінгом та ін. Варіативність для дозвілля робить ТРЦ осередком масової культури. У роздрібних торгових павільйонах можна знайти все, що завгодно. Так, у ТРЦ «Гуллівер» на 8 поверхах налічується понад 250 ексклюзивних і мультибрендових магазинів, в яких продають модний одяг і взуття, вироби зі шкіри, ювелірні прикраси та аксесуари. Торгова площа ТРЦ «Лавина» складає 127 000 м² (12,7 га). ТРЦ містить понад 400 магазинів, є парковка на 4 000 машин, можуть бути десятки тисяч відвідувачів на добу [1].

З точки зору безпеки, ТРЦ є місцем скупчення людей, безпеку яких потрібно гарантувати за українським законодавством, хоча, як правило, у більшості країн-інвесторів такого не передбачено, що, на наш погляд, і створює конфлікти з інспекцією безпеки. Невизначення розрахункового часу евакуації людей у разі пожежі відповідно до ППБУ [6] є підставою для припинення роботи ТРЦ державною інспекцією за порушення правил безпеки.

2.2. Основні визначення

Визначення відповідно до ДСТУ [4]. Основні з них маршрут, шлях евакуації, початкова ділянка наведені нижче.

Час евакуації — час, необхідний для того, щоб усі люди, які перебувають у будівлі або споруді, змогли вийти у безпечне місце (з будівлі).

Шлях евакуації — шлях до евакуаційного виходу з будь-якої точки приміщення, будівлі, або споруди.

Маршрут евакуації — шляхи евакуації, що складаються зі з'єднаних ділянок від диктуючої до евакуаційного виходу.

Ділянка називається тупиковою у тому випадку, коли з них починається маршрут евакуації, не відбувається жодного злиття потоків з інших ділянок чи змін параметрів потоку.

Ділянка називається диктуючою у випадку, коли вона є тупиковою, і для евакуації з неї потрібно критично більше часу, ніж з інших.

План евакуації — це документ, у якому вказано шляхи евакуування та евакуувальні виходи, визначено правила поведінки людей, а також порядок і послідовність дій обслуговуючого персоналу на об'єкті в разі виникнення пожежі.

Приклад частини плану евакуації наведено на рис. 1.



Рисунок 1 — Частина плану евакуації з еваковиходами

2.3. Параметри процесу та їх умовні позначення

Основним параметром є час евакуації персоналу та відвідувачів, який залежить не тільки від особливостей будівлі, її геометричних характеристик, але й від кількості персоналу, його навченості, кількості відвідувачів, що є випадковими величинами. Саме тому створення повної моделі процесу становить труднощі. Тобто математично залежність має такий вигляд:

$$t_p = \Phi(X_i, Y_i(t)),$$

де X_i — постійні параметри ТРЦ, що визначаються, Y_i — змінні параметри.

Інші умовні позначення:

t_p — розрахунковий час евакуації людей;

l_i — довжина ділянки евакуації;

$\delta_i (d_i)$ — ширина ділянки евакуації;

S_i — площа ділянки евакуації;

$N_{1(i)}$ — кількість людей на першій (або i -й) ділянці;

t_1 — час руху людського потоку на першій (початковій) ділянці, хв;

$t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$ — час руху людського потоку на кожній із наступних після першої ділянки шляху, хв;

V_1 — швидкість руху людського потоку по горизонтальному шляху на першій ділянці, м/хв;

f — середня площа горизонтальної проєкції людини, м²/люд., яка приймається відповідно до ДСТУ;

δ_i, δ_{i-1} — ширина розглянутої i -ї та попередньої i -ї ділянки шляху, м;

q_i, q_{i-1} — інтенсивності руху людського потоку по розглянутій i -й і попередній ділянкам шляху, м/хв;

D_i — значення щільності людського потоку на i -му відрізку (Δl) ділянки шляху шириною b_i , люд./м²;

k — тип ділянки, початкова, прохідна, сходи та ін.;

Q_b — розрахункова ймовірність дії НЧП на окрему людину.

Основні параметри людського потоку на ділянках евакуації

1. Щільність людського потоку D_i .

Щільність однорідного людського потоку на першій ділянці шляху D_1 розраховують за формулою

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot b_1},$$

де N_1 — кількість людей на першій ділянці, люд.;

f — середня площа горизонтальної проєкції людини, м²/люд., що приймається відповідно до [4];

b_1 — ширина першої ділянки шляху, м.

2. Інтенсивність людського потоку q_i — метрика, яка характеризує кінетику руху потоку і дорівнює кількості людей, які пройдуть через поперечний переріз шляху одиничної ширини в одиницю часу.

$$q_i = \frac{q_{i-1} \cdot b_{i-1}}{b_i}.$$

Швидкість людського потоку (м/хв) також залежить від виду евакуаційного шляху, щільності потоку та умов евакуації і визначається таблична [5].

2.4. Аналіз процесу та прийнятої методики евакуації людей

Ймовірність запобігання впливу небезпечного чинника пожежі (P_B) визначається [5] для пожежонебезпечної ситуації, за якої місце виникнення пожежі знаходиться на першому поверсі поблизу одного з евакуаційних виходів із будівлі (споруди) і знаходиться за формулою

$$P_B = 1 - Q_B, \quad (1)$$

де Q_B — розрахункова ймовірність дії НЧП на окрему людину.

