

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
(повна назва)

Кафедра Інформаційних управляючих систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів і моделей розташування станцій екстреної
допомоги при розробці інформаційної системи екстреної медицини
(тема)

Виконала:

здобувачка 2 року навчання,

групи ІУСТМ-24-1

Софія НЕЧЕПОРЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
(код і повна назва спеціальності)

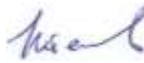
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні управляючі
системи та технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник: професор Наталія ВАСИЛЬЦОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ІУС



(підпис)

Костянтин ПЕТРОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
 Кафедра Інформаційних управляючих систем
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
 (код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
 (освітньо-професійна або освітньо-наукова)
 Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри 
 (підпис)« 24 » листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачі Нечепоренко Софії Андріївні
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів і моделей розташування станцій екстреної допомоги при розробці інформаційної системи екстреної медицини

затверджена наказом по університету від «24» листопада 2025 р. № 1055Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії «19» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Науково-технічна література, публікації та інтернет-ресурси, що стосуються теми кваліфікаційної роботи, дані про виклики екстреної медичної допомоги, геопросторові дані, нормативна база надання екстреної медичної допомоги

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі опис та аналіз сучасного стану функціонування системи екстреної медичної допомоги, аналіз моделей та методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги, аналіз та порівняння моделей та методів вирішення задач розташування об'єктів екстреної медичної допомоги, огляд інформаційних систем у сфері екстреної медичної допомоги, постановка задач дослідження, розробка комбінованого методу розташування станцій екстреної медичної допомоги, розробка технології вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги на основі реалізації комбінованого методу, експериментальна перевірка комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис та аналіз сучасного стану функціонування системи екстреної медичної допомоги	24.11.2025 – 25.11.2025	виконано
2	Аналіз моделей та методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги	26.11.2025 – 27.11.2025	виконано
3	Аналіз та порівняння моделей та методів вирішення задач розташування об'єктів екстреної медичної допомоги	28.11.2025 – 29.11.2025	виконано
4	Огляд інформаційних систем у сфері екстреної медичної допомоги	30.11.2025 – 01.12.2025	виконано
5	Розробка комбінованого методу розташування станцій екстреної медичної допомоги	02.12.2025 – 04.12.2025	виконано
6	Розробка технології вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги на основі реалізації комбінованого методу	05.12.2025 – 07.12.2025	виконано
7	Експериментальна перевірка комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги	08.12.2025 – 10.12.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	11.12.2025 – 12.12.2025	виконано
9	Підготовка презентаційного матеріалу	13.12.2025 – 14.12.2025	виконано
10	Перевірка роботи на плагіат	15.12.2025	виконано
11	Захист кваліфікаційної роботи	19.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 24 листопада 2025 р.

Здобувачка



(підпис)

Керівник роботи



(підпис)

професор Наталія ВАСИЛЬЦОВА

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 108 с., 35 рис., 11 табл., 1 дод., 46 джерел.

ГРАФОВА МОДЕЛЬ, ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА, ЕКСТРЕНА МЕДИЧНА ДОПОМОГА, КЛАСТЕРИЗАЦІЯ, МЕТОД, МОНТЕ-КАРЛО, Р-МЕДІАНИ, РОЗТАШУВАННЯ, СТАНЦІЇ ЕКСТРЕНОЇ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

Об'єктом дослідження в роботі є процеси розташування організаційних об'єктів, які призначені для надання екстреної медичної допомоги населенню в стабільних і нестабільних умовах функціонування.

Метою даної роботи є дослідження методів та моделей розташування об'єктів надання екстреної медичної допомоги в стабільних і нестабільних умовах функціонування для ефективного вирішення цієї задачі в інформаційній системі екстреної медицини.

Для досягнення поставленої мети в роботі реалізовано такі задачі дослідження: проаналізовано існуючі моделі та методи розташування організаційних об'єктів екстреної медичної допомоги; вдосконалено існуючі методи розташування медичних організаційних об'єктів з урахуванням особливостей екстреної медичної допомоги; розроблено комбінований метод розташування станцій екстреної медичної допомоги; практично реалізовано комбінований метод вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги; експериментально перевірено розроблений метод і технологію вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги при розробці інформаційної системи екстреної медицини.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 108 pages, 35 figures, 11 tables, 1 appendix, 46 sources.

GRAPH MODEL, ROAD NETWORK, EMERGENCY MEDICAL CARE, CLUSTERING, METHOD, MONTE CARLO, P-MEDIAN, LOCATION, EMERGENCY MEDICAL CARE STATIONS

The object of study in this work is the processes involved in locating organizational objects designed to provide emergency medical care to the population under stable and unstable operating conditions.

The purpose of this work is to investigate methods and models for locating emergency medical care facilities under both stable and unstable operating conditions, to develop an effective solution within the emergency medical information system.

To achieve this goal, the following research tasks were implemented in this work: existing models and methods for locating organizational objects of emergency medical care were analyzed; existing methods for locating medical organizational objects were improved, taking into account the specifics of emergency medical care; a combined method for locating emergency medical care stations was developed; a combined method for solving the problem of finding emergency medical stations was implemented in practice; the developed method and technology for solving the problem of locating emergency medical stations were experimentally tested during the development of an emergency medical information system.

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз існуючих методів вирішення задачі розташування об'єктів системи екстреної медичної допомоги.....	12
1.1 Опис та аналіз сучасного стану функціонування системи екстреної медичної допомоги.....	12
1.2 Аналіз моделей та методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги.....	22
1.2.1 Аналіз використання моделей і методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги в стабільних умовах функціонування.....	22
1.2.2 Аналіз використання моделей і методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги в нестабільних умовах функціонування	28
1.2.3 Аналіз та порівняння моделей та методів вирішення задач розташування об'єктів екстреної медичної допомоги.....	30
1.3 Огляд інформаційних систем у сфері екстреної медичної допомоги.....	33
1.4 Постановка задачі дослідження.....	36
2 Розробка комбінованого методу розташування станцій екстреної медичної допомоги.....	39
2.1 Опис базових складових комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги.....	39
2.2 Моделювання зони покриття об'єктами ЕМД адміністративно-територіальних одиниць.....	41

2.3	Планування розташування станцій ЕМД в стабільних умовах їх функціонування.....	45
2.4	Перепланування розташування станцій ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування.....	46
2.5	Опис і аналіз особливостей використання комбінованого методу розташування станцій екстреної медичної допомоги.....	47
2.6	Прогнозування стабільності результатів розташування станцій екстреної допомоги в нестабільних умовах функціонування.....	50
3	Технологія вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги на основі реалізація комбінованого методу.....	52
3.1	Загальний опис базових елементів інформаційної технології вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги.....	52
3.2	Розробка алгоритму вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги з використанням комбінованого методу.....	55
3.3	Візуальне моделювання процесу вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги в стабільних і нестабільних умовах функціонування.....	60
3.4	Розробка і опис елементів структури інформаційної системи екстреної медицини.....	63
4	Експериментальна перевірка розробленого комбінованого методу розташування станцій екстреної допомоги.....	66
4.1	Опис початкового етапу дослідження та перевірки розробленої технології вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги.....	66
4.2	Опис результатів експериментальної перевірки комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги.....	71

4.3 Висновки до розділу 4.....	82
Висновки.....	84
Перелік джерел посилання.....	86
Додаток А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи	93

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ГІС – геоінформаційна система

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій

ЕМД – екстрена медична допомога

ЕСОЗ – електронна система охорони здоров'я

ЄС – Європейський Союз

ІАС – інформаційно-аналітична система

ІС – інформаційна система

ІТ – інформаційна технологія

КМУ – Кабінет Міністрів України

МК – медицина катастроф

МОЗ – Міністерство охорони здоров'я

НС – надзвичайна ситуація

СППР – система підтримки прийняття рішень

API – Application Programming Interface

CLOPE – Clustering with LOng PEriod

GPS – Global Positioning System

MCLP – Maximal Covering Location Problem

OSM – OpenStreetMap

QGIS – Quantum Geographic Information System

UML – Unified Modeling Language

ВСТУП

Одним з пріоритетних напрямків діяльності держави є забезпечення громадян доступною та якісною медичною допомогою. Ця діяльність у політиці Уряду України на теперішній час пов'язана з комплексним реформуванням охорони здоров'я. Реформа у сфері охорони здоров'я спрямована на створення системи надання медичних послуг, яка орієнтована на пацієнта та здатна забезпечити рівний доступ населення до якісної медичної допомоги [1-3].

В Україні розроблена й прийнята стратегія розвитку системи охорони здоров'я до 2030 року, яка орієнтується на провідні національні документи та міжнародний досвід, включаючи стратегічні документи керівництва Всесвітньої організації охорони здоров'я, Європейського Союзу (ЄС), а також найкращі практики країн ЄС, Великої Британії, США та інших країн [3]. Стратегія розвитку системи охорони здоров'я до 2030 року спрямована на вдосконалення та розвиток системи охорони здоров'я населення, зокрема гарантування доступності та раціонального використання в державі ефективних та безпечних лікарських засобів належної якості, та забезпечення доступу населення України до якісних послуг охорони здоров'я [3].

Щоб система охорони здоров'я за прийнятою стратегією розвитку на 100% відповідала потребам пацієнтів і сучасним вимогам, у ній постійно триває низка трансформаційних процесів в усіх сферах діяльності цієї системи.

Одним із найважливіших завдань галузі охорони здоров'я України в рамках розробленої стратегії є забезпечення населення України, яке знаходиться у невідкладних станах, своєчасною та ефективною екстреною медичною допомогою (ЕМД) [4, 5]. Система ЕМД на сьогодні особливо потребує ефективного управління та оперативної реакції на виклики часу, а саме реформування в контексті викликів надзвичайних ситуацій мирного та воєнного

часу [6]. Реформування, яке проводиться в системі ЕМД, стосуються як системи надання медичної допомоги, так і використання існуючих ресурсів, в тому числі інформаційних, наукових [7].

Особлива увага в галузі охорони здоров'я приділяється розробці та вдосконаленню інформаційних систем (ІС) для ЕМД, що пов'язано із змінами та необхідністю вдосконалення існуючих в цій сфері бізнес-процесів [8]. Інвестиції в розвиток наукових досліджень (описових, аналітичних, експериментальних) у сфері громадського здоров'я створюють можливість для об'єктивного аналізу ситуації та обґрунтування розробки політики, програм організації надання послуг у сфері охорони здоров'я, зокрема на рівні первинної медичної допомоги.

Законом [4] в рамках державної політики у сфері охорони здоров'я та у сфері освіти і науки передбачається розвиток наукових досліджень за напрямками «Медицина невідкладних станів» та «Медицина катастроф» шляхом замовлення конкретних фундаментальних та/або прикладних наукових досліджень з метою впровадження їх результатів у діяльність системи ЕМД та медицини катастроф. Такі дослідження планується проводити науковими установами та навчальними закладами.

Дослідження методів та моделей розташування об'єктів екстреної допомоги в стабільних і нестабільних умовах функціонування є метою даної кваліфікаційної роботи, теоретичним і практичним результатом якої повинно стати ефективне вирішення цієї задачі в інформаційній системі екстреної медицини.

В кваліфікаційній роботі розробляється комбінований метод вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги, який ґрунтується на використанні моделей кластерного аналізу, оптимізаційних моделях (моделі р-медіан) та імітаційному моделюванні з використанням методу Монте-Карло.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗТАШУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ СИСТЕМИ ЕКСТРЕНОЇ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

1.1 Опис та аналіз сучасного стану функціонування системи екстреної медичної допомоги

Система екстреної (невідкладної) медичної допомоги є складовою частиною системи охорони здоров'я та забезпечує надання невідкладної допомоги населенню у випадку раптових захворювань, травм, аварій, стихійних лих чи військових дій. ЕМД полягає у здійсненні медичними працівниками різного рівня згідно із законами та іншими нормативними документами [4, 5] невідкладних організаційних, діагностичних та лікувальних заходів, які спрямовані на врятування та збереження життя людини у невідкладному стані, а також на мінімізацію наслідків впливу такого стану на її здоров'я.

На сьогодні реалізація функціонування системи ЕМД відбувається за такими загальними напрямками (видами):

- наземна ЕМД [4, 5];
- аеромедична евакуація [9, 10];
- водна ЕМД [11].

Кожний з наведених видів ЕМД має особливості функціонування, які пов'язані з:

- адміністративно-територіальною та організаційною структурою об'єктів системи ЕМД;
- методами і засобами надання медичної допомоги населенню;
- способами комунікації (оперативної взаємодії) з відповідним центром ЕМД, об'єктами, які надають вторинну медичну допомогу, та іншими об'єктами, які пов'язані з діяльністю ЕМД (наприклад, суб'єктами державної авіації,

Державною службою з надзвичайних ситуацій (ДСНС), аварійно-рятувальними службами тощо);

- видами транспортних засобів, на яких базується кожний вид ЕМД, та використовуваних ними транспортних схем.

Ці особливості безпосередньо впливають на ефективність функціонування усієї системи ЕМД різних видів й, зокрема, на ефективність вирішення складної задачі розташування об'єктів, які надають первинну невідкладну медичну допомогу.

Основними принципами функціонування системи ЕМД є [4]:

- постійна готовність до надання ЕМД;
- оперативне та цілодобове реагування на виклики ЕМД;
- доступність та безоплатність ЕМД, її своєчасність, якість та пріоритетність;
- послідовність та безперервність надання ЕМД та її відповідність єдиним вимогам;
- регіональна екстериторіальність.

Організація функціонування системи ЕМД усіх видів базується на основних загальних нормативних показниках, до яких відносяться [4, 5, 9-11]:

- нормативи прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями, що належать до категорії критичних;
- нормативи прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями, що належать до категорії екстрених;
- порядок застосування авіаційних, водних, автомобільних спеціальних санітарних транспортних засобів;
- нормативи покриття об'єктами ЕМД відповідних адміністративно-територіальних одиниць.

Ці показники і нормативи організації функціонування ЕМД впливають на вирішення задачі розміщення об'єктів, які надають медичну допомогу при використанні різних видів транспортних засобів.

Розглянемо загальні принципи організації функціонування системи ЕМД для кожного виду такої системи: наземної ЕМД, аеромедичної евакуації, водної ЕМД.

Наземна ЕМД – це основний і найбільш поширений вид ЕМД, яка здійснюється за допомогою мобільних бригад, що прибувають на місце події на автомобілях швидкої (екстреної) допомоги [4, 5]. Цей вид ЕМД спирається на автомобільну дорожню мережу і використовує спеціалізований транспорт – від звичайних машин швидкої допомоги до реанімобілів. Проте успішність надання цього виду медичної допомоги дуже залежить від типу місцевості.

У щільних міських умовах основною треба враховувати не тільки відстань до місця виклику, а й час прибуття бригади ЕМД до цього місця. Дорожні затори, вузькі вулиці та щільна забудова стають серйозною перешкодою для подолання відстані в строго зазначений час.

У сільській місцевості щільність населення низька, а відстані дуже великі. Суттєвими перешкодами може бути погане асфальтне покриття або повна його відсутність, через це за поганих погодних умов дороги стають важко прохідними. Отже, виникає потреба в транспорті підвищеної прохідності.

Нормативи прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями, що належать до категорії критичних, становлять 10 хвилин, а тих, що належать до категорії екстрених, становлять 20 хвилин з моменту надходження звернення до диспетчера прийому виклику оперативно-диспетчерської служби центру ЕМД та медицини катастроф [4].

Якщо виникають обставини, які не залежать від організації системи надання ЕМД, наприклад, ускладнений дорожній рух, метеорологічні умови,

сезонні особливості, епідеміологічна ситуація тощо, допускається таке перевищення зазначених нормативів [4]:

- не більше ніж у 25 відсотках випадків для категорії критичних ситуацій;
- не більше ніж у 15 відсотках випадків для категорії екстрених ситуацій.

Аеромедична евакуація пов'язана з транспортуванням осіб, що потребують медичної допомоги, до закладів охорони здоров'я повітряним транспортом з наданням належної медичної допомоги на борту повітряного судна [9, 10].

Аеромедична евакуація є незалежним від дорожньої мережі видом ЕМД. Регіоном базування об'єктів ЕМД в цьому випадку є область, на території якої базується повітряне судно та здійснюють чергування екіпажі та бригади, залучені до виконання завдань медичної допомоги.

В літературі [9, 10] наведені основні положення щодо здійснення експериментального проекту в галузі аеромедичної евакуації, який передбачає виконання таких завдань:

- надання ЕМД людині у невідкладному стані або у випадку загрози здоров'ю людини, якщо перевезення повітряним транспортом скорочує час до моменту госпіталізації у відділення ЕМД або до спеціалізованого медичного центру;

- перевезення повітряним транспортом між закладами охорони здоров'я пацієнтів, які потребують обов'язкового медичного супроводу, якщо перевезення наземним транспортом ускладнене об'єктивними причинами та/або може призвести до значного погіршення стану здоров'я;

- перевезення повітряним транспортом пацієнтів з гірських або важкодоступних районів у зв'язку з погодними чи іншими несприятливими умовами у випадку, коли перевезення наземним транспортом ускладнене об'єктивними причинами.

Нормативи готовності екіпажу повітряного судна та бригади ЕМД до вильоту становить незалежно від пори року [9]:

- до 5 хвилин у денний час для викликів у радіусі 100 кілометрів;
- до 15 хвилин у денний час для викликів у радіусі понад 100 кілометрів;
- до 15 хвилин у нічний час для викликів у радіусі 100 кілометрів;
- до 30 хвилин у нічний час для викликів у радіусі понад 100 кілометрів.

У разі вильоту в гірські чи інші важкодоступні райони час готовності може бути збільшено, але не більше ніж на 15 хвилин.

Незаперечною сферою застосування такого виду ЕМД, як аеромедична евакуація, є гірська та важкодоступна місцевість. Особливість полягає у високих вимогах до навичок пілота та в складності пошуку безпечного місця для посадки поблизу місця виклику.

Санітарна авіація, яка здійснює аеромедичну евакуацію, має особливості функціонування, а саме, велику залежність від погодних умов. Сильний вітер, туман, низька хмарність або умови обмерзання можуть унеможливити виліт.

Найбільш специфічним видом ЕМД є водний, який звичайно застосовується у прибережних зонах та архіпелагах, але може й застосовуватися на великих річках, озерах та водосховищах, якщо раптова подія трапилася на воді. Особливістю є те, що даний вид ЕМД може використовуватися при виникненні нестабільних погодних умов, таких як повені та паводки, оскільки дорожня мережа стає затопленою.

В Україні даний вид ЕМД надається тільки за співпраці з ДСНС України, оскільки саме ДСНС транспортує водним шляхом постраждалих до медиків або медиків до постраждалих [12].

Дослідженням з'ясовано, що незалежно від регіональних особливостей та видів ЕМД такі вимоги як своєчасність, якість надання ЕМД, використання єдиних стандартів і алгоритмів надання ЕМД, якісне вирішення задачі

розташування об'єктів надання первинної ЕМД залишаються основоположними в процесі планування функції та структури системи ЕМД [13].

Організація надання різних видів ЕМД здійснюється шляхом створення у кожному регіоні країни системи екстреної допомоги, складовими частинами якої є такі основні організаційні об'єкти [4]:

- центр ЕМД та медицини катастроф;
- станції ЕМД;
- бригади ЕМД;
- відділення екстреної (невідкладної) медичної допомоги в рамках закладів охорони здоров'я (лікарень, шпиталів тощо).

Організація надання екстреної медичної допомоги має чітку ієрархічну структуру.

Головним елементом (базою) є центр ЕМД та медицини катастроф, що являє собою заклад охорони здоров'я, основним завданням якого є забезпечення організації та надання ЕМД на території відповідної адміністративно-територіальної одиниці [4].

Координацію всіх дій та управління викликами в межах центру здійснює оперативно-диспетчерська служба центру ЕМД та медицини катастроф, яка є структурним підрозділом центру. Центр ЕМД з використанням телекомунікаційних мереж, програмних, технічних та інших засобів забезпечує у цілодобовому режимі прийняття, формування та передачу інформації про виклики ЕМД та інформаційну підтримку та координацію дій бригад ЕМД і закладів охорони здоров'я щодо надання ЕМД [4].

Основною структурною одиницею, що забезпечує готовність до виїздів за викликом, є станція ЕМД. Вона є закладом охорони здоров'я, основне завдання якої – це забезпечення постійної готовності бригад ЕМД до надання медичної допомоги відповідно до положень Закону «Про екстрену медичну допомогу» у

цілодобовому режимі та координація їх діяльності з оперативно-диспетчерською службою центру ЕМД на території відповідної адміністративної одиниці [4].

Рішення про утворення та припинення функціонування станції ЕМД в Україні приймається органами місцевого самоврядування з урахуванням положень та нормативних документів, наведених в [4, 14].

Виконавцем основних задач станції екстреної допомоги є бригада ЕМД. Вона являє собою структурну одиницю станції ЕМД або центру ЕМД, завданням якої є надання ЕМД людині у невідкладному стані безпосередньо на місці події та під час перевезення такої людини до закладу охорони здоров'я [4].

З метою виконання нормативу прибуття бригаад ЕМД до місця події, що становить 10 хвилин з моменту надходження звернення до диспетчера та прийому виклику оперативно-диспетчерської служби [11], можуть утворюватися станції, пункти постійного або тимчасового базування бригад.

Результативність функціонування станцій ЕМД, стаціонарних та мобільних підрозділів закладів охорони здоров'я у більшості випадків залежить від їх просторового розташування, тому що від цього визначається час прибуття бригади ЕМД до місць викликів, можливість евакуації постраждалих у рамках нормативно визначеної зони покриття станцій [11]. Кількість станцій, пунктів постійного або тимчасового базування бригад екстреної допомоги, їх місцезнаходження та закріплення за ними зон відповідальності визначається і затверджується керівником центру ЕМД.

Пункт постійного базування бригади ЕМД – це місце розташування бригади ЕМД та спеціалізованого санітарного транспорту, пристосоване та обладнане для її роботи у цілодобовому режимі [4].

Пункт тимчасового базування бригади ЕМД – це місце тимчасового перебування бригади для забезпечення своєчасного надання ЕМД, у тому числі під час проведення масових заходів та заходів за участю осіб, стосовно яких здійснюється державна охорона [4].

Розрахунок необхідної кількості та планування місцезнаходження пунктів постійного і тимчасового базування бригад ЕМД для своєчасного надання населенню медичної допомоги виноситься на розгляд органу, уповноваженого управляти центром ЕМД та медицини катастроф.

Згідно зі статтею 10 Закону України «Про екстрену медичну допомогу» [4], основною лікарняною базою для надання ЕМД визначено багатопрофільні лікарні, у яких мають створюватись спеціалізовані відділення екстреної допомоги.

Багатопрофільна лікарня складається з декількох спеціалізованих відділень (терапевтичне, хірургічне, нейрохірургічне, травматологічне, кардіологічне тощо), що забезпечує повний цикл діагностики та лікування пацієнта, який потребує екстреної допомоги. Завдяки цьому зникає необхідність переведення пацієнта до іншого закладу, що значно зменшує ризики смертності пацієнтів.

Відділення ЕМД є структурним підрозділом багатопрофільної лікарні, в якому у цілодобовому режимі забезпечується надання медичної допомоги пацієнтам, доставленим бригадами ЕМД чи іншими особами, та пацієнтам, які звернулися за наданням такої допомоги чи іншої невідкладної медичної допомоги особисто [15].

Система ЕМД працює згідно з нормативами часу прибуття бригад ЕМД на виклик, тому багатопрофільні лікарні є основними точками логістичного ланцюга, оскільки вони приймають більшість викликів, що потребують екстреної шпиталізації, і забезпечують продуктивне використання транспортних ресурсів.

Узагальнена схема організаційної структури системи ЕМД на обласному організаційно-територіальному рівні управління представлена на рис. 1.1.

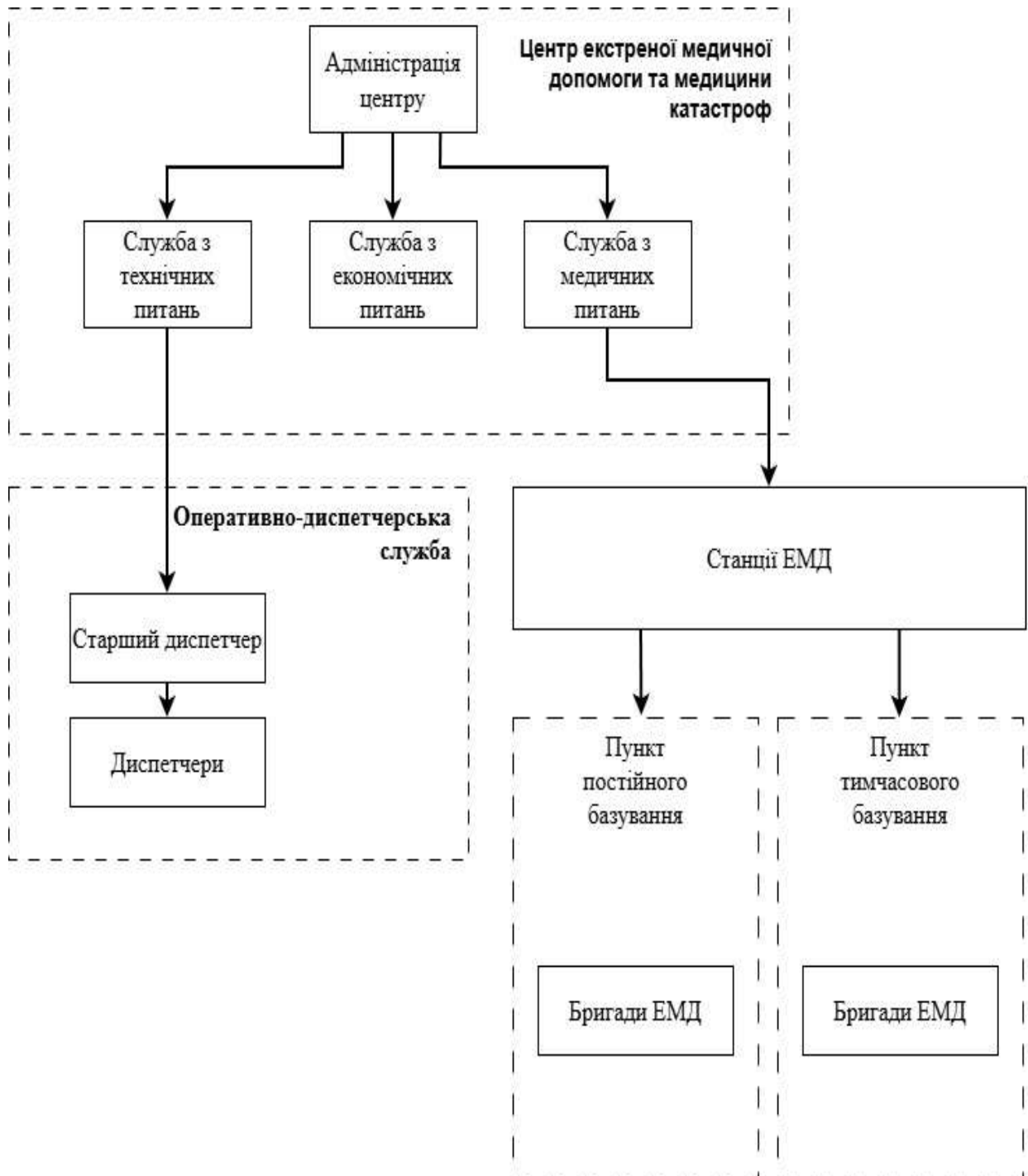


Рисунок 1.1 – Фрагмент схеми організаційної структури системи ЕМД

У стабільних умовах функціонування системи ЕМД планування мережі її об'єктів здійснюється з урахуванням:

- щільності населення;
- транспортної інфраструктури;
- рівня захворюваності;
- історичних даних щодо викликів.

Однак у випадку нестабільних умов функціонування системи ЕМД (природні катастрофи, техногенні аварії, воєнні дії тощо) класичні підходи до планування розташування її об'єктів стають недостатніми.

Проблема вирішення задачі розташування станцій ускладнюється такими факторами:

- руйнування або блокування транспортних шляхів;
- відсутність стабільного електропостачання та водопостачання;
- ризик для життя медичного персоналу;
- раптове зростання кількості викликів та поява великої кількості тяжкопоранених одночасно;
- неможливість використання частини стаціонарної інфраструктури через пошкодження або окупацію територій.

Міжнародний досвід свідчить, що у випадках великих катастроф (наприклад, ураган Катріна у США 2005 року, землетруси на Гаїті 2010 року, цунамі в Японії 2011 року, війна в Сирії, тайфун Хайян на Філіппінах 2013 року) найбільш дієвою була стратегія поєднання централізованих стаціонарних станцій з пересувними пунктами екстреної допомоги, що дозволяє пристосувати систему ЕМД до мінливих умов [16].

В Україні дана проблема стала надто актуальною після початку повномасштабної збройної агресії у 2022 році, коли традиційна мережа підстанцій в окремих регіонах була зруйнована, а надання допомоги стало можливим лише за рахунок мобільних бригад, польових шпиталів та перебудові маршрутів. Реформування системи ЕМД відбувається в умовах безпрецедентних викликів, спричинених повномасштабною військовою агресією.

Це вимагає адаптації системи до воєнних реалій, тому в її рамках, зокрема, були створені бригади медицини катастроф, до функціональних обов'язків яких входить надання допомоги при масових випадках, у тому числі при застосуванні зброї масового ураження (хімічної, біологічної чи радіологічної). У відповідь на нові загрози Міністерство охорони здоров'я України (МОЗ) України оперативно розробило та затвердило додаткові методичні рекомендації для бригад ЕМД, що регламентують надання допомоги постраждалим в умовах бойових дій та внаслідок дії специфічних боєприпасів, наприклад, фосфорних [6].

1.2 Аналіз моделей та методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги

1.2.1 Аналіз використання моделей і методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги в стабільних умовах функціонування

Для ефективного розв'язання складної задачі розташування організаційних об'єктів ЕМД в умовах стабільного попиту на обслуговування (за відсутності значних коливань попиту, катастроф, воєнних дій тощо) застосовується ряд методів та методів, які спрямовані на знаходження наближених оптимальних рішень, що мінімізують час прибуття бригади ЕМД на виклик та забезпечують максимальне покриття території, яка обслуговується бригадами ЕМД.

У стабільних умовах функціонування системи ЕМД при вирішенні задачі розташування відділень ЕМД багатопрофільних лікарень, станцій екстреної допомоги, пунктів постійного базування бригад ЕМД найчастіше застосовуються детерміновані підходи, методи та моделі [17-25]:

- класичні моделі розташування об'єктів (модель р-медіан [17], модель максимального покриття (MCLP) [18], модель мінімізації максимальної відстані між об'єктами [19]);
- лінійне та цілочисельне програмування для розв'язання задач мінімізації відстані або часу прибуття бригади ЕМД на виклик [20];
- евристичні алгоритми (метод найближчого сусіда [21], жадібні алгоритми пошуку покриття [22], метод кластеризації k-середніх [23]);
- мережеві графові моделі, у яких транспортна інфраструктура подається у вигляді графа, а відстані між вузлами визначаються, наприклад, за алгоритмами Дейкстри або Флойда-Воршелла [24].

Сучасні підходи до вирішення проблеми розміщення організаційних об'єктів ЕМД часто спираються на класичні моделі оптимізації, які були ретельно проаналізовані та адаптовані впродовж останніх десятиліть [25-26]

Однією з основних моделей, як зазначають провідні дослідники у цій галузі, є модель р-медіан [17].