Рівень забезпечення безпеки людей при пожежі відповідає нормі за такої умови:

$$Q_B \leq [Q_B^i], \quad (2)$$

де $[Q_B^i] = 10^{-6}$ — допустима ймовірність дії НЧП на окрему людину в рік (приймається вимогами з [5]).

Авторами проаналізовано існуючі методики [1, 5, 7] та взято за основу методику ДСТУ [5]. Алгебраїчні формули для визначення усіх параметрів процесу НС, що наведені в ДСТУ, були перетворені у алгоритм інформаційного процесу розрахунків, який було взято за основу створення розрахункової програми.

3. Алгоритм розрахунку фактичного часу, необхідного для евакуації усіх людей з усіх приміщень

На думку авторів, розрахунок можна розбити на чотири основні частини відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 2:

1. Спочатку необхідно проводити аналіз планування приміщень будівлі, аналізувати можливий розвиток пожежних процесів, скласти передбачувану схему евакуації (якщо немає плану евакуації), включаючи зони та маршрути евакуації (блоки 1–3).
2. Визначити початкові (тупикові) ділянки евакуації для усіх наявних маршрутів.
3. Послідовний розрахунок проміжних ділянок евакуації, починаючи від суміжних із диктуючими, закінчуючи евакуаційним виходом із будівлі (приміщення) для всіх шляхів кожного маршруту.
4. Для кожного маршруту евакуації шляхом сумування часу проходження по усіх ділянках обраховується загальний час евакуації.
5. Провести порівняння отриманих результатів із допустимими параметрами.

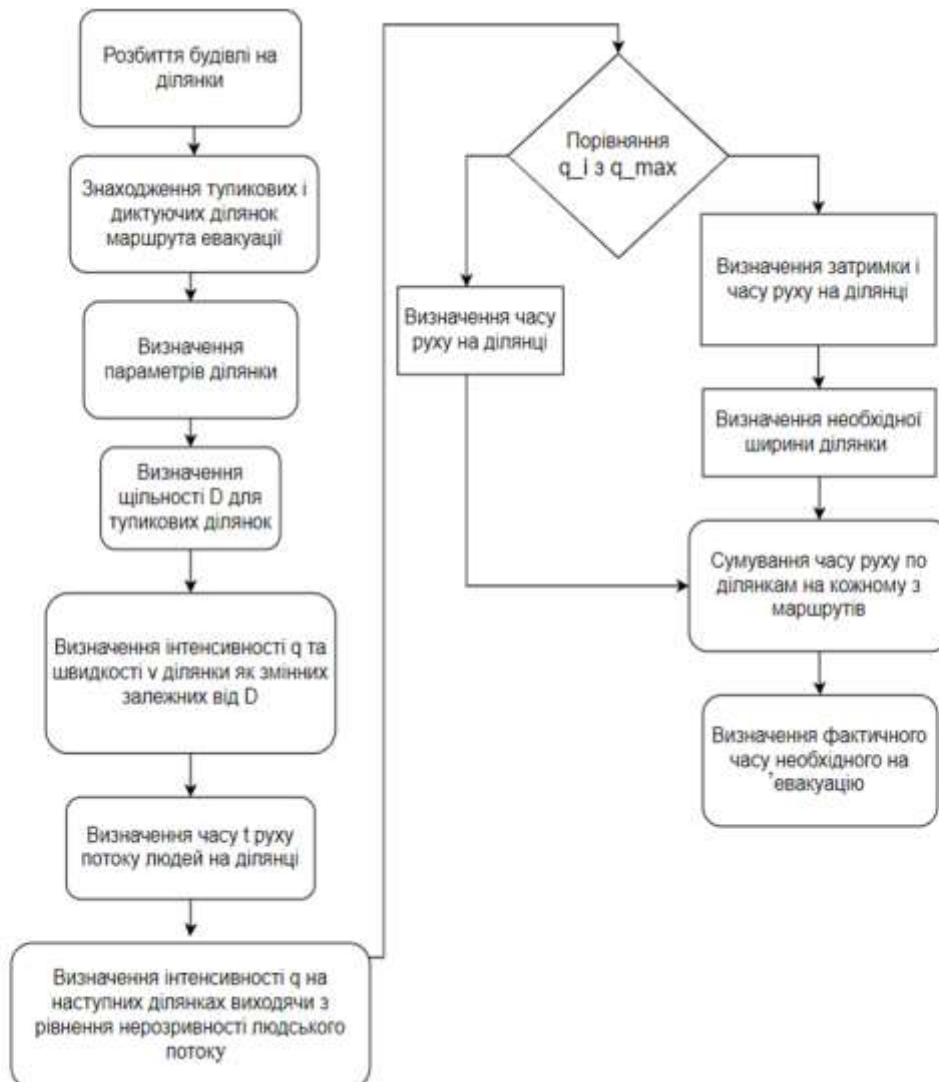


Рисунок 2 — Загальний алгоритм розрахунку часу евакуації

3.1. Основні кроки алгоритму

Розбиття на окремі ділянки

Розбиття на ділянки площі ТРЦ відбувається за планом евакуації та положеннями ДСТУ [5], відповідно до розміщення обладнання та планівки торговельних залів. Визначено декілька сотен розрахункових ділянок, при цьому розбиття відбувається з врахуванням виконання таких вимог:

- Параметри ділянки, ширина та довжина повинні залишатись незмінними впродовж евакуації (розрахунку):

$$\delta_i = const, l_i = const, h_i = const.$$

- Значення ширини та довжини повинні відповідати вимогам їх визначень за ДСТУ.
- Приміщення допускається приймати як одну ділянку за умови, якщо за нормами з нього влаштовують один евакуаційний вихід. При цьому люди розташовуються у найвіддаленішій від виходу точці.

- Розрахунок ділянки відбувається лише за умови, якщо значення інтенсивності потоку людей, необхідне для розрахунку часу евакуації на наступних ділянках, відоме.

- При розрахунку зальних приміщень потрібно спрощувати розрахунок, передбачивши злиття декількох потоків на одній ділянці.

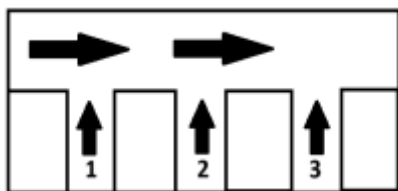


Рисунок 3 — Евакуація з суміжних приміщень у коридор

- Дверний отвір або інше місцеве звуження приймається за окрему ділянку.

- Якщо у громадських будівлях на поверсі розташовані приміщення, які відповідають вимогам, зазначеним вище, і мають виходи в один коридор, то обрахунок слід розпочинати безпосередньо не з цих приміщень, а прийняти коридор як тупикову початкову ділянку, потік з усіх суміжних приміщень — як початковий. Число людей на цій ділянці визначатиметься як сума з суміжних ділянок (рис. 3).

При складанні маршрутів важливо враховувати таке:

- люди завжди прагнуть іти найкоротшим шляхом, де хороша видимість та він легкий для проходження;

- у випадку аварійних ситуацій люди, незнайомі з плануванням будівлі, прямують до виходу, який побачили перед собою на початку евакуації, незважаючи на те, що інший вихід може бути набагато ближче;

- відвідувачі громадських будівель віддають перевагу виходу через той вихід, через який вони зайшли в будівлю;

- люди завжди рухаються в напрямку, протилежному від пожежі, незважаючи на те, що вони могли б скористатися виходом, розташованим у напрямку пожежі.

Порівняння отриманих результатів із допустимими параметрами

Звичайно розрахунки часу евакуації проводяться проєктантами як допустимі значення, приймаються значення часу, що не перевищують час виникнення НЧП. Але з часом експлуатації будівлі умови експлуатації змінюються, тому й прийнято законодавчу вимогу періодичних перерахунків важливих параметрів безпеки.

4. Розробка програмного забезпечення для обрахунку часу евакуації на основі вхідних даних

4.1. Обґрунтування необхідності інструментів, обраних автором для виконання роботи

Для виконання практичної частини роботи, а саме розробки програми для обрахунку часу евакуації, було використано мову Python [8]. Python — це інтерпретована, високорівнева

мова програмування, яка заснована на принципах простоти та читабельності коду. Вона має широкий спектр застосувань, включаючи веброзробку, наукові обчислення, штучний інтелект та багато іншого. Python відома своєю простотою в навчанні, широкою підтримкою бібліотек та активною спільнотою розробників. Розробка велась у середовищі PyCharm [9]. PyCharm — це інтегроване середовище розробки (IDE) для Python, розроблене компанією JetBrains. Воно надає широкий спектр функціональностей, спрощуючи процес написання, відлагодження та управління проєктами на мові Python. PyCharm має потужний редактор коду з автодоповненням, перевіркою синтаксису та іншими корисними функціями, що сприяють підвищенню продуктивності програміста. Крім того, воно інтегрується з системами керування версіями, віртуальними середовищами, а також надає інструменти для тестування та аналізу коду. Для збереження даних було використано базу даних PostgreSQL.

Були задіяні такі бібліотеки Python:

NumPy — це потужна бібліотека для мови програмування Python, що надає високоефективні масиви, об'єкти для векторизованих операцій із даними, а також інструменти для роботи з лінійною алгеброю, випадковими числами та іншими математичними функціями. Однією з ключових особливостей NumPy є її здатність ефективно працювати з великими об'ємами даних завдяки використанню компактних масивів, оптимізованих алгоритмів та низькорівневих механізмів оптимізації, таких як мова програмування C.

Pandas — це потужний інструмент для аналізу та обробки даних у мові програмування Python. Pandas надає структури даних, що дозволяють легко завантажувати, маніпулювати та аналізувати табличні дані. Однією з ключових особливостей Pandas є DataFrame, який дозволяє зручно представляти дані у вигляді таблиці з рядками та стовпцями.

Python-docx — це зручний інструмент для створення та редагування документів у форматі Microsoft Word (.docx) безпосередньо з Python.