Класифікація моделей може проводитись й в рамках ширших категорій розташування-розподілу, зокрема, за критеріями доступності та адаптивності. Під доступністю розуміють здатність системи ЕМД ефективно обслуговувати пацієнтів за поточних, короткострокових умов. Натомість, адаптивність передбачає врахування довгострокових перспектив та невизначеності майбутніх сценаріїв, щоб забезпечити стійку та ефективну роботу служб системи ЕМД.

Моделі, орієнтовані на доступність, є переважно статичними, тобто їхня мета – це максимізувати охоплення населення медичною допомогою або мінімізувати середній час прибуття екстреної допомоги шляхом оптимального розташування баз (об'єктів) ЕМД [27].

Модель р-медіан мінімізує середній час прибуття бригади ЕМД до всіх місць, з яких надійшли виклики. Ця модель використовується при рівномірному розподілі населення та доступності транспортної інфраструктури.

Модель р-медіан можна представити у вигляді формули:

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i * d(x_i, X_p), \quad (1.1)$$

де n – кількість вузлів мережі, яка обслуговується;

ω_i – ваговий коефіцієнт i -го вузла (кількість викликів екстреної допомоги, чисельність населення, частота подій);

x_i – координата або вершина мережі;

X_p – множина розміщених медіан (вершин);

$d(x_i, X_p)$ – відстань від вузла i до найближчої медіани.

Результатом використання моделі є певна множина вершин (медіан), для якої сума довжин від них до інших вершин графа є мінімальною.

Модель MCLP орієнтована на те, щоб задана кількість об'єктів надання ЕМД покривала найбільшу кількість населення в межах допустимого часу прибуття бригади ЕМД на виклик.

Модель MCLP представлена у вигляді формули:

$$\max \sum_{i \in D} \omega_i z_i, \quad (1.2)$$

де D – множина всіх точок попиту (житлові квартали, звідки надходять виклики);

ω_i – ваговий коефіцієнт для точки попиту i , який зазвичай представляє кількість населення або середню кількість викликів з цієї зони;

z_i – допоміжна бінарна змінна, яка показує, чи точка попиту i покрита хоча б одним об'єктом екстреної допомоги ($z_i = 1$, якщо хоча б один об'єкт екстреної допомоги розташований на відстані (або в межах нормативного часу прибуття бригади ЕМД), що не перевищує заданий стандарт, $z_i = 0$,

якщо бригади ЕМД жодного з об'єктів екстреної допомоги не можуть доїхати до точки i за нормативний час).

Модель мінімізації максимальної відстані (minimax) дозволяє проводити розташування об'єктів надання ЕМД так, щоб найвіддаленіший від об'єкту пацієнт мав мінімально можливий час очікування.

Модель мінімізації максимальної відстані представлена у вигляді формули:

$$\min W = \max d(i, j), \quad (1.3)$$

де W – максимальний час очікування (ця змінна дорівнює найгіршому (максимальному) часу прибуття від об'єкту системи ЕМД до будь-якого пацієнта у зоні обслуговування);

$d(i, j)$ – час або відстань від точки i до найближчого об'єкту системи екстреної допомоги j .

Використання моделі (1.3) забезпечує таке розташування об'єкту системи ЕМД, при якому найгірший час прибуття бригади ЕМД до будь-якого пацієнта у зоні обслуговування є мінімальним. Завдяки цьому досягається рівномірність покриття території, що особливо важливо для планування розташування об'єктів системи ЕМД у стабільних умовах.

Використання мережевих графових моделей в своїй основі використовує основні метричними характеристиками графів [28]:

- відстань між вершинами графа, що являє собою довжину найкоротшого ланцюга, який з'єднує ці вершини;
- діаметр графа, що є максимальною відстанню між вершинами графа;
- ексцентриситет вершини графа, що є відстанню до найбільш віддаленої вершиною від даної вершини;

– радіус графа, що є множиною вершин графа, які мають мінімальний ексцентриситет.

Зокрема, для пошуку наближених оптимальних рішень, де аналіз усіх можливих варіантів розташування об'єктів надання ЕМД неможливий, використовуються методи, які засновані на метаевристичних алгоритмах. До таких алгоритмів належать:

– генетичні алгоритми [29], які імітують природний відбір для швидкої генерації високоякісних рішень щодо розташування об'єктів системи ЕМД;

– ройові алгоритми [30], що ефективно моделюють колективну поведінку для оптимізації маршрутів і покриття;

– алгоритми імітації відпалу [31], які допомагають уникнути «застрягання» в локальних оптимумах при виборі кінцевих локацій.

Ці методи є фундаментальними для мінімізації середнього часу прибуття бригад до місця виклику.

Для аналізу попиту на обслуговування та зонування території критично важливим є застосування методів інтелектуального аналізу даних, наприклад, таких як метод, що базується на модифікованому алгоритму CLOPE [32].

Цей метод використовується для визначення територіальних зон за допомогою історичних даних викликів, що дозволяє чітко визначити зони підвищеного попиту та, відповідно, оптимальні територіальні зони покриття для нових або існуючих стаціонарних пунктів (об'єктів системи ЕМД).

Нарешті, методи теорії ігор (наприклад, методи на основі концепції рівноваги Неша [33]) можуть бути застосовані для стратегічного балансування між ключовими операційними показниками.

У стабільних умовах функціонування об'єктів системи ЕМД використання цих методів допомагає знайти оптимальний компроміс між швидкістю реагування на виклики пацієнтів (наприклад, розташування об'єктів системи ЕМД ближче до зони попиту) та операційними витратами (наприклад,

експлуатаційні витрати та кадрове забезпечення). Це забезпечує стабільне та фінансово ефективне функціонування системи ЕМД.

При вирішенні задачі розташування об'єктів системи ЕМД можна формалізувати взаємодію між різними агентами (наприклад, регіонами або зонами) як гру, де кожен агент обирає місця для своїх пунктів, і їхня вигода залежить від часу обслуговування чи конкуренції за ресурси.

Розміщення пунктів екстреної допомоги за допомогою рівноваги Неша представлено у вигляді формули:

$$U^k(y^1, \dots, y^K) = - \sum_{i \in D_k} \omega_i \text{mind}(i, j), \quad (1.4)$$

де U^k – функція корисності (utility) для гравця k (в цій моделі корисність – це міра задоволення або вигоди, яка вимірює, наскільки ефективно гравець k обслужив свою територію);

(y^1, \dots, y^K) – це набір стратегій всіх гравців;

y^k – конкретне місце (координата), де гравець k вирішив розмістити свій об'єкт ЕМД;

D_k – множина точок попиту, за які відповідає гравець k ;

ω_i – ваговий коефіцієнт для точки попиту i , який зазвичай представляє кількість населення або середню кількість викликів з цієї зони;

$d(i, j)$ – час у дорозі від точки попиту i до об'єкту ЕМД j .

Застосування цього підходу дозволяє знайти такий стан системи, при якому жоден з агентів не має стимулу змінювати своє розташування, оскільки це не призведе до покращення результату.

Це забезпечує стабільність мережі та дозволяє досягти компромісу між вартістю утримання об'єктів ЕМД і швидкістю реагування на виклики в закріплених зонах відповідальності.

1.2.2 Аналіз використання моделей і методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної допомоги в нестабільних умовах функціонування

Нестабільні умови функціонування об'єктів ЕМД можуть виникати унаслідок дії зовнішніх факторів (раптового зростання попиту на обслуговування, катастроф, техногенних аварій, воєнних дій тощо). Це порушує нормальне функціонування системи ЕМД та може призводити до зростання часу прибуття бригад ЕМД на виклики та зниження якості обслуговування. Таким чином, під час моделювання системи розташування об'єктів ЕМД у нестабільних умовах необхідно враховувати не лише просторову структуру мережі, а й динаміку її функціонування.

У нестабільних умовах функціонування системи ЕМД (раптового зростання попиту на обслуговування, за наявності змін у доступності доріг, руйнувань доріг тощо) розглянуті вище (в пункті 1.2.1) методи розташування об'єктів ЕМД втрачають ефективність і потребують адаптації або поєднання з імітаційними, стохастичними та динамічними підходами [34];

До основних стохастичних та імітаційних методів належать:

– методи стохастичного програмування (дозволяють враховувати ймовірність руйнування дорожньої інфраструктури та коливання інтенсивності викликів) [35];

– методи імітаційного моделювання (дозволяють аналізувати роботу систем екстреної допомоги у режимі катастрофи, моделюючи рух автомобілів ЕМД та зміни інтенсивності викликів) [36].

До методів імітаційного моделювання відноситься група чисельних методів імітаційного моделювання Монте-Карло, які моделюють різні сценарії

розвитку подій, щоб знайти оптимальне розташування об'єктів ЕМД для більшості випадків [36];

Модель, яка базується на класичному методі стохастичного програмування, представляється у вигляді формули:

$$\min \sum_{i \in C} f_i y_i + \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{i \in D} \sum_{j \in C} \omega_i d^\omega(i, j) x_{i,j}^\omega, \quad (1.5)$$

де C – множина всіх потенційних місць для розташування об'єктів ЕМД;

f_i – фіксована вартість відкриття та утримання об'єктів ЕМД в місці i ;

y_i – бінарна змінна рішення першого етапу ($y_i = 1$, якщо відкривається об'єкт ЕМД (станція, пункт ЕМД тощо) в місці i ; $y_i = 0$, якщо вирішено не відкривати його там);

Ω – множина всіх можливих майбутніх сценаріїв;

ω – індекс, що позначає один конкретний сценарій з цієї множини;

p^ω – ймовірність того, що реалізується саме сценарій ω ;

ω_i – вага (кількість викликів) з точки попиту i в конкретному сценарії ω ;

$d^\omega(i, j)$ – час прибуття від об'єкту ЕМД j до точки i в конкретному сценарії ω ;

$x_{i,j}^\omega$ – бінарна змінна рішення другого етапу (вона показує, чи буде точка попиту i обслуговуватися об'єктом ЕМД j , якщо настане сценарій ω).

Модель розміщення об'єктів ЕМД за методом Монте-Карло може бути представлена у вигляді формули:

$$Z(S) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i \in D} \omega_i d^{(k)}(i, S), \quad (1.6)$$

де $Z(S)$ – середня (очікувана) вартість або сумарний час прибуття для даного плану S ;

N – загальна кількість симуляцій (прогонів моделі), які використовуються, щоб отримати надійний результат;

ω_i – ваговий коефіцієнт (важливість) для точки попиту i (найчастіше він представляє кількість населення або середню кількість викликів із цього району);

$d^{(k)}(i, S)$ – випадковий час у дорозі для сценарію k .

1.2.3. Аналіз та порівняння моделей та методів вирішення задач розташування об'єктів екстреної медичної допомоги

При проведенні аналізу основних моделей та методів вирішення задач розташування об'єктів ЕМД в стабільних та нестабільних умовах функціонування були відокремлені наступні критерії [37]:

- тип підходу до розв'язання задачі;
- точність розв'язку задачі;
- адаптивність до змін середовища, в якому проводиться розміщення об'єктів;
- вимоги до обчислювальних ресурсів, які використовуються для вирішення задачі;
- швидкість виконання методу;
- врахування транспортної доступності при розміщенні об'єктів ЕМД.

У таблиці 1.1 наведено порівняння методів та моделей вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів та моделей вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування

Назва моделі / методу	Тип підходу	Точність розв'язку	Адаптивність до змін середовища	Вимоги до обчислювальних ресурсів	Швидкість виконання методу	Врахування транспортної доступності
Модель р-медіан	Оптимізаційні методи	Висока	Низька	Невисокі	Висока	Часткове
Модель максимального покриття (MCLP)	Оптимізаційні методи	Висока	Низька	Середні	Висока	Часткове
Модель мінімізації максимальної відстані (minimax)	Оптимізаційні методи	Висока	Низька	Середні	Висока	Обмежене
Ігрові методи (рівновага Неша)	Оптимізаційні методи	Середня–висока	Середня	Середні-високі	Середня	Враховує взаємодію між зонами покриття
Методи оптимізації та моделювання, що базуються на генетичних алгоритмах	Оптимізаційні методи	Висока (наближена)	Висока	Середні	Середня	Часткове

Кінець таблиці 3.1

Назва методу / моделі	Тип підходу	Точність розв'язку	Адаптивність до змін середовища	Вимоги до обчислювальних ресурсів	Швидкість виконання методу	Врахування транспортної доступності
Методи оптимізації та моделювання, що базуються на ройових алгоритмах	Методи, що основані на метаевристичних моделях	Висока (наближена)	Висока	Середні-високі	Середня	Часткове
Імітація відпалу	Методи, що основані на метаевристичних моделях	Висока	Висока	Високі	Низька	Може враховуватись за певних налаштувань
Метод стохастичного програмування	Методи, що основані на стохастичних моделях	Висока	Висока	Високі	Низька	Повне (через сценарне моделювання графів)
Метод Монте-Карло	Методи, що основані на стохастичних моделях	Середня (залежить від кількості симуляцій)	Висока	Високі	Низька	Повне (через моделювання маршрутів)

1.3 Огляд інформаційних систем у сфері екстреної медичної допомоги

При вирішенні задач розташування об'єктів системи ЕМД в стабільних і нестабільних умовах їх функціонування значно зростає потреба у використанні сучасних ІС для підвищення ефективності організації та надання ЕМД. Ці системи забезпечують інтеграцію даних про виклики, транспортну (дорожню) інфраструктуру, щільність населення та просторові характеристики території, що дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо розташування та переміщення, за необхідністю, об'єктів ЕМД.

До такого класу систем відносяться геоінформаційні системи (ГІС).

З наукової точки зору ГІС – це засіб моделювання та пізнання природних і соціально-економічних систем, що застосовується для дослідження природних, суспільних і природно-громадських об'єктів і явищ. У технологічному аспекті ГІС постає як засіб збирання, зберігання, перетворення, відображення і розповсюдження просторово-координованої географічної інформації. І нарешті, з виробничої точки зору ГІС є комплексом апаратних пристроїв і програмних продуктів, призначених для забезпечення управління та прийняття рішень [38].

Узагальнюючи, ГІС – це багатофункціональна система, призначена для збору і аналізу просторових даних та пов'язаної з ними інформації, їх зберігання, відображення та використання з метою підтримки управлінських рішень. Проте слід особливо виділити те, що відсоток чисто географічних відомостей в цих системах незначний, технології обробки мають мало загального з традиційною обробкою географічних даних, і, нарешті, просторові дані служать лише базою для вирішення великого числа прикладних завдань, цілі яких не завжди пов'язані з географією [38].

Автоматизовані системи диспетчеризації, які активно використовуються в системі ЕМД, дозволяють реєструвати виклики у режимі реального часу,

автоматично визначати найближчу вільну бригаду та прокласти оптимальний маршрут з урахуванням транспортної ситуації. В умовах нестабільності вони доповнюються функціями динамічного перепланування, що забезпечує адаптацію маршрутів у разі руйнування або блокування доріг.

Велике значення при функціонуванні системи ЕМД надається системам підтримки прийняття рішень (СППР). Вони відносяться до класу інтерактивних ІС, які використовують обладнання, програмне забезпечення, дані, базу моделей і роботу менеджера з метою підтримки всіх стадій прийняття рішень у процесі аналітичного моделювання. СППР є комплексом програмних засобів, що включає різні алгоритми підтримки рішень, базу моделей, базу даних, керівну та допоміжні програми. Керівна програма забезпечує процес прийняття рішень з урахуванням специфіки проблеми. СППР використовується для підтримки різних видів діяльності у процесі прийняття рішень, а саме для:

- полегшення взаємодії між даними, процедурами аналізу й обробки даних і моделями прийняття рішень, й особою, що приймає рішення, як користувач цих систем;

- надання допоміжної інформації, особливо для виконання неструктурованих або слабоструктурованих завдань, для яких важко заздалегідь визначити дані та процедури відповідних рішень [39].

СППР у поєднанні з ГІС утворюють просторові системи, які дозволяють здійснювати прогнозування, багатосценарний аналіз і вибір оптимальних рішень у кризових ситуаціях. Вони забезпечують можливість проводити аналіз типу «what-if» та оцінювати наслідки альтернативних стратегій розміщення об'єктів.

Сучасні інформаційні системи в екстреній медицині формують комплексну інфраструктуру управління, яка поєднує ГІС-технології, системи диспетчеризації та СППР. Їхнє використання створює умови для адаптивного управління мережею станцій екстреної допомоги та забезпечує ефективне реагування на надзвичайні події.

Ключовою системою для координації диспетчерських служб у 2018 році в Україні була створена інформаційно-аналітична система (ІАС) «Централь 103». Вона призначена для оперативного та централізованого збору інформації про всі звернення до регіональних центрів ЕМД [8].

Проте, станом на 2025 рік, її функціонал обмежений знеособленою аналітичною інформацією про сам факт звернення та результати виїздів бригад ЕМД. Система не враховує та не передає деталі огляду, результати додаткових обстежень (наприклад, результати електрокардіограм) чи обсяг наданої медичної допомоги [8]. Додатковою перешкодою для цифровізації системи ЕМД є відсутність єдиного програмного забезпечення у регіональних центрах ЕМД. Кожен регіон часто використовує власні, несумісні між собою програмні продукти.

Електронна система охорони здоров'я (ЕСОЗ) в Україні визначається як єдина державна інформаційно-телекомунікаційна система, призначена для збирання, зберігання, обробки та обміну медичною інформацією між надавачами медичних послуг, органами державної влади та пацієнтами. Вона функціонує на основі центрального компонента, до якого через стандартизовані інтерфейси підключаються медичні інформаційні системи закладів охорони здоров'я, а також набору електронних реєстрів (пацієнтів, медичних працівників, закладів тощо), що забезпечують єдиний простір даних для реалізації державних фінансових гарантій медичного обслуговування та моніторингу якості надання допомоги [40].

Аналіз існуючих ІС, які використовуються на сьогодні для автоматизації бізнес-процесів сфери медичного обслуговування населення, показав, що автоматизоване вирішення задач ефективного розташування організаційних об'єктів системи ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування є актуальною проблемою, для розв'язання якої необхідно проведення наукових та практичних досліджень.

1.4 Постановка задачі дослідження

Аналіз існуючих організаційних об'єктів (відділень надання допомоги у лікарнях, станцій ЕМД, пунктів постійного базування бригад ЕМД, пунктів тимчасового базування бригад ЕМД тощо), які надають екстрену медичну допомогу, їхнього нормативно-правового функціонування, планування їхньої діяльності показав, що найбільш складними для розв'язання є задачі розташування таких об'єктів на визначеній території як в стабільних, так і в нестабільних умовах функціонування. Ефективне вирішення таких задач надасть можливість забезпечити населення країни своєчасною та якісною екстреною допомогою.

Розташування об'єктів надання ЕМД є задачею, яка традиційно формулюється як *location-allocation problem* (проблема розміщення-розподілу) [41]. Її мета полягає у виборі такого розташування об'єктів надання ЕМД (станцій, пунктів обслуговування тощо), яке мінімізує середній час прибуття бригад ЕМД до пацієнтів і водночас забезпечує покриття максимальної кількості населення послугами ЕМД [4].

Для вирішення задачі розташування об'єктів надання ЕМД в стабільних та нестабільних умовах функціонування необхідною є класифікація таких об'єктів, тому що за особливостями їх нормативно-правового та організаційного функціонування необхідно враховувати і використовувати різні підходи, моделі та методи розташування об'єктів надання ЕМД.

Об'єктом дослідження в роботі є процеси розташування організаційних об'єктів, які призначені для надання ЕМД населенню в стабільних і нестабільних умовах функціонування.

Предметом дослідження в роботі є моделі та методи вирішення задачі розташування об'єктів надання ЕМД, яке ґрунтується на забезпеченні покриття

відповідних адміністративно-територіальних одиниць діяльністю таких об'єктів ЕМД та на мінімізації часу прибуття бригад ЕМД до пацієнтів для надання їм первинної медичної допомоги.

В стабільних умовах діяльності системи ЕМД задачі розташування об'єктів надання ЕМД можна розглядати як задачі стратегічного планування, враховуючи ресурсні обмеження (часові, фінансові, кадрові, технічні тощо). Але у нестабільних умовах статичне планування стає неефективним. Тому для вирішення задач розташування об'єктів, які надають ЕМД, у нестабільних умовах функціонування треба застосовувати наступні підходи:

- динамічне перепланування, під час якого об'єкти, що надають ЕМД, можуть змінювати своє місце розташування залежно від розвитку подій (наприклад, переміщення мобільних шпиталів, станцій ЕМД, пунктів базування бригад ЕМД ближче до епіцентру катастрофи);

- створення мобільних медичних юнітів (елементів системи ЕМД, які функціонують в нестабільних умовах), що використовуються як тимчасові станції, розташування яких визначається з урахуванням логістики доставки пацієнтів до лікарень другого рівня.

Метою даної роботи є дослідження методів та моделей розташування об'єктів надання ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування для ефективного вирішення цієї задачі в інформаційній системі екстреної медицини.

Для досягнення мети у кваліфікаційній роботі пропонуються такі задачі дослідження:

- аналіз існуючих моделей та методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування;

- розробка комбінованого методу, який забезпечить ефективне (за визначеними показниками) планування розташування організаційних об'єктів

системи ЕМД в стабільних умовах функціонування і динамічне перепланування їх розташування в нестабільних умовах функціонування;

– розробка і практична реалізація елементів інформаційної технології вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи ЕМД на основі реалізації комбінованого методу;

– експериментальна перевірка використання комбінованого методу вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування.

2 РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ РОЗТАШУВАННЯ СТАНЦІЙ ЕКСТРЕНОЇ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

2.1 Опис базових складових комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги

В роботі розглядається група об'єктів охорони здоров'я, що надають ЕМД та належать до об'єктів системи наземної екстреної допомоги.

Цю групу складають основні організаційні об'єкти системи ЕМД:

- станції ЕМД (пункти постійного базування);
- пересувні станції ЕМД (пункти тимчасового базування);
- відділення ЕМД, які знаходяться на базі багатопрофільних лікарень, у склад яких найчастіше організаційно входять й станції ЕМД.

Такі організаційні об'єкти системи ЕМД в рамках комбінованого методу вирішення задачі їх розташування, який розробляється в роботі, пропонується об'єднати в групу із загальною назвою – станції ЕМД.

Ці об'єкти є джерелом людських та транспортних ресурсів системи ЕМД (бригад та автомобілів ЕМД).

Проведений у першому розділі кваліфікаційної роботи аналіз моделей і методів вирішення задачі розташування станцій ЕМД показав, що ефективність їх використання залежить від рівня стабільності умов функціонування системи ЕМД.

Деякі існуючі моделі та методи ефективні тільки за наявності стабільних умов функціонування об'єктів системи ЕМД, хоча інші методи дозволяють отримати ефективний результат вирішення задачі розташування таких об'єктів при наявності певних порушень роботи системи ЕМД.

Втім вони не пропонують комплексного, поетапного механізму вирішення задачі розташування станцій ЕМД, який би дозволяв змінювати алгоритми дій

залежно від рівня нестабільності існуючих умов функціонування системи екстреної допомоги.

Проведений також в першому розділі кваліфікаційної роботи опис та аналіз функціонування, структурної побудови та взаємодії організаційних об'єктів, які надають первинну ЕМД та до яких належать станції ЕМД, надав можливість визначити дві важливі групи показників, якими оцінюється результативність функціонування об'єктів ЕМД такого виду.

Першу групу складають показники, якими вимірюється забезпеченість (покриття) екстреною допомогою визначених та затверджених відповідними документами адміністративно-територіальних одиниць й закріплення за ними зон відповідальності об'єктів ЕМД [4, 11, 15].

Друга група складається з часових показників, які повинні розраховуватися згідно з встановленими нормами часу обслуговування пацієнтів, які здійснили виклики та потребують ЕМД [4, 11, 15].

Комбінований метод, який пропонується для вирішення задачі розташування станцій, що надають ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування, базується на врахуванні обмежень, пов'язаних з переліченими вище групами показників.

При розробці комбінованого методу, який зможе давати ефективне рішення (за розглянутими групами показників) щодо планування розташування станцій ЕМД в стабільних умовах функціонування та адаптації до динамічних змін розташування станцій в нестабільних умовах функціонування, пропонується поєднати виконання трьох задач:

- моделювання зони покриття об'єктами системи ЕМД відповідних адміністративно-територіальних одиниць;
- планування розташування об'єктів системи ЕМД в стабільних умовах їх функціонування;

– перепланування розташування об'єктів системи ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування.

2.2 Моделювання зони покриття об'єктами ЕМД адміністративно-територіальних одиниць

Особливостями моделювання та опису процесів розташування й функціонування об'єктів наземної екстреної допомоги є те, що діяльність цих об'єктів безпосередньо пов'язана з використанням основних компонентів існуючої дорожньої інфраструктури.

До таких компонентів відносяться:

- дорожнє полотно (автомагістралі, міські вулиці, сільські дороги);
- штучні споруди (мости, шляхопроводи, естакади, тунелі, пішохідні переходи).

Адміністративно-територіальні одиниці, які обслуговуються відповідними закладами охорони здоров'я (покриваються об'єктами системи ЕМД), описуються графовою моделлю (орієнтованим графом). Елементи графової моделі (вершини, дуги) є початковими даними для вирішення задачі моделювання зони покриття об'єктами системи ЕМД відповідних адміністративно-територіальних одиниць.

Вершинами графа вважаються споруди з визначеними адресами, дугами – елементи дорожньої інфраструктури (дорожнє полотно та штучні споруди дорожньої інфраструктури). Споруди з визначеними адресами вважаються точками попиту послуг екстреної допомоги.

Проведені дослідження показали, що така задача має велику розмірність, що зараз пов'язано також з існуванням і побудовою нових багатоповерхівок, а

тому й зі збільшенням кількості адрес, за якими потрібно забезпечувати необхідну екстрену допомогу, зі збільшенням щільності населення.

При вирішенні задачі моделювання зони покриття об'єктами системи ЕМД відповідної території пропонується зменшити розмірність задачі таким чином. Окремі точки попиту медичної допомоги (вершини початкового графа) попередньо об'єднати в групи за визначеними правилами, тобто сформувати кластери вершин.

Запропонований комбінований метод, ґрунтуючись на графових моделях транспортної (дорожньої) системи, буде аналізувати не окремі вершини початкового графа, а кластери вершин відмінно від існуючих класичних методів, які використовуються для вирішення задач розташування об'єктів.

Вирішення задачі кластеризації вершин (об'єктів попиту медичної допомоги) в рамках комбінованого методу необхідно проводити як у стабільних, так і нестабільних умовах функціонування системи ЕМД на основі запропонованої класифікації кластерів.

Класифікацію кластерів пропонується проводити:

- за топологією,
- за типом забудови споруд,
- за критерієм можливості виникнення нестабільних умов,
- за наявністю інформаційних зв'язків тощо.

Кластери можуть бути:

- географічні (враховується територіальна близькість певних ділянок у місті);
- функціональні (враховується тип забудови споруд);
- ризикові кластери (за критерієм можливості виникнення нестабільних умов функціонування);

- динамічні кластери (складаються у режимі реального часу при підвищенні кількості викликів);
- інформаційні кластери (враховується ізолюваність споруд через брак інформаційного зв'язку).

У таблиці 2.1 наведено чинники, за впливу яких можливо кластеризувати множину вершин початкового графа.

Таблиця 2.1 – Чинники, за впливу яких можливо кластеризувати множину вершин початкового графа

Категорія чинників	Події	Вплив на наявну графову структуру	Тип кластерів
Епідеміологічні	Епідемії, спалахи інфекцій	Зростання попиту	Географічні
Природні	Повені, мороз, пожежі, буревії	Тимчасова непрохідність доріг (дуг графа)	Динамічні
Безпекові	Обстріли, мінування, блокпости	Зростання ваг дуг графа	Географічні
Логістичні	Руйнування доріг, мостів, шляхопроводів, естакад, тунелів тощо	Втрата зв'язності зрафа	Географічні
Технічні	Збої зв'язку	Інформаційна ізоляція вершин графа	Інформаційні

Для вирішення задачі моделювання зони покриття об'єктами ЕМД адміністративно-територіальних одиниць пропонується використовувати підхід, пов'язаний з ієрархічною кластеризацією вершин початкового графа.

Цей вид кластеризації використовує підхід до аналізу елементів (вершин), які більш пов'язані з елементами (вершинами), що розташовані поруч, а ніж з тими, що розташовані далі.

Алгоритми, що реалізують цей метод, створюють деревоподібні структури (дендограми), за допомогою яких здійснюється генерація кластерів. При створенні кластера зі структури (за відстанню) підбираються елементи (вершини), тоді створена підмножина елементів характеризується максимальною відстанню.

Підхід, пов'язаний з ієрархічною кластеризацією вершин початкового графа, пропонується реалізовувати за допомогою дивізимного методу, який є ітераційним і який дозволяє на кожній ітерації відокремлювати групи схожих між собою елементів.

На першому етапі аналізу всі елементи належать одному кластеру, але на кожному етапі кількість кластерів зростає, а міра відстані між класами зменшується.

Загальний алгоритм реалізації дивізимної ієрархічної кластеризації складається з таких кроків:

- проведення нормування вхідних даних (крок 1);
- формування (розрахунок елементів) матриці відстаней або матриці мір подібності (крок 2);
- знаходження пари найвіддаленіших один від одного об'єктів (діаметру графа) (крок 3);
- оцінювання відстані об'єктів, що залишилися для розгляду, до об'єктів, які відокремлені на кроці 3, та визначення, до якого з цих об'єктів вони ближче знаходяться (крок 4);
- об'єднання близьких об'єктів в кластер, що дає можливість розбити початковий єдиний кластер на два кластери (крок 5);
- повторення кроків алгоритму з номерами 3, 4, 5, поки усі об'єкти, які кластеризуються, не будуть складати кластери.

Дивізимний алгоритм при виконанні не вимагає перерахунку матриці відстаней на кожному кроці класифікації, що забезпечує зниження трудомісткості розрахунків.

2.3 Планування розташування станцій ЕМД в стабільних умовах їх функціонування

Задача планування розташування станцій ЕМД в стабільних умовах їх функціонування в рамках комбінованого методу, який розробляється, зведена до вирішення оптимізаційної задачі мінімізації часу прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями.

При вирішенні задачі розташування станцій ЕМД в математичній постановці потрібно так розташувати цей об'єкт (станцію ЕМД), щоб сума найкоротших відстаней від об'єкту до вершин графа була мінімально можливою. Як базовий інструмент моделювання та розрахунків обирається оптимізаційна модель p -медіан. Її головною метою є мінімізація середнього часу прибуття бригад ЕМД на місце події за стабільних умов функціонування системи ЕМД.

Оптимальне у вказаному значенні місце розташування станцій ЕМД називається медіаною графа.

Під вершинами графа, за допомогою якого моделюється територіальна одиниця, розуміється точка попиту послуг ЕМД, що являє собою адресу, за якою здійснюється виклик бригади ЕМД.

За видом цільової функції такі задачі називаються задачами розташування з мінімальною сумою.

Задача про знаходження p -медіани даного графа є задачею розташування заданого числа (в даному випадку p) станцій ЕМД, для яких сума найкоротших відстаней від вершин графа до найближчих станцій ЕМД приймає мінімально можливе значення.

Цю модель пропонується використовуватися у двох випадках:

- для визначення математично обґрунтованого розташування станцій ЕМД для нормальних, стабільних умов функціонування;
- для вирішення задач релокації станцій ЕМД, пов'язаних із запланованими та затвердженими організаційно-топологічними змінами, які не є надзвичайними ситуаціями (наприклад, зміна меж громад, приєднання нових територій тощо).