Tkinter — це інструментарій для створення графічного інтерфейсу користувача (GUI) у мові програмування Python. Tkinter надає набір вбудованих віджетів і методів для створення вікон, кнопок, полів введення, списків та інших елементів інтерфейсу.

SymPy — це бібліотека символічної математики для мови програмування Python, яка надає можливості для символічних обчислень, символічного розв'язання рівнянь, диференціювання, інтегрування, розв'язання алгебраїчних та тригонометричних виразів та ін.

SQLAlchemy — це потужна бібліотека для роботи з базами даних на мові програмування Python. Вона надає високорівневий інтерфейс для взаємодії з реляційними базами даних, такими як PostgreSQL, MySQL, SQLite та ін., шляхом використання об'єктно-реляційного відображення (ORM).

ReportLab — це потужна бібліотека для мови програмування Python, яка дозволяє створювати документи у форматі PDF. Вона забезпечує високу гнучкість і надає можливість генерувати складні звіти, графіки, таблиці та інші види візуалізації даних.

При розробці програми було використано парадигму об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) — це парадигма програмування, що базується на концепції об'єктів, які мають власні властивості та можуть здійснювати дії. У ООП програми структуруються навколо об'єктів, які взаємодіють між собою, передаючи повідомлення та змінюючи свій стан.

Головні принципи ООП містять у собі спадкування, інкапсуляцію та поліморфізм. Спадкування дозволяє створювати нові класи на основі вже існуючих, розширюючи їхню функціональність. Інкапсуляція дозволяє об'єднати дані та методи, які їх опрацьовують, в один об'єкт, що спрощує управління кодом і забезпечує захист даних від несанкціонованого доступу. Поліморфізм дозволяє використовувати методи різних об'єктів з однаковим інтерфейсом згідно з контекстом виклику.

Використання ООП сприяє підвищенню модульності, розширюваності та підтримки великих проєктів. Класи дозволяють створювати абстракції, які дозволяють розділити програму на окремі компоненти, що спрощує її розуміння та робить код повторно використовуваним. Крім того, ООП дозволяє здійснювати моделювання реальних об'єктів, що сприяє розумінню програми та підвищує її простоту й читабельність.

Загалом, ООП є потужним підходом до програмування, який дозволяє створювати складні та масштабовані програми з високим рівнем структурування та повторного використання коду. Вибір об'єктно-орієнтованого програмування для програми є виправданим, оскільки цей підхід дозволяє моделювати реальні об'єкти, які мають власні властивості та можуть взаємодіяти між собою. Інкапсуляція дозволяє об'єднати дані та методи, пов'язані з евакуаційними виходами, маршрутами евакуації та ділянками, в один об'єкт, що робить код більш структурованим і підтримує зв'язок між різними елементами системи евакуації. Такий підхід спрощує розробку, зрозуміння та підтримку програми, а також робить код більш повторно використовуваним та модульним.

4.2. Постановка завдань щодо розробки ПЗ

Потрібно розробити програму, яка обраховує час евакуації на основі вхідних даних. Повинна бути можливість подати на вхід вже записані дані у табличному форматі або вводити дані через спеціальну форму у графічному інтерфейсі.

Вхідні дані:

- перелік пронумерованих ділянок евакуації згідно з планом евакуації відомої будівлі, їх параметри: довжина, ширина, кількість людей у початковий момент часу та тип ділянки (горизонтальний шлях, сходи, двері тощо);
- перелік пронумерованих маршрутів евакуації згідно з планом евакуації відомої будівлі за таким форматом: Ділянка_a, Ділянка_b, Ділянка_c, ... Ділянка_d, де d — номер ділянки, що є еваковиходом;
- після введення усіх даних програма повинна зробити обрахунок метрик, згаданих у розд. 2 для усіх ділянок, де цей обрахунок потрібен для обрахунку загального часу евакуації;
- після обрахунку по натисканню кнопки можна отримати детальний звіт у форматі Word/pdf обрахунку та висновки по часу евакуації по кожному маршруту евакуації;
- програма додатково повинна зберігати дані у базі даних для використання.

4.3. Реалізація задачі

Було створено такі класи на основі об'єктів, необхідних у контексті задачі (рис. 4).

1. Клас Area зберігає інформацію про ділянку евакуаційного шляху, а саме порядковий номер, кількість людей на ділянці, довжину та ширину ділянки, тип ділянки, довжину сходів (за необхідністю), а також перелік попередніх та наступних (у маршруті евакуації) ділянок.

2. Клас EvacuationRoute відображає кожен евакуаційний маршрут, доступний у плані евакуації, зберігає порядковий номер маршруту, кінцеву ділянку маршруту, довжину маршруту та час евакуації, що буде обрахований у подальшому.

3. Клас Metrics слугує певним сховищем показників, порахованих для попередніх вершин при обрахунку наступних і зберігає пари <Ключ показника, значення>, де ключ показника метрики — унікальна комбінація, з ділянки для якої обраховується показник, назви показника та ідентифікатора того розділу, для потоку з яких ділянок обраховується цей показник. Так, наприклад, для обрахунку інтенсивності потоку з ділянок 2 та 3 у 1 вершині ключ показника дорівнюватиме «Інтенсивність|1|2_3».