Це дозволить оперативно визначити місця розташування станцій ЕМД у відповідь на зміни адміністративного-територіального устрою.

2.4 Перепланування розташування станцій ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування

При проведенні аналізу існуючих моделей і методів розташування станцій ЕМД було виявлено, що класичні методи оптимізації розташування є ефективними для планування в стабільних умовах, однак вони втрачають свою актуальність та ефективність при виникненні непередбачуваних подій (нестабільних умов).

Нестабільні умови виникають унаслідок дії зовнішніх факторів (наприклад, епідемій, катастроф, техногенних аварій, воєнних дій тощо), які:

- порушують нормальне функціонування системи ЕМД;
- змінюють зону покриття об'єктами системи ЕМД відповідної території;

- призводять до зростання часу прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями (часу реагування);
- призводять до зниження якості обслуговування населення тощо.

У таблиці 2.2 наведено загальну класифікацію нестабільних умов та їх вплив на показники функціонування системи ЕМД.

Таблиця 2.2 – Класифікація нестабільних умов і характер впливу на функціонування системи ЕМД

Тип нестабільної умови	Приклад ситуацій	Характер впливу на систему Е(Н)МД
Природні катаклізми	Повені, буревії, пожежі	Руйнування або блокування доріг; зростання часу реагування; ізоляція населених пунктів; підвищений ризик для персоналу
Епідеміологічні ситуації	Пандемії, локальні спалахи інфекцій	Зменшення доступного персоналу через хвороби; перевантаження станцій; зниження ефективності обслуговування
Техногенні аварії	Вибухи, витоки хімічних речовин або газу, промислові катастрофи	Обмеження зон доступу; потреба у спеціалізованому транспортуванні; збільшення навантаження на персонал
Військові дії та бойові загрози	Обстріли, мінування, окупація, евакуація населення	Обмежений доступ до зон ризику; нестача кадрів; необхідність мобільних пунктів; робота в умовах небезпеки
Інформаційно-технічні збої	Втрата зв'язку, відмова диспетчерської системи, кібератаки	Порушення оперативного управління, зростання часу прийняття рішень, зниження точності координування

Вирішення задачі розташування станцій ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування в рамках комбінованого метода пропонується здійснювати на основі перепланування розміщення станцій ЕМД з використанням методів імітаційного моделювання.

Для аналізу функціонування системи ЕМД в нестабільних умовах та вирішення задачі розміщення станцій ЕМД було обрано метод Монте-Карло. Він забезпечує моделювання великої кількості випадкових сценаріїв розвитку подій (руйнування доріг або мостів, раптові зміни попиту тощо) та оцінку того, як певна форма мережі станцій ЕМД буде функціонувати в кожному з таких сценаріїв.

На противагу від інших стохастичних методів, метод Монте-Карло є більш гнучким і дозволяє враховувати складні, нелінійні залежності та будь-які розподіли ймовірностей.

2.5 Опис і аналіз особливостей використання комбінованого методу розташування станцій екстреної медичної допомоги

Використання методу розташування станцій ЕМД в стабільних та нестабільних умовах функціонування засновано на покроковому ітераційному підході, який об'єднує такі етапи:

- підготовку агрегованих даних для вирішення задачі розташування станцій ЕМД (перший етап);
- проведення розрахунків щодо визначення місця розташування станцій згідно з визначеними умовами (стабільними або нестабільними) функціонування системи ЕМД (другий етап);
- перевірка на стійкість отриманих рішень (третій етап).

На першому етапі всі вершини графа (точки попиту послуг системи ЕМД) групуються у кластери за обраними (визначеними) чинниками. Це дозволяє агрегувати попит на послуги системи ЕМД і визначити центроїди кластерів, що є ключовою особливістю методу.

На базі цих агрегованих даних на другому етапі послідовно застосовуються два основні методи: оптимізаційний (оснований на моделі р-медіан) та імітаційний (метод Монте-Карло).

За допомогою використання моделі р-медіан визначається оптимальне розташування станцій відносно центроїдів цих кластерів. Цей етап використовується як для розрахунку базового розташування в стабільних умовах, так і для оперативної релокації у відповідь на організаційно-топологічні зміни (наприклад, зміна меж громад).

Отримані на другому етапі варіанти розташування станцій ЕМД перевіряються з використанням методу Монте-Карло.

Третій етап необхідний для оцінювання стійкості отриманих рішень при наявності важких нестабільних умов (випадкових пошкоджень дорожньої інфраструктури, руйнування доріг, мостів тощо).

Аналіз особливостей запропонованого комбінованого методу дозволяє виділити низку його переваг.

По-перше, попереднє групування в кластери точок попиту послуг системи ЕМД суттєво зменшує обчислювальну складність задачі оптимізації. Це є критичним для прийняття швидких рішень в динамічних умовах.

По-друге, метод дозволяє проводити визначення маршрутів руху бригад ЕМД не до великої кількості місць окремих викликів під час, наприклад, масового інциденту, а дозволяє системі ЕМД переключитися на обслуговування центроїдів кластерів.

Завдяки цьому діяльність системи ЕМД не зупиняється, а спрямовуються ресурси (наприклад, пересувна станція) в епіцентр попиту послуг системи ЕМД.

По-третє, комбінація з методом Монте-Карло дозволяє заздалегідь змодельовати та підготуватися до двох основних типів фізичних збоїв: «відмова дуг» (пошкодження доріг) та «відмова вершин» (вихід з ладу лікарні або вузлової станції ЕМД).

2.6 Прогнозування стабільності результатів розташування станцій екстреної допомоги в нестабільних умовах функціонування

Для кількісної оцінки рішень, отриманих за допомогою розробленого комбінованого методу розташування станцій ЕМД, а також для прогнозування стабільності цих рішень в раптових (нестабільних) умовах, необхідно визначити набір головних показників для прогнозування стабільності роботи системи ЕМД. Ці показники мають відображати як операційні аспекти роботи системи ЕМД в штатному режимі, так і її здатність функціонувати в умовах збоїв, зокрема, при пошкодженні доріг або виході з ладу станцій ЕМД.

Кожен тип нестабільності впливає на певний показник функціонування системи ЕМД, тому використання моделей та методів буде пов'язано з адаптивним оновленням параметрів – територіального покриття та доступності, часу прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями. У таблиці 2.3 представлено показники для прогнозування стабільності роботи системи ЕМД.

Таблиця 2.3 – Показники для прогнозування стабільності роботи системи екстреної допомоги

Показник	Одиниця виміру	Опис показника
Час прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями (час реагування)	Хвилини	Час від моменту виклику до прибуття бригади на місце події
Коефіцієнт територіального покриття	Відсотки (%)	Частка населення, яке отримує допомогу в межах нормативного часу
Коефіцієнт доступності транспортної мережі	Відсотки (%)	Частка діючих маршрутів або доріг, що залишаються доступними для руху екстреної допомоги

Час реагування (час прибуття бригад на місце події за зверненнями) є головним критерієм для успішності функціонування системи ЕМД.

Коефіцієнт територіального покриття доповнює показник часу реагування, оцінюючи якість обслуговування з погляду нормативних вимог.

В умовах нестабільності функціонування, коли виникає топологічна ізоляція (наприклад, руйнування мостів), саме цей коефіцієнт дозволяє кількісно прогнозувати, яка частка населення повністю втратить доступ до своєчасної медичної допомоги.

Коефіцієнт доступності транспортної мережі, який показує стан дорожньої інфраструктури, являється основним показником для моделювання нестабільних умов.

У рамках методу Монте-Карло зниження цього коефіцієнта (імітація пошкодження дуг графа) є вхідним параметром.

Спільне використання цих трьох показників дозволяє перейти від пошуку єдиного оптимального рішення до вибору обґрунтованого компромісу між базовою продуктивністю системи та її прогнозованою стабільністю в умовах випадкових сценаріїв.

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗТАШУВАННЯ СТАНЦІЙ ЕКСТРЕНОЇ ДОПОМОГИ НА ОСНОВІ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ

3.1. Загальний опис базових елементів інформаційної технології вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги

Згідно з визначенням основних понять, пов'язаних з розробкою та використанням інформаційних технологій (ІТ), розглянемо базові елементи запропонованого комбінованого методу вирішення задач розташування станцій ЕМД, алгоритм та програмні інструменти, які забезпечують збір, первинну обробку даних, їх подальший аналіз та перетворення для прийняття рішень щодо розміщення станцій ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування, автоматизацію цих процесів для отримання бажаного результату.

Задача розташування станцій ЕМД в постановці, яка запропонована в роботі, може бути використана при вирішенні як стратегічних, так і оперативних задач управління діяльністю системи ЕМД.

Стратегічна спрямованість задачі пов'язана з визначенням базового розташування станцій ЕМД на визначеній адміністративно-територіальній одиниці. Таке розташування станцій буде забезпечувати покриття території послугами ЕМД, а також мінімальний середній час прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями у стабільних умовах функціонування.

Оперативна спрямованість задачі пов'язана з динамічним переплануванням розташування станцій ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування (при непередбачуваних подіях) в рамках забезпечення досяжності будь-якого об'єкта, який потребує допомоги, та в межах нормативного часу прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненням.

Проведений аналіз показав, що потреба у вирішенні задачі виникає відповідно до виникнення певних груп подій: запланованих адміністративних змін або непередбачуваних інцидентів.

Початковими умовами щодо вирішення задачі розташування станцій ЕМД можуть бути:

- адміністративно-територіальні зміни (зміна дорожньої мережі, зменшення наявності доступного медичного персоналу або небезпека для руху бригад ЕМД).
- збільшення кількості викликів у певних районах;
- поява ізольованих районів унаслідок непередбачуваних подій;
- зміни напрямків руху через затори, аварії, бойові дії тощо;
- сезонні зміни транспортної доступності (погодні умови, повені, ожеледь тощо);
- поява нових або зруйнованих доріг тощо.

Вирішення задачі розташування станцій ЕМД проводиться не одноразово, а повторюється кожного разу, коли відбуваються адміністративно-територіальні зміни, а також зміни, які пов'язані з нестабільними умовами функціонування системи ЕМД. Задача має динамічний характер і вирішується тоді, коли змінюються умови функціонування системи ЕМД.

При вирішенні задачі розташування станцій ЕМД розглядається розташування трьох основних організаційних об'єктів системи ЕМД:

- станція ЕМД (пункт постійного базування);
- пересувна станція ЕМД (пункт тимчасового базування);
- відділення ЕМД, яке знаходиться на базі багатопрофільної лікарні.

Станція ЕМД (постійного або тимчасового базування), як джерело транспортних ресурсів, є об'єктом, який пов'язаний з дорожньою мережею. Одним з показників результативності функціонування станції, який

розглядається при вирішенні задачі, є час прибуття бригад ЕМД на місце події за зверненнями.

Відділення ЕМД – це об’єкт, який не пов’язаний з транспортними ресурсами, проте він також є частиною системи ЕМД, оскільки відділення є ланкою, куди транспортуються пацієнти після того, як було надано допомогу на місці події. Продуктивність системи ЕМД залежить від того, чи зможуть бригади ЕМД забезпечити транспортування пацієнтів від місця події до цього відділення.

Пересувна станція ЕМД – об’єкт раптового реагування. Дана станція може бути розгорнута в будь-якому місці території, яка обслуговується об’єктами ЕМД, якщо цього місця можна досягнути дорогами. Задача розташування пересувної станції ЕМД виникає, коли станції постійного базування не забезпечують прибуття бригад на виклики у заданий час.

Дослідження, проведені при розробці комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування, показали, що її практичне розв’язання і використання в інформаційній системі екстреної медицини необхідно виконувати в оперативно-диспетчерській службі центру ЕМД та медицини катастроф.

За посадовими обов’язками задача вирішується старшим диспетчером оперативно-диспетчерської служби відповідного центру ЕМД та медицини катастроф. Для вирішенні задачі старший диспетчер отримує таку інформацію (з наданих джерел):

- топографічні дані (дорожній граф (OpenStreetMaps) та дані з ГІС (QGIS));
- дорожні дані (Google Maps, Waze) або дані з GPS-трекерів бригад ЕМД);
- кризові дані (оперативні офіційні сповіщення від ДСНС, поліції, військової адміністрації тощо).

Запропонований комбінований метод ґрунтується на графовій моделі транспортної (дорожньої) мережі та пов'язаний з візуалізацією топології розташування можливих зон покриття території екстреною медичною допомогою, а також маршрутів прибуття бригад ЕМД на місце події.

3.2 Розробка алгоритму вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги з використанням комбінованого методу

Задача розташування станцій ЕМД вирішується за п'ять основних етапів.

Етап 1. Моделювання зони покриття об'єктами ЕМД відповідних адміністративно-територіальних одиниць.

На цьому етапі відбувається підготовка початкових даних для вирішення задачі розташування станцій ЕМД.

Транспортна мережа адміністративно-територіальної одиниці моделюється як зважений орієнтований граф $G = (V, E)$, де V – множина вершин графа (будівлі, райони, точки попиту (адреси)), а E – множина дуг графа (дуга є дорогою), вага яких $d(v_i, v_j)$ дорівнює часу проїзду між вершинами v_i та v_j .

Після цього будується матриця найкоротших шляхів графа за допомогою алгоритму Дейкстри:

$$D = \begin{pmatrix} d(v_1, v_1) & \dots & d(v_1, v_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(v_n, v_1) & \dots & d(v_n, v_n) \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

де $d(v_i, v_j)$ – час проїзду між вершинами v_i та v_j .

На основі геопросторових даних, експортованих з сервісу OpenStreetMap проводиться кластеризація множини точок попиту (адрес викликів бригад ЕМД) за дивізімним ієрархічним методом.

Метод працює так, що на початку вся множина точок попиту розглядається як єдиний кластер. На кожному кроці відбувається рекурсивний поділ кластерів, радіус яких перевищує допустиме порогове значення (норматив часу прибуття бригад ЕМД), на менші компактні підмножини. Процес поділу триває до виконання критерію зупинки – забезпечення нормативного часу прибуття бригад ЕМД на виклик всередині кожного кластера. Результатом цього є множина кластерів:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}, \quad (3.1)$$

де S_i – кластер ($i=1, \dots, k$).

Етап 2. Планування розташування станцій ЕМД в стабільних умовах функціонування.

Для кожного сформованого кластера S_i необхідно визначити оптимальну вершину для розміщення станції (центроїд кластера) та перевірити, чи встигне бригада ЕМД доїхати до найвіддаленішої точки цього кластера.

В такому випадку для кожної вершини v_i , що належить кластеру S_i , визначається ексцентриситет вершини ($e(v_i)$), тобто максимальна відстань від даної вершини до найвіддаленішої вершини кластера:

$$e(v_i) = \max d(v_i, v_j), \quad (3.2)$$

де $d(v_i, v_j)$ – відстань між вершинами v_i і v_j .

Радіус кластера $r(S_i)$ визначається як мінімальний ексцентриситет серед усіх вершин кластера і розраховується за формулою:

$$r(S_i) = \min e(v_i), \quad (3.3)$$

де $r(S_i)$ – радіус кластера S_i ,

$e(v_i)$ – ексцентриситет вершини v_i .

Вершина (або множина вершин), ексцентриситет якої дорівнює радіусу кластера, називається центроїдом кластера. Саме в центроїді кластера доцільно буде розміщувати станцію ЕМД для мінімізації максимального часу прибуття бригад ЕМД на виклики.

Після визначення центроїдів усіх кластерів необхідно обрати остаточні місця розташування p станцій ЕМД.

При вирішенні задачі множина станцій p може формуватися з урахуванням деяких обмежень. Частина станцій може бути розташована на існуючих об'єктах інфраструктури (опорних багатопрофільних лікарень), а решта станцій потребує розміщення для оптимізації територіального покриття.