4. Клас EvacuationAreas — головний клас, який зберігатиме словник з усіма номе-

рами вершин та відповідними їм об'єктами класу Area, перелік усіх маршрутів евакуації, тобто об'єктів класу EvacuationRoute, перелік усіх еваковиходів (об'єктів класу Area), для яких відбуватиметься обрахунок часу, записані показники ділянок та текстовий масив, що зберігатиме текстові дані, готові для передачі у звіт після обрахунку.

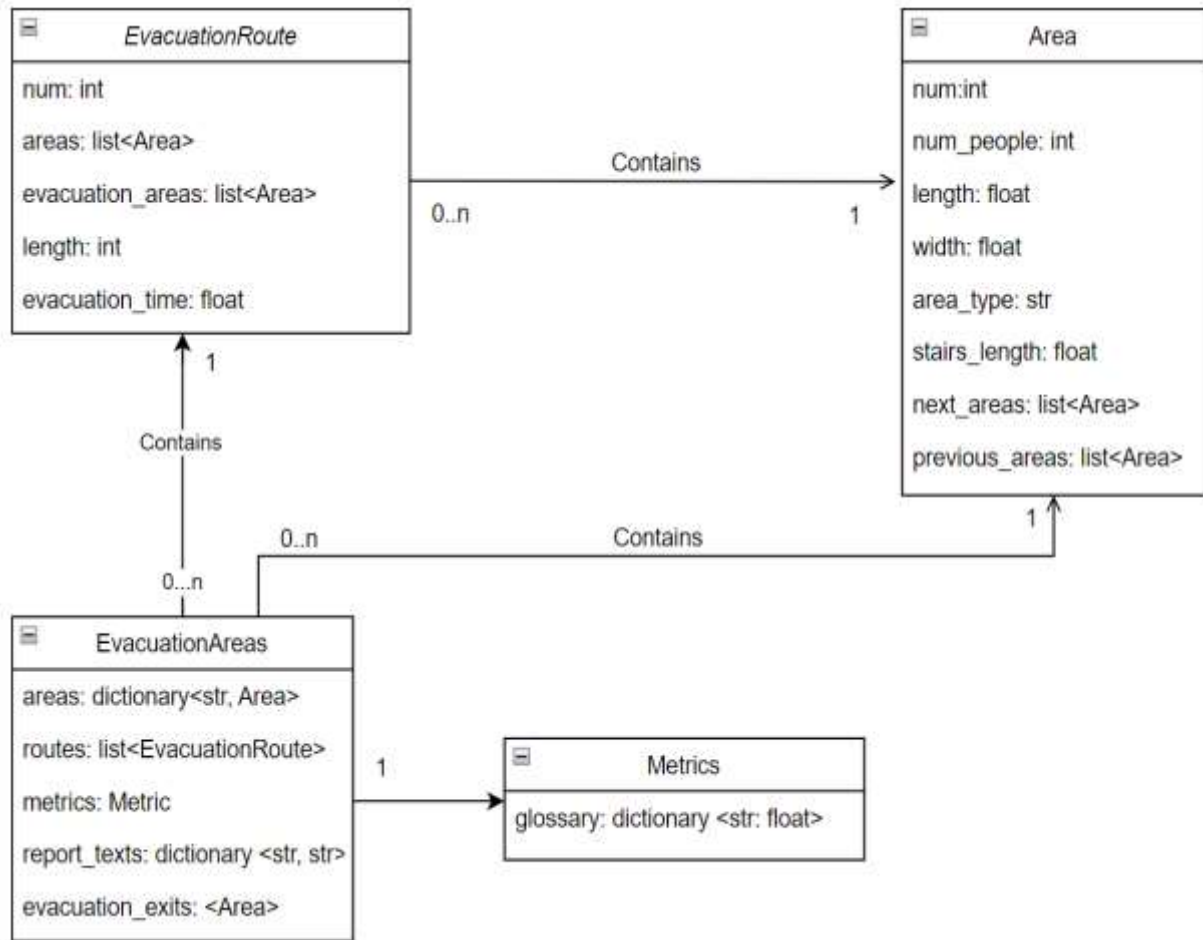


Рисунок 4 — Діаграма класів

Оскільки будівля, для якої ми рахуємо час евакуації, це фактично набір ділянок із певними характеристиками, що пов'язані між собою, то доцільним буде використовувати графи. Графи — це абстрактна математична структура, що використовується для моделювання взаємозв'язків між об'єктами. У роботі було обрано графи для моделювання будівель і часу їх евакуації з причини їх універсальності та здатності ефективно вирішувати задачі, пов'язані з аналізом мережі зв'язків між вузлами. Основна перевага графів полягає в їх здатності репрезентувати складні системи зв'язків між об'єктами у простий та зрозумілий спосіб. У нашому випадку кожна ділянка будівлі моделюється як вершина графа, а зв'язки між ними відображають можливі маршрути евакуації. Ця модель дозволяє аналізувати різні сценарії евакуації, оцінювати час та ефективність різних шляхів, а також розробляти оптимальні стратегії евакуації в разі небезпеки. Графи також дозволяють застосовувати різні алгоритми для розв'язання конкретних завдань.

Отже, використання графів у дипломній роботі є обґрунтованим і дозволяє ефективно моделювати та аналізувати процес евакуації з будівель, забезпечуючи можливість розробки оптимальних стратегій безпеки та захисту.

Основні алгоритми [10, 11] обходу графів DFS (Depth-First Search) та BFS (Breadth-First Search).

DFS є одним з основних алгоритмів обходу графів. Він мандрує настільки глибоко у графі, наскільки можливо перед тим, як відступити.

Починаючи з початкового вузла, DFS вибирає один із його ще не відвіданих «сусідів», переходить до нього і продовжує цей процес, доки не досягне кінця шляху. Якщо він досягає вершини без невідваних сусідів, то повертається назад, вибираючи інший шлях, якщо такий є.

Цей алгоритм може бути реалізований за допомогою рекурсії або стеку.

На відміну від DFS, BFS обходить граф по шарах, спочатку відвідуючи всі сусідні вершини по одному рівні (шару) за один крок, а потім переходячи на наступний рівень.

Починаючи з початкового вузла, BFS відвідує всі його сусідні вершини, потім всі сусідні вершини цих вершин і так далі, доки не буде відвідано всі вершини або не буде знайдений шуканий вузол.

BFS може бути реалізований за допомогою черги.

4.4. Опис алгоритму для (написання коду) задачі

1. Обрати еваковихід.
2. Побудувати граф, що містить усі вершини, з якими він з'єднаний безпосередньо або через інші вершини.
3. Проставити мітку рівня для кожної вершини, де рівень — мінімальна кількість ребер графа, які треба пройти для того, що б дійти від еваковиходу до вершини.
4. Для кожного рівня графа, від 1-ого до n -го, де n -максимальна глибина графа, рекурсивно пройти по сусідніх вершинах до початкової вершини (еваковиходу) і порахувати показники проходження вершин потоками з вершин, розташованих на певному рівні, записуючи їх у пам'ять.
5. Якщо ділянка тупикова, то порахувати щільність потоку, інтенсивність та швидкість на цій ділянці, час проходження потоку.
6. Якщо ділянка нетупикова, то порахувати інтенсивність потоку за законом збереження потоку враховуючи ділянки, потоки з яких переходять у цю ділянку.
7. Маючи дані по усіх потоках та вершинах, порахувати час евакуації до даного еваковиходу.
8. Порахувати загальний час евакуації як максимальний час евакуації по усіх еваковиходах.

5. Опис роботи програми та короткий опис інтерфейсу

Програма має три основних розділи у боковому меню:

- «Areas data» — користувач додає для обрахунку усі ділянки евакуації з плану будівлі, вводить їх основні параметри та бачить таблицю знизу зі збереженими даними.
- «Routes data» — користувач додає для обрахунку усі маршрути евакуації з плану будівлі, вводить їх у форматі Ділянка₁ Ділянка _{$i+1$} ,... Ділянка _{n} , де Ділянка₁ — перша тупикова ділянка маршруту евакуації, Ділянка _{n} — ділянка, що є еваковиходом та бачить таблицю знизу зі збереженими даними.
- «Report» — користувач вводить назву файла для експорту калькуляцій.

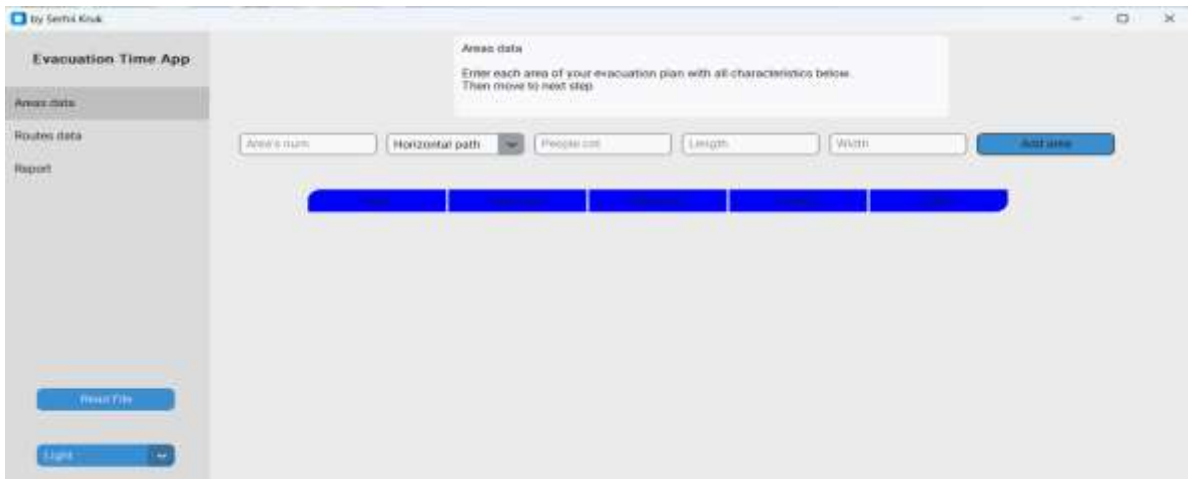


Рисунок 5 — Скриншот програми, розділ «Areas data»

У розділі «Areas data» користувач по чергову вводить усі ділянки евакуації шляхом визначення їх основних параметрів, натискає кнопку «Add area», після чого кожна ділянка додається у таблицю знизу.