Ефективність розташування станцій оцінюється через передаточні числа центроїдів кластерів. Для кожної вершини v_i визначається зовнішнє передаточне число σ_o , яке характеризує сумарний час прибуття від станцій ЕМД (від центроїда кластера) до вершин кластерів з урахуванням ваги кожного кластера (кількості викликів з кластера за певний період часу) за формулою:

$$\sigma_o(v_p) = \sum \omega_i * d(v_i, v_j) \rightarrow \min, \quad (3.4)$$

де ω_k – вага кластера S_i (сумарна кількість викликів з адрес цього кластеру за певний період часу);

$d(v_i, v_j)$ – відстань (часова характеристика) від центру кластера v_i до місця виклику v_j , яка визначається як мінімум серед усіх станцій ЕМД.

Ті вершини, для яких значення передаточного числа (σ_o) є мінімальним, є p -медіанами кластера й відповідають оптимальному плану розташування станцій ЕМД.

Етап 3. Перепланування розташування станцій ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування.

На даному етапі моделюється ситуація, в якій з'являються певні нестабільні умови, пов'язані, наприклад з фізичним пошкодженням транспортної мережі.

Розташування станцій ЕМД при наявності нестабільних умов функціонування здійснюється з використанням моделювання сценаріїв методом Монте-Карло.

Проводиться серія обчислювальних експериментів. У кожній ітерації генерується випадковий сценарій змінення або пошкодження дорожньої мережі.

У термінах теорії графів це означає, що з графа видаляються дуги. Певна підмножина дуг стає непрохідною, а їхня вага прямує до нескінченності. Через те, що невідомо, які саме дуги будуть пошкоджені, для аналізу стійкості системи застосовується метод імітаційного моделювання Монте-Карло.

У кожній ітерації генерується випадковий сценарій зміни стану транспортної мережі, що враховує два типи впливів:

- структурне пошкодження (з певною ймовірністю дуга вилучається з графа (її вага стає нескінченною), моделюючи фізичне руйнування);
- функціональне сповільнення (для дуг, які залишились цілими, застосовується коефіцієнт затримки, що моделює затори або погіршення прохідності шляхів).

Після створення графа G виконується аналіз його зв'язності. Для кожної точки попиту i та кожної станції j з базового набору, який був отриманий на першому етапі, перевіряється існування шляху. Якщо шлях існує, розраховується новий оптимальний час прибуття бригади $d(v_i, v_j)$ для цього сценарію. Якщо шлях відсутній, то цей час вважається нескінченним.

Результатом третього етапу є розподіл показників прогнозування стабільності роботи системи ЕМД, які дозволяють кількісно оцінити надійність та вразливість розташування станцій ЕМД.

У випадку розгортання такого сценарію подій замість індивідуальних виїздів на окремі виклики до центру масового попиту (центроїда кластера S_k) направляється мобільна (пересувна) станція ЕМД. Ця станція та її бригади виконують функції надання медичної допомоги на місцях викликів.

Етап 4. Визначення топологічної ізоляції вершин графа.

Цей етап є послідовним продовженням попереднього етапу та формує найгірший сценарій, пов'язаний з фрагментацією графа та виникнення ізольованих компонент зв'язності.

У разі, якщо пошкодження доріг, мостів тощо призводить до появи територій, до яких відсутній маршрут від будь-якої станції ЕМД, задача забезпечення прибуття бригад ЕМД у межах графової моделі є нездійсненною засобами, які ґрунтуються на використанні графової моделі.

В цьому випадку здійснюється залучення інших протоколів надання екстреної допомоги, які не потребують взаємодії з дорожньою мережею, таких, наприклад, як залучення аеродинамічної евакуації або дронів.

Етап 5. Прогнозування стабільності роботи системи ЕМД.

На цьому етапі виконується оцінювання стабільності функціонування системи ЕМД після моделювання сценаріїв ушкодження або змін транспортної мережі. Метою етапу є визначення, наскільки ефективно система ЕМД зберігає працездатність при зміні умов функціонування.

Для кожного сценарію оцінюються ключові показники ефективності:

- середній час прибуття бригади ЕМД до місця виклику (зважений на кількість викликів);
- максимальний час прибуття до найвіддаленішого кластера (оцінка найгіршого випадку);
- коефіцієнт доступності мережі (відсоток кластерів, до яких існує шлях);
- територіальне покриття (відсоток викликів, що обслуговуються в межах нормативного часу).

Порівнюючи ці показники із нормативними або базовими значеннями здійснюється прогнозування стабільності функціонування системи ЕМД. Якщо середній час реагування зростає понад норматив, а частка території, що обслуговується у межах встановленого часу, зменшується, система вважається нестійкою до зовнішніх впливів.

3.3 Візуальне моделювання процесу вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги в стабільних і нестабільних умовах функціонування

Розроблена ІТ дозволяє реалізувати послідовність дій від обробки вхідних даних до кінцевого результату – рекомендованої мережі розташування станцій ЕМД.

Контекстна діаграма процесу вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги представлена на рисунку 3.1.

Вхідними даними, які представлені на діаграмі, є: транспортна мережа (карта); щільність населення, дані журналів виклику бригад ЕМД.

Вихідними даними, які представлені на діаграмі, є:

- рекомендована мережа розташування станцій;

– набір кількісних показників, що обґрунтовують вибір розташування (розраховані метрики стійкості, зокрема очікуваний час прибуття бригади ЕМД, коефіцієнти територіального покриття і транспортної доступності);

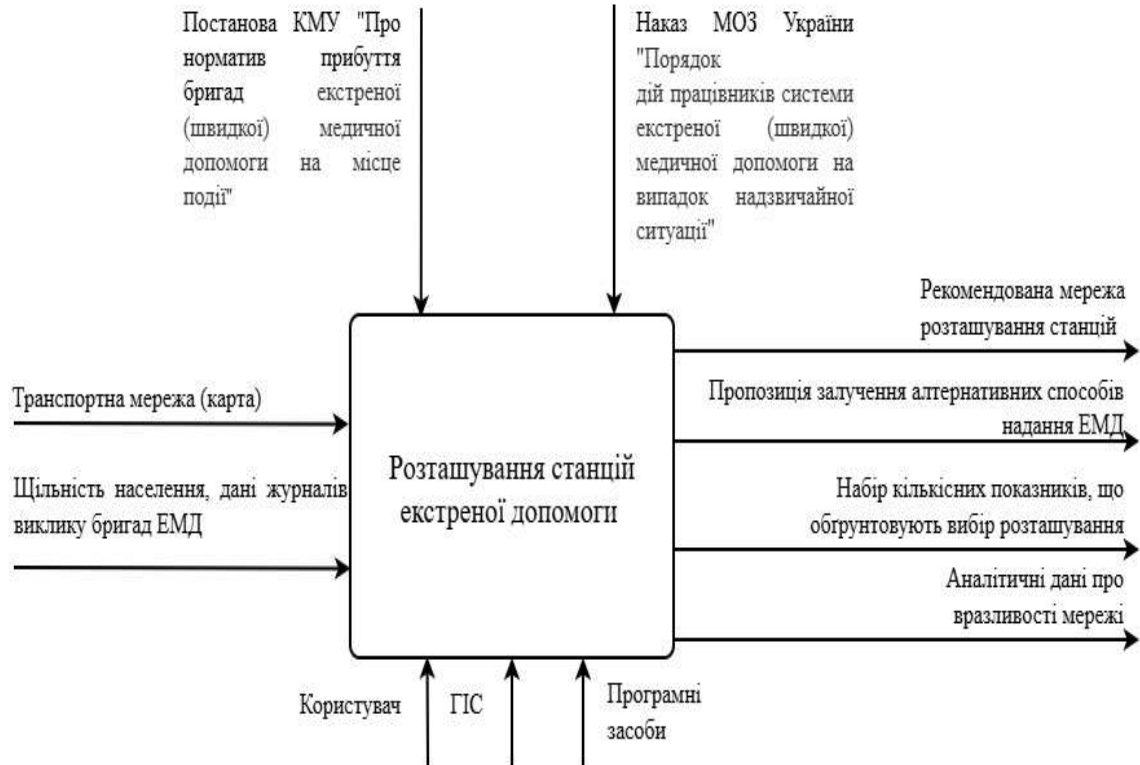


Рисунок 3.1 – Контекстна діаграма процесу вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги

– аналітичні дані про вразливості мережі.

Обмеженнями, в яких вирішується задача розташування станцій ЕМД, є:

– постанова КМУ «Про нормативи прибуття бригад екстреної (швидкої) медичної допомоги на місце події»;

– наказ МОЗ України «Порядок дій працівників системи екстреної (швидкої) медичної допомоги на випадок надзвичайної ситуації».

Діаграма декомпозиції процесу вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги представлена на рис. 3.2.

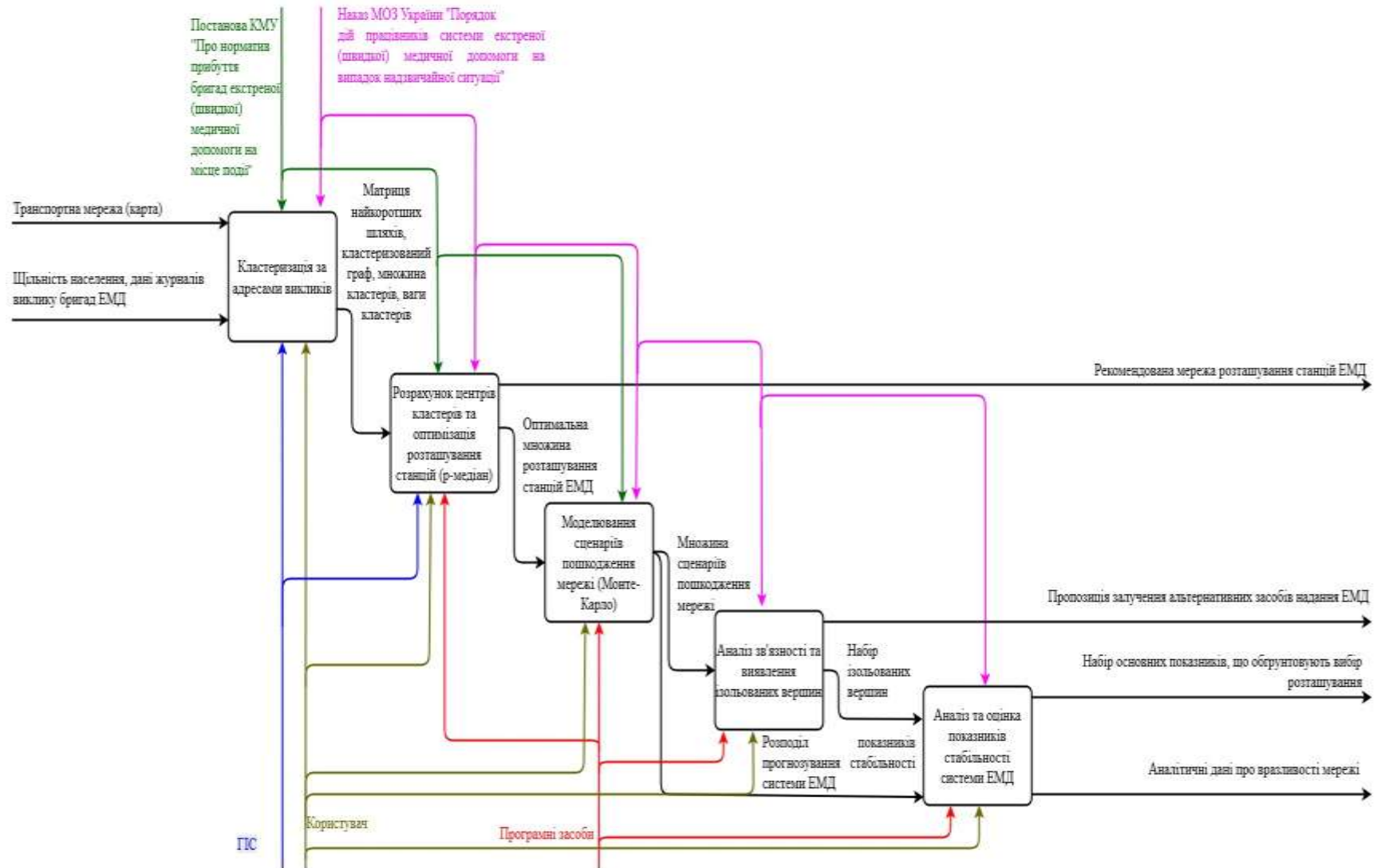


Рисунок 3.2 – Діаграма декомпозиції процесу вирішення задачі розташування станцій екстреної допомоги

3.4 Розробка і опис елементів структури інформаційної системи екстреної медицини

Узагальнена структура ІС екстреної медицини включає декілька взаємодіючих модулів: модуль «Диспетчеризація»; модуль «ГІС та навігація»; модуль «Облік ресурсів»; модуль «Аналітика та звітність»; модуль «Розташування об'єктів системи ЕМД».

Запропонована ІТ реалізується у вигляді модуля «Розташування об'єктів системи ЕМД», який інтегрується з існуючим модулем «ГІС та навігація» та модулем «Аналітика та звітність». Схема взаємодії функціональних модулів ІС екстреної медицини представлена на рис. 3.3.

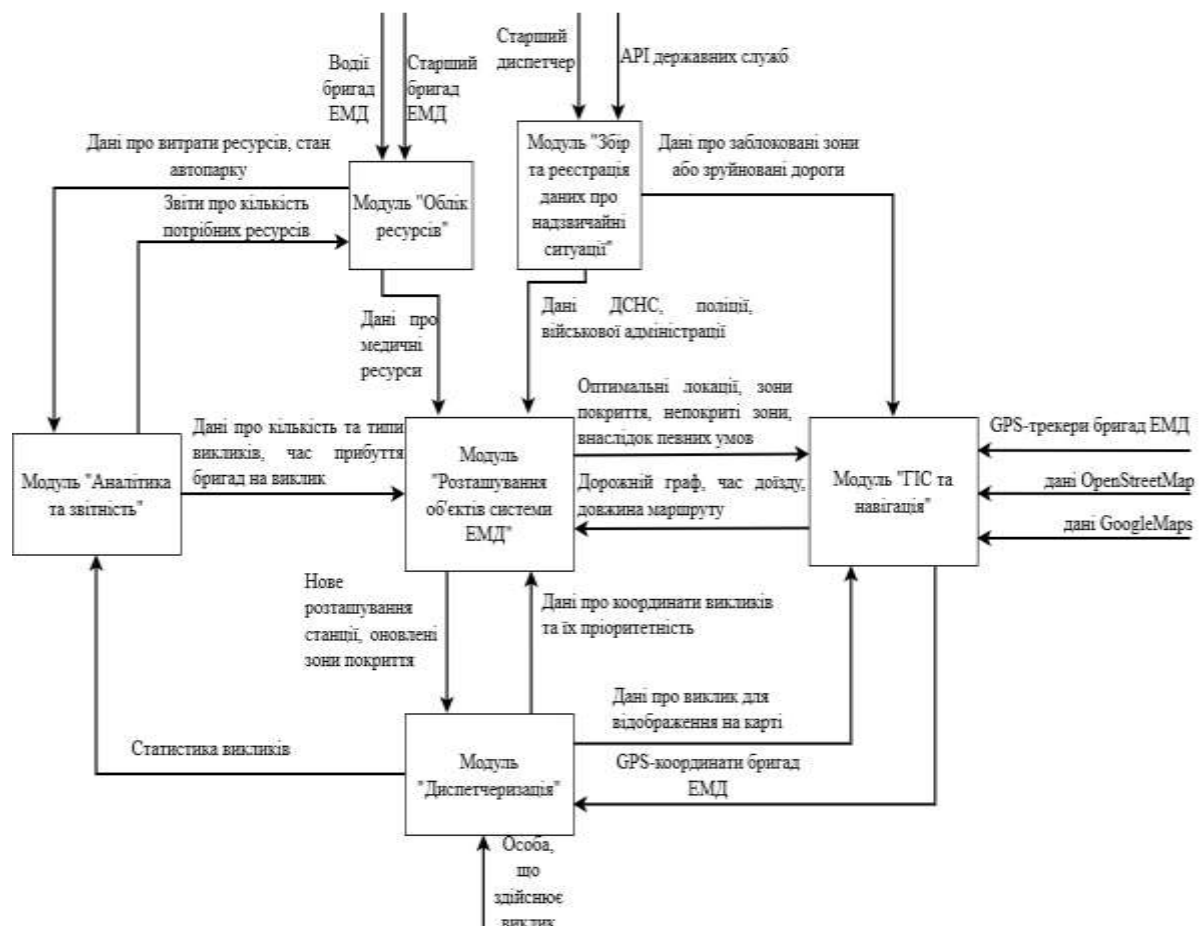


Рисунок 3.3 – Схема взаємодій функціональних модулів ІС екстреної медицини

У таблиці 3.1 наведено опис функціональних модулів ІС екстреної медицини.