Рисунок 6 — Скриншот програми, розділ «Routes data»



Рисунок 7 — Скриншот програми, розділ «Report»

У розділі «Routes data» користувач по чергово вводить усі маршрути евакуації шляхом визначення переліку ділянок евакуацій, з яких він складається, натискає кнопку «Add route», після чого кожен маршрут додається у таблицю знизу.

```
1,horizontal_path,5,24.8,4
2,horizontal_path,3,16,4
3,horizontal_path,3,28.2,2.5
20,horizontal_path,5,28.6,4.4
35,horizontal_path,5,31.5,4
183,doorway,0,0.3,1.8
184,step_down,0,14.4,1.7
185,horizontal_path,0,8,3.2
21,horizontal_path,2,14.7,4.4
23,horizontal_path,3,29.6,2.5
30,horizontal_path,2,16.4,4
165,horizontal_path,0,9,1.8
186,doorway,0,0.3,1.8
187,step_down,0,14.4,1.7
188,horizontal_path,1,5.7,6.9
1,3->185->183->184
2,20->1->185->183->184
3,35->2->1->185->183->184
4,23->188->186->187
5,21->165->30->188->186->187
```

Рисунок 8 — Текстовий вхідний файл для програми

У розділі «Report» [12] користувач по чергово вводить назву файла, у якому буде згенерований звіт із детальним обрахунком часу евакуації.

Окрім ручного вводу даних, є можливість зчитування даних із файла, де дані будуть задаватись у спеціальному форматі для прочитання.

Після натискання кнопки «Export» у директорії програми сформується PDF файл згідно з таким форматом:

- перелік ділянок евакуації з їх характеристиками;
- перелік маршрутів евакуації;
- обрахунок часу евакуації для кожного еваковиходу;
- обрахунок часу евакуації для кожного маршруту конкретного еваковиходу;
- обрахунок загального часу евакуації.

На рис. 8 показано приклад текстового вхідного файла у форматі, який здатна прочитати програма.

Report for calculation time of evacuation in building

Input data for areas:

Num	Length, m	Width, m	People cnt	Square, m2	Area type
1	24.8	4.0	5	99.2	horizontal_path
2	16.0	4.0	3	64.0	horizontal_path
3	28.2	2.5	3	70.5	horizontal_path
20	28.6	4.4	5	125.84	horizontal_path
35	31.5	4.0	5	126.0	horizontal_path
183	0.3	1.8	0	0.54	doorway
184	14.4	1.7	0	24.48	step_down
185	8.0	3.2	0	25.6	horizontal_path
21	14.7	4.4	2	64.68	horizontal_path
23	29.6	2.5	3	74.0	horizontal_path
30	16.4	4.0	2	65.6	horizontal_path
165	9.0	1.8	0	16.2	horizontal_path
186	0.3	1.8	0	0.54	doorway
187	14.4	1.7	0	24.48	step_down
188	5.7	6.9	1	39.33	horizontal_path

There exists 5 escape routes for 2 evacuation exits:

Through 1 evacuation exit people will be evacuated from areas {1, 2, 3, 35, 20, 183,

184, 185} by next evacuation routes:

Path #1 [3, 185, 183, 184]

Path #2 [20, 1, 185, 183, 184]

Path #3 [35, 2, 1, 185, 183, 184]

Рисунок 9 — Формат звіту після виконання програми

На рис. 9 продемонстровано початок звіту з таблицею, яка містить вхідні параметри ділянок евакуації та маршрутів евакуації.

```
Calculation for 1 evacuation exit
Start areas - 1,2,3,35,20
Initial number of people on 3 area - 3
 $N_3 = 3$ 
 $D_3 = (N_3 * 0.125) / S_3 = (3 * 0.125) / 2.5 = 0.15$ 
 $q_3 = 10, V_3 = 70$ 
Time of passage area 3 by the human flow from the area 3
 $t_3 = l_3 / V_3 = 0.014 \text{ min}$ 
Initial number of people on 1 area - 1
 $N_1 = 5$ 
 $D_1 = (N_1 * 0.125) / S_1 = (5 * 0.125) / 4 = 0.156$ 
 $q_1 = 10.25, V_1 = 68.75$ 
Time of passage area 1 by the human flow from the area 1
 $t_1 = l_1 / V_1 = 0.015 \text{ min}$ 
Intensity of human flow from areas 3, 1 on Area 185
is calculated by formula:  $q_{185} = (q_3 * \delta_3 + q_1 * \delta_1) / \delta_{185}$ 
```

Рисунок 10 — Скриншот звіту після виконання програми

На рис. 10 продемонстровано детальний обрахунок часу евакуації для одного евакуаційного виходу.