Таблиця 3.1 – Опис функціональних модулів ІС екстреної медицини

Модуль	Опис
Модуль «Диспетчеризація»	Основний оперативний модуль. Відповідає за прийом та реєстрацію викликів, визначення пріоритету, пошук та призначення найближчої вільної бригади, передачу інформації на мобільні пристрої (планшет) бригади ЕМД.
Модуль «ГІС та навігація»	Візуалізує цифрову карту міста. Забезпечує GPS-моніторинг та відображення місцезнаходження бригад у реальному часі.
Модуль «Аналітика та звітність»	Формує статистичні звіти (середній час реакції, кількість викликів по районах). Відповідає за ведення історії викликів, медичних карт пацієнтів. Проводить аналіз «гарячих точок», тобто зон з високою концентрацією викликів.
Модуль «Облік ресурсів»	Виконує функції обліку медичних ресурсів, транспортних ресурсів при функціонуванні системи ЕМД.
Модуль «Збір та реєстрація даних про надзвичайні ситуації»	Здійснює моніторинг інформації про дестабілізуючі фактори (надзвичайні ситуації). Отримує кризові дані від зовнішніх джерел (ДСНС, поліція, військові адміністрації тощо) щодо інцидентів, які впливають на дорожню інфраструктуру.
Модуль «Розташування об'єктів системи ЕМД»	Реалізує запропонований комбінований метод вирішення задачі розташування станцій ЕМД. Забезпечує розрахунок оптимальних локацій при стабільних умовах функціонування станцій ЕМД, моделювання сценаріїв пошкодження дорожньої інфраструктури (метод Монте-Карло) в нестабільних умовах та прогнозування показників стабільності роботи системи ЕМД.

На рис. 3.4 представлена UML-діаграма діяльності розробленого модуля «Розташування об'єктів системи ЕМД» ІС екстреної медицини.

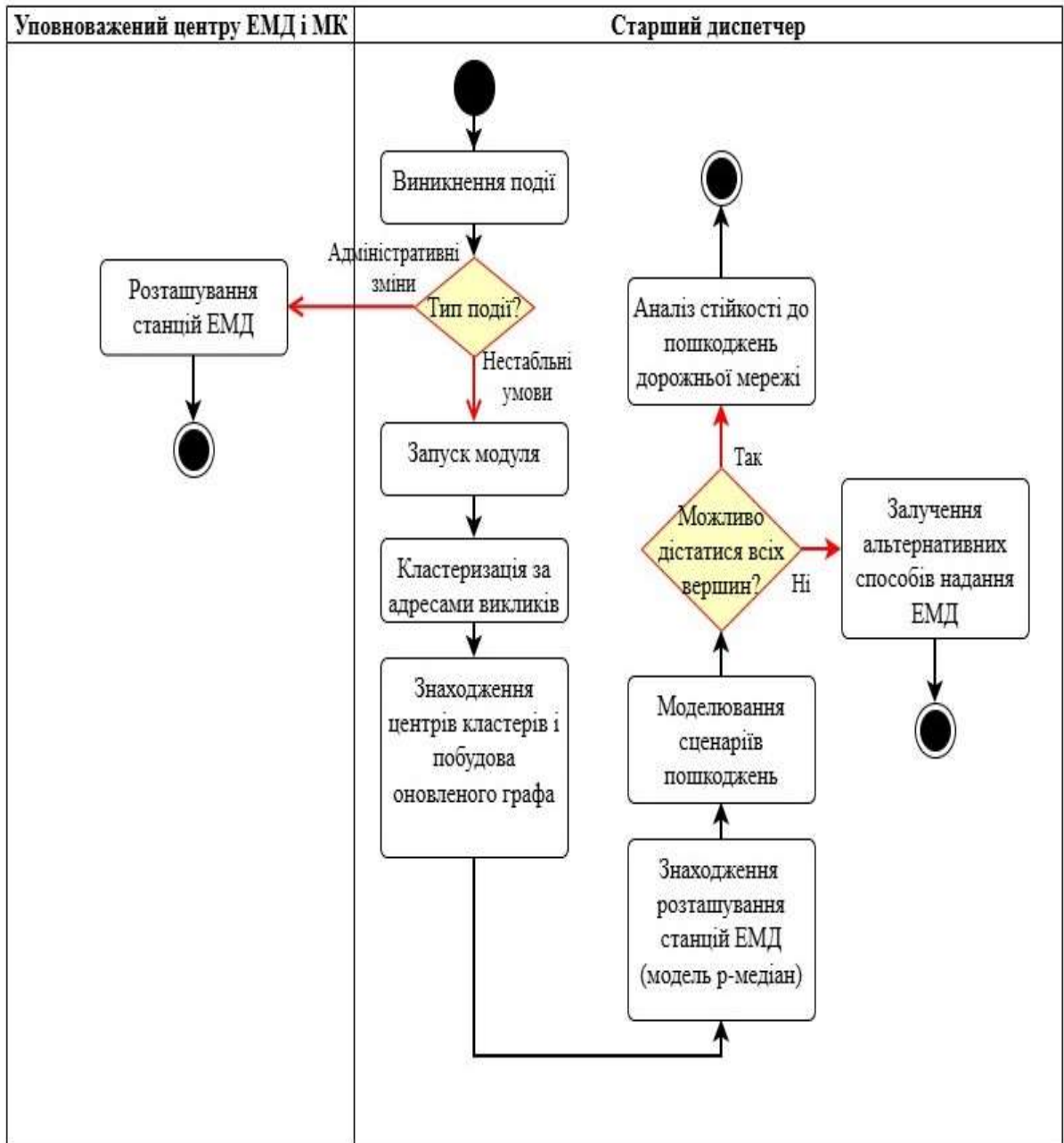


Рисунок 3.4 – UML-діаграма діяльності модуля «Розташування об'єктів системи ЕМД»

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗТАШУВАННЯ СТАНЦІЙ ЕКСТРЕНОЇ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

4.1. Опис початкового етапу дослідження та перевірки розробленої технології вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги

При проведенні експериментальних досліджень розробленого комбінованого методу, який є елементом розглянутої інформаційної технології вирішення задачі розташування станцій ЕМД, формується набір вхідних даних, що моделює фрагмент реальної дорожньої інфраструктури організаційно-адміністративної одиниці. Дані були отримані шляхом експорту графа доріг з безкоштовного вебкартографічного проєкту OpenStreetMap [31].

В реальних умовах вирішення задачі розташування станцій ЕМД експортований граф адміністративно-територіальної одиниці вже фактично поділений на територіальні райони (кластери), межі яких вже визначені та затверджені в містобудівній документації. Кожен такий район має розміщені у ньому станції ЕМД, які закріплені за цією зоною відповідальності.

В свою чергу, у сільській місцевості аналогічну роль можуть відігравати територіальні громади, об'єднані спільною опорною дорогою та орієнтовані на існуючу опорну лікарню або станцію ЕМД.

У разі появи нового району адміністративно-територіальної одиниці (кластера) рішення про розташування станції ЕМД приймає уповноважений орган управління центру ЕМД та медицини катастроф. Місцезнаходження станції визначається експертами з урахуванням наявної дорожньої та будівельної інфраструктури й прийнятих у конкретному центрі ЕМД та медицини катастроф орієнтирів щодо радіуса зони обслуговування. Наприклад, для центру ЕМД та медицини катастроф м. Харкова в

інформаційних матеріалах зазначається орієнтовний радіус покриття території однією станцією на рівні 10-20 км [32].

У даному дослідженні кластеризацію (моделювання зони покриття території послугами ЕМД) пропонується проводити за адресами усіх ймовірних викликів бригад ЕМД. Для формування кластерів використовується ієрархічний дивізимний метод кластеризації.

На першому кроці використання методу всі адреси викликів (вершини графа) належать одному кластеру, далі множина вершин послідовно розбивається на менші кластери за критерієм внутрішньої неоднорідності.

Кластер вважається однорідним, якщо він формує компакту групу з малим часом переміщення (проїзду) між адресами та схожою щільністю викликів.

Як міру відстані між об'єктами використано мінімальний час переміщення (проїзду) бригад ЕМД між відповідними вершинами графа транспортної мережі.

Після формування графа дорожньої мережі до нього додається (накладається) шар точок, що відповідають саме місцям викликів за адресами (окремим будинкам, під'їздам або невеликим групам будівель). Тобто вершина графа на етапі кластеризації являє собою адресу будівлі, з якої можуть прийматися виклики.

Модельований граф адміністративно-територіальної одиниці, який побудований на основі відкритих картографічних даних і синтезованого розподілу кількості викликів, за структурою наближений до реальної міської інфраструктури, але не відтворює конкретний населений пункт. Схема цього графа представлена на рис. 4.1

Елементами цього графа є:

- вершини, що являють собою адреси викликів;
- дуги, що являють собою відрізки доріг між двома сусідніми вершинами графа.

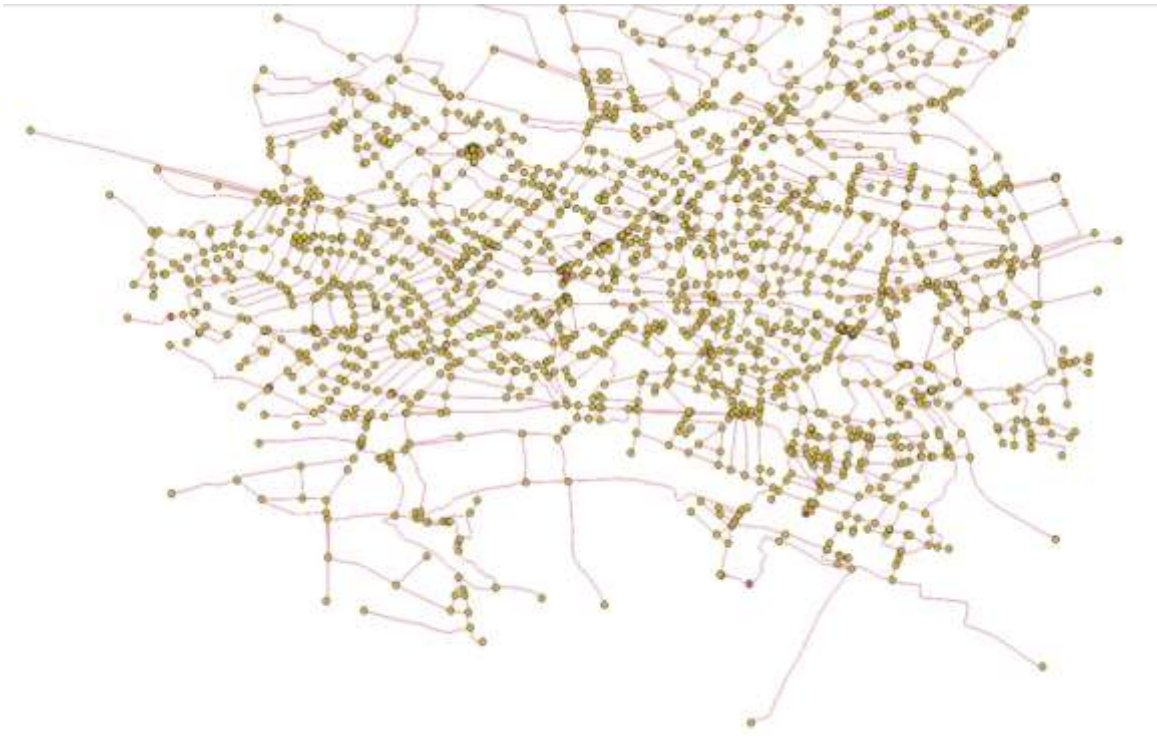


Рисунок 4.1 – Модельований граф адміністративно-територіальної одиниці

Для кожної вершини графа встановлена належність кластера до певного району адміністративно-територіальної одиниці (центрального району, проміжного району, периферійного району) та визначений показник попиту послуг ЕМД, що являє собою кількість викликів з цієї адреси за визначений період часу (наприклад, 1-5 днів).

Ці дані поступають з журналів викликів бригад ЕМД за визначений період часу. Для кожного виклику в журналах фіксуються дата й час, адреса, тип події, номер бригади тощо. За цими даними знаходиться показник кількості викликів за окремий період часу. Такі дані формує модуль «Аналітика та звітність» ІС екстреної медицини.

Під центральними районами розуміються кластери, що розташовані в геометричному центрі експортованого графа та відповідають щільно забудованій частині адміністративно-територіальної одиниці з більшою кількістю викликів і відносно невеликим часом прибуття бригад ЕМД до місць викликів. Проміжні райони знаходяться у перехідній зоні між центром

й окраїнами, тому для них характерним є середній рівень викликів та проміжні значення часу прибуття бригад ЕМД до місць викликів.

Периферійні райони відповідають окраїнам адміністративно-територіальної одиниці, де щільність забудови та кількість викликів менші, але час прибуття бригад ЕМД до адрес викликів є більшим через більшу протяжність маршрутів і віддаленість від основних станцій ЕМД.

Оскільки реальні оперативні дані щодо викликів ЕМД є конфіденційними і не можуть бути використані у відкритому дослідженні, у роботі застосовано синтезований набір даних, який формувався на основі типових значень щільності населення для центральних, проміжних та периферійних районів міста [33], а також загальних статистичних даних щодо роботи системи ЕМД в Україні [34].

Таким чином, числові значення не є реальними медичними записами, але імітують реалістичні сценарії навантаження на систему ЕМД з урахуванням відмінностей між центральними та периферійними районами та дотриманням нормативів часу прибуття бригад ЕМД на місце події [29].

Результатом застосування ієрархічного дивізімного методу стало формування 10 кластерів. При меншій кількості кластерів частина зон виявляється занадто великою за площею і, відповідно, за часом прибуття бригад ЕМД до місця події.

При більшій кількості кластерів вони стають надто дрібними й важкими для інтерпретації з управлінської точки зору.

Тому в роботі визначено 10 кластерів, параметри яких наведено у таблиці 4.1.

Для усіх десяти сформованих кластерів виконується така умова, що максимальний час прибуття бригади ЕМД від центру кластера до найвіддаленішої вершини (адреси) менше нормативного часу прибуття бригад ЕМД на виклик.

Таблиця 4.1 – Сформовані кластери та параметри, якими вони описані

Найменування кластера	Кількість вершин у кластері	Кількість викликів у кластері за визначений період часу	Максимальний час прибуття бригади від центру кластера до найвіддаленішої вершини, хв	Тип кластера
К1	35	410	7,2	Центральний
К2	28	520	6,5	Центральний
К3	40	480	7,9	Середньої щільності
К4	33	450	8,1	Середньої щільності
К5	26	310	8,4	Периферійний
К6	22	270	9,1	Периферійний
К7	19	300	8,9	Периферійний
К8	31	330	8,6	Периферійний
К9	24	290	9,0	Периферійний
К10	17	260	9,4	Периферійний

На рисунку 4.2 представлена розроблена дендрограма побудованих кластерів відповідно до використаного методу кластеризації.