У протоколі має бути час за шляхами евакуації та маршрутами на еваковиходи для усіх еваковиходів.

6. Попередній підсумок роботи та можливість практичного використання

1. У роботі досліджена задача аналізу руху людських потоків у небезпечній ситуації та розроблено інформаційний алгоритм (метод) обчислення за всіма маршрутами та шляхами евакуації за допомогою теорії графів, що надало можливість створити програмне забезпечення розрахунків важливих параметрів безпеки.

2. Вперше в Україні розроблена програма розрахунків часу евакуації за всіма маршрутами та проведено визначення екстремальних за часом шляхів евакуації мовою Python, що надає можливість повтору розрахунків для будь-якого ТРЦ (громадської будівлі). Дана реалізація ПЗ дозволяє розрахувати час евакуації людей на основі вхідних даних із плану евакуації та отримати детальний звіт з обрахунком для кожного маршруту евакуації, що дозволяє знайти проблемні місця у ТРЦ або інших великих приміщеннях, що, у свою чергу, критично необхідно задля покращення безпеки будівлі.

3. У випускній кваліфікаційній роботі були вирішено такі завдання:

- Вивчено характеристики процесів евакуації людей.
- Проаналізовано та порівняно алгоритми розрахунку часу евакуації.
- Реалізовано програмне забезпечення, яке дозволяє обчислювати час евакуації на основі вхідних даних.

4. Визначення маршрутів та шляхів евакуації за використанням планів евакуації в роботі зроблено вручну. Можливість автоматизації рішень цих завдань у залежності від вхідних даних має два варіанти, а саме:

а) якщо план евакуації має креслення в одному шарі — потрібне розпізнавання ділянок шляхів евакуації для визначення їх геометричних характеристик;

б) план евакуації зроблено у графічному редакторі, наприклад, «КОМПАС», то додатково потрібна розробка інтерфейсу зчитування для визначення параметрів ділянок.

5. Як напрям подальших досліджень бачимо також:

а) удосконалення протоколів виведення — має бути державна мова і такий вид, який зрозумілий інспектору, тобто потрібне узгодження форм;

б) автоматизація вводу даних, тобто автоматичне за планом евакуації визначення маршрутів та шляхів евакуації, параметрів ділянок теж.

7. Висновки

1. На основі ДСТУ у роботі розроблена розрахункова модель евакуації персоналу та відвідувачів ТРЦ під час НС, що надає можливість створення інформаційної технології управління безпекою важливого об'єкта КІ.

2. Розглянуті завдання є науково-практичними задачами, їх успішне рішення підтверджено екзаменаційною комісією КНУ, з чого слідує такий висновок: компетенції магістра (випускника КНУ) достатньо для рішення науково-прикладних задач моделювання складних систем об'єктів КІ.

3. Це дослідження є важливим внеском у підвищення безпеки відвідувачів ТРЦ та оптимізацію процесів евакуації під час надзвичайних ситуацій, воно має стати потрібним для усіх ТРЦ України. Важливо, що це перше в Україні вітчизняне ПЗ, що дозволяє розв'язувати задачі розрахунків евакуації відвідувачів ТРЦ у напівавтоматичному режимі, що дозволяє розробляти науково обґрунтовані заходи запобігання великих ризиків конкретних об'єктів цього класу. Це створює перспективу комерційного використання роботи для потреб оцінок безпеки власниками об'єктів КІ та інспекторських перевірок об'єктів КІ державними службами зі сфері безпеки.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Бегун В.В. Цифрова економіка та питання безпеки ТРЦ України. *Математичні машини і системи*. 2023. № 1. С. 60–71.

2. Begun S., Begun V. A SaaS Concept Based Shopping Center Fire Risk Assessment Model for the Safety Management Applications, *International Journal of Reliability. Quality and Safety Engineering*. 2023. 03 November. 40 p.

3. Бегун В.В., Волошин О.Ф., Бегун С.В. Оптимізація контролю безпеки торговельно-розважальних комплексів на основі аналізу моделей визначення ризику. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей міжнар. наук.-практ. конф. (м. Івано-Франківськ, 15–16 грудня 2022 р.)*. Івано-Франківськ: п. Голіней О.М., 2022. С. 4–6.

4. Національний стандарт України ДСТУ 2272:2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. Чинний від 2006-10-01. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 32 с.

5. ДСТУ 8828:2019. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf.

6. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом МВС України від 30 грудня 2014 р. № 1417 (зареєстровані в Мін'юсті України 05 березня 2015 р. за № 252/26697). *Офіційний вісник України*. 2015. № 26. Ст. 91.

7. Evacuation Timing Computations using different Evacuation Models. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/35466987.pdf>.

8. Python Docs. URL: <https://docs.python.org/3>.

9. PyCharm Guide. URL: <https://www.jetbrains.com/pycharm/guide/>.

10. Graphical User Interfaces with Tkinter. URL: <https://docs.python.org/3/library/tk.html>.

11. Numpy documentation. URL: <https://numpy.org/doc/stable/index.html>.

12. ReportLab documentation. URL: <https://docs.reportlab.com/>.

Стаття надійшла до редакції 26.08.2024