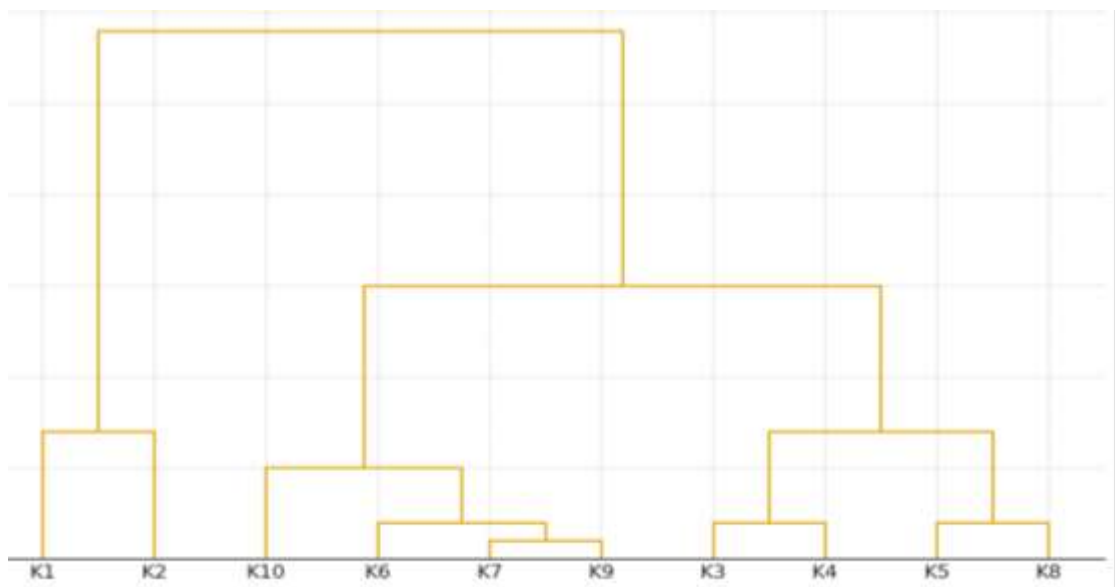


Рисунок 4.2 – Дендрограма кластерів

Кластери, які мають близькі значення максимального часу прибуття бригад ЕМД від центра кластера до місця виклику (таблиця 4.1) і подібний рівень кількості викликів за певний період, на дендрограмі з'єднуються на

невеликій висоті й візуально розташовані поруч. Такими кластерами є К10, К6, К7, К9). Через те, що відстані між кластерами дуже малі, то їхні гілки на двовимірному рисунку частково перекривають одна одну. Ця візуалізація дендограми показує, що кластери, які перекриваються (перетинаються), майже не відрізняються за обраними ознаками і утворюють спільний блок у структурі дендрограми.

4.2 Опис результатів експериментальної перевірки комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій екстреної медичної допомоги

Експериментальна перевірка комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій ЕМД спрямована на демонстрацію працездатності цього методу, який поєднує кластеризацію транспортної (дорожньої) мережі, використання моделі p -медіан та моделювання сценаріїв за методом Монте-Карло при пошкодженні об'єктів (доріг) мережі.

Модель p -медіани використовується для оптимізації розміщення станцій після оновлення кластерів за актуальною кількістю викликів з адрес.

При проведенні експериментальної перевірки виконання задачі на було використано три станції ЕМД, що відповідає ситуації обмежених ресурсів на розглянутому фрагменті території. В моделі p -медіан фіксується значення параметра $p=3$. Одна із цих станцій ЕМД прив'язується до багатопрофільної лікарні в центрі міста (кластер К2), яка в реальній практиці є опорною точкою для міської мережі ЕМД. Розташування двох інших станції не фіксується наперед, а визначається за результатами розв'язання задачі p -медіан.

Для вирішення цієї задачі використано вихідні дані кластеризації, що отримані у таблиці 4.1. Для виконання розрахунків на основі модельованого

графа дорожньої мережі (рис. 4.1) було згенеровано матрицю найкоротших шляхів між центроїдами всіх 10 кластерів.

З використанням алгоритму Дейкстри розраховується час проїзду від центру кожного кластера до центроїдів усіх інших кластерів, враховуючи довжину дуг графа та дозволена швидкість руху.

У таблиці 4.2 наведено фрагмент матриці найкоротших шляхів для основних кластерів, для того щоб продемонструвати різницю в доступності між центральними та периферійними районами.

Таблиця 4.2 – Фрагмент матриці найкоротших шляхів

Місце виклику (позначення кластера) та його тип	Вага кластера	Час прибуття до кластера К2, хв	Час прибуття до кластера К4, хв	Час прибуття до кластера К7, хв
К1 (Центральний)	410	4,2	9,1	16,5
К2 (Центральний)	520	2,5	8,5	18,2
К4 (Проміжний)	450	8,5	3,0	12,4
К7 (Периферійний)	300	18,2	12,4	3,2
К10 (Периферійний)	260	19,5	14,1	6,5

Вага кластера розглядається як кількість викликів, що зафіксовані в цій зоні за певний період часу.

Значення відстані від вершини до вершини кластера (наприклад, з вершини кластера К2 в вершину кластера К2) – це середній час прибуття бригад ЕМД всередині самого кластера, оскільки бригада вже знаходиться в цій зоні.

Аналіз результатів розрахунків, представлених в таблиці 4.2, показує, що час прибуття бригад ЕМД з центрального кластера до периферійного кластера становить 18-19 хвилин, що значно перевищує нормативи часу прибуття бригад ЕМД на місце події.

Суть використання моделі р-медіан полягає у виборі розташування трьох станцій ЕМД таким чином, щоб сума добутків кількості викликів з кластерів та мінімального часу прибуття бригад ЕМД була найменшою.

Розглянемо логіку роботи моделі на прикладі одного периферійного кластера К7, у якому зафіксовано 300 викликів (див. таблицю 4.1). Для цього порівнюються два сценарії обслуговування цього кластера.

У першому випадку бригади ЕМД змушені їхати до пацієнтів у кластер К7 з центральної бази (кластера К2).

Згідно з розрахованою матрицею відстаней (таблиця 4.2) час прибуття бригад ЕМД складає 18,2 хв. Розрахунок сумарних витрат часу (Z_A) виконується за формулою:

$$Z_A = \omega_{K7} * t_{K2 \rightarrow K7} = 300 * 18,2 = 5460 \text{ (люд.-хв)}, \quad (4.1)$$

де ω_{K7} – кількість викликів з кластера К7;

$t_{K2 \rightarrow K7}$ – час прибуття бригад ЕМД від станції у К2 до центру кластера К7.

У другому випадку станція ЕМД розміщується безпосередньо у кластері К7. Час прибуття бригад ЕМД скорочується до внутрішнього часу переміщення в рамках кластера, тобто 3,2 хвилини.

Розрахунок сумарних витрат часу (Z_B) для цього варіанта розраховується за формулою:

$$Z_B = \omega_{K7} * t_{K7 \rightarrow K7} = 300 * 3,2 = 960 \text{ (люд.-хв)}, \quad (4.2)$$

де ω_{K7} – кількість викликів з кластера К7;

$t_{K7 \rightarrow K7}$ – час прибуття бригад ЕМД від станції у К7 до центру кластера К7.

Розрахунок економії часу (ΔZ) для кластера К7 розраховується за формулою:

$$\Delta Z = Z_A - Z_B = 5460 - 960 = 4500 \text{ (люд.-хв)}, \quad (4.3)$$

У таблиці 4.3 наведено оптимальне розташування станцій ЕМД, отримане в результаті використання моделі р-медіан.

Таблиця 4.3 – Оптимальне розташування станцій ЕМД

Номер станції ЕМД	Вибраний кластер	Вага кластера (кількість викликів)	Середній час прибуття бригади від станції до центрів кластерів, які вона обслуговує, хв
Станція 1	К2	520	3,9
Станція 2	К4	450	5,7
Станція 3	К7	300	5,3

В останньому стовпці таблиці 4.3 наведено середній час прибуття бригад ЕМД до центрів кластерів, які увійшли в зону їх відповідальності за результатами моделювання. Низькі значення часу (3,9 – 5,7 хв) підтверджують доцільність розподіленого розташування станцій ЕМД.

Розподіл кластерів за станціями та розрахований час прибуття бригад ЕМД представлені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Розподіл кластерів за станціями та розрахований час прибуття бригад ЕМД

Найближча станція (після оптимізації)	Кластер (район)	Кількість викликів	Розрахунковий час прибуття (хв)
Станція 1 (в К2)	К2	520	2,5
Станція 1 (в К2)	К1	410	4,2
Станція 1 (в К2)	К3	480	5,1
Станція 2 (в К4)	К4	450	3,0
Станція 2 (в К4)	К5	310	6,8
Станція 2 (в К4)	К8	330	7,2
Станція 3 (в К7)	К7	300	3,2
Станція 3 (в К7)	К6	270	5,4
Станція 3 (в К7)	К9	290	5,9
Станція 3 (в К7)	К10	260	6,5

Центральна зона, в яку входять кластери К1, К2, К3, обслуговується станцією 1. Час прибуття бригад ЕМД мінімальний (2,5 – 5,1 хв).

Проміжна зона, в яку входять кластери К4, К5, К8, передана у відповідальність станції ЕМД 2, яка розташована у К4. Час прибуття бригад ЕМД з центру знизився до 3,0-7,2 хв.

Периферійна зона, в яку входять кластери К6, К7, К9, К10, обслуговується станцією ЕМД 3 у, яка розташована у К7, що дозволило скоротити час прибуття бригад ЕМД до найвіддаленішого кластера К10 з 19,5 хв до 6,5 хв.

Час прибуття бригад ЕМД по всій системі становить близько 5 хвилин, що повністю задовольняє нормативні вимоги. Отримані значення беруться за базові для подальшого моделювання сценаріїв методом Монте-Карло при наявності руйнування елементів дорожньої мережі. В результаті оптимізації час прибуття бригад ЕМД змінився в середньому на 57,7%. Порівняння значень цього показника до та після оптимізації представлено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Зміна часу прибуття бригад ЕМД до та після оптимізації

Найменування кластера	Тип кластера	Час прибуття бригади до оптимізації, хв	Час прибуття бригади після оптимізації, хв	Зменшення часу прибуття бригади
К2	Центральний	2,5	2,5	0%
К1	Центральний	4,2	4,2	0%
К3	Центральний	5,1	5,1	0%
К4	Проміжний	8,5	3,0	-64,7%
К5	Проміжний	14,2	6,8	-52,1%
К8	Проміжний	13,8	7,2	-47,8%
К7	Периферійний	18,2	3,2	-82,4%
К6	Периферійний	15,1	5,4	-64,2%
К9	Периферійний	14,9	5,9	-60,4%
К10	Периферійний	19,5	6,5	-66,7%

Час прибуття бригади до проведення оптимізації передбачає, що у місті працює одна станція ЕМД (кластер К2) та розрахований як час прибуття бригад ЕМД від центру К2 до центру кожного кластера.

Завдяки використанню моделі р-медіан був розрахований час після оптимізації.

Отримане оптимальне розташування станцій ЕМД має пройти перевірку на стійкість до пошкоджень транспортної мережі. Для цього використано метод Монте-Карло, який дозволяє згенерувати ймовірнісні сценарії пошкодження дорожньої інфраструктури.

Для цього використовується оптимізована структура розташування станцій (станції, розміщені у кластерах К2, К4, К7) та існуюча дорожня мережа (модельований граф транспортної мережі та параметри її пошкодження).

Як параметри пошкодження використовуються:

- ймовірність руйнування дуги 15% (імітація фізичного пошкодження дороги);

- коефіцієнт затримки 1,5–2,0 (імітація заторів або об'їзду на ділянках, які залишилися цілими).

Ймовірність руйнування дуг (доріг) задається, як 15%, оскільки це значення, при якому мережа вже сильно пошкоджена, але ще не зруйнована остаточно (не розпалася на ізольовані частини). Коли 15% доріг недоступно, весь потік транспорту спрямовується на ті дороги, що залишилися цілими (85%). Ця ситуація створює затори. Коефіцієнт затримки, який має значення у проміжку (1,5 – 2,0), є стандартним множником для моделювання руху в умовах сильного (довготривалого) затору.

Програмний модуль, який використовує розроблена ІТ, виконує цикл з 1000 повторень. У кожному окремому сценарії здійснюється:

- генерація пошкоджень (кожна дуга графа перевіряється на наявність умови випадкового видалення);

- перерахування ваги для вцілілих дуг (час прибуття бригад ЕМД збільшується на коефіцієнт затримки);

– перерахування маршрутів (заново використовуються розрахунки за алгоритмом Дейкстри для пошуку оптимального шляху від фіксованих станцій та кластерів К2, К4, К7 до місць викликів);

– визначення нового часу прибуття бригад ЕМД на місце події (якщо шлях від найближчої станції ЕМД заблоковано, то за алгоритмом шукається шлях від резервної станції (сусідньої), що автоматично збільшує час).

При невеликій кількості сценаріїв результат є нестабільним.

Якщо кількість сценаріїв близька до 1000, то результат стабілізується так, що похибка стає достатньо малою та нею можна знехтувати.

Повторюючи цей процес для великої кількості випадкових сценаріїв отримуємо не одне число, а розподіл можливих результатів.

Для кожного сценарію оцінюються чотири основних показники:

- час прибуття бригад ЕМД на місце події;
- коефіцієнт територіального покриття;
- коефіцієнт доступності транспортної мережі;
- максимальний час прибуття бригад ЕМД до найвіддаленішого кластера.

В результаті розраховується показник, що вимірюється у відсотках та показує, у скількох сценаріях система ЕМД працює прийнятно, а в яких – непринятно, коли деякі кластери стають практично недосяжними й потребують додаткових рішень, наприклад, використання пересувних станцій, альтернативних маршрутів, викликів аеродинамічної евакуації тощо.

Порівняльний аналіз показників функціонування системи ЕМД у стабільних та нестабільних умовах наведено у таблиці 4.6.

Оскільки оптимізована дорожня мережа у стабільних умовах забезпечує низький час реагування (4,9 хвилин), будь-які затримки, спричинені об'їздами та зниженням швидкості руху, призводять до суттєвого відсоткового приросту, хоча в абсолютних величинах середній час (8,7 хвилин) залишається в межах нормативу.

Таблиця 4.6 – Порівняльний аналіз показників функціонування системи ЕМД у стабільних та нестабільних умовах

Найменування показника	Значення показника у стабільних умовах функціонування ЕМД	Значення показника у нестабільних умовах функціонування ЕМД (середнє за 1000 сценаріїв)	Погіршення значень показників
Середній час прибуття до місця виклику	4,9 хв	8,7 хв	+77%
Максимальний час прибуття до найвіддаленішого кластера	6,5 хв	18,4 хв	+183%
Доступність кластерів	100%	95,2%	-4,8%
Територіальне покриття (до 10 хв)	100%	77%	-23%

Критичне зростання максимального часу (+183%) до 18,4 хвилин свідчить про структурну вразливість периферійних кластерів (зокрема К10). У сценаріях руйнування зв'язків між периферійною станцією (у К7) та віддаленим районом (К10) система змушена перенаправляти виклики на віддалені центральні станції (К2 або К4).

Навіть при наявності трьох станцій середній час прибуття бригад ЕМД на місце події в умовах руйнувань зростає з 4,9 до 8,7 хв. Однак, це значення вкладається у норматив часу прибуття бригад ЕМД на місце події. У 23% випадків (при покритті 77%) бригади ЕМД не встигають доїхати за нормативний час (10 хвилин). Це є наслідками імітації змін дорожньої мережі. Саме ці сценарії вимагають залучення додаткових резервів (пунктів тимчасового базування). Показник доступності 95,2% означає, що у 4,8% сценаріїв (приблизно 50 з 1000) певні кластери стають повністю ізольованими, для яких потрібно планувати евакуацію іншими видами транспорту. На рис. 4.3 - 4.6 наведено результати розподілу значень у сценаріях Монте-Карло.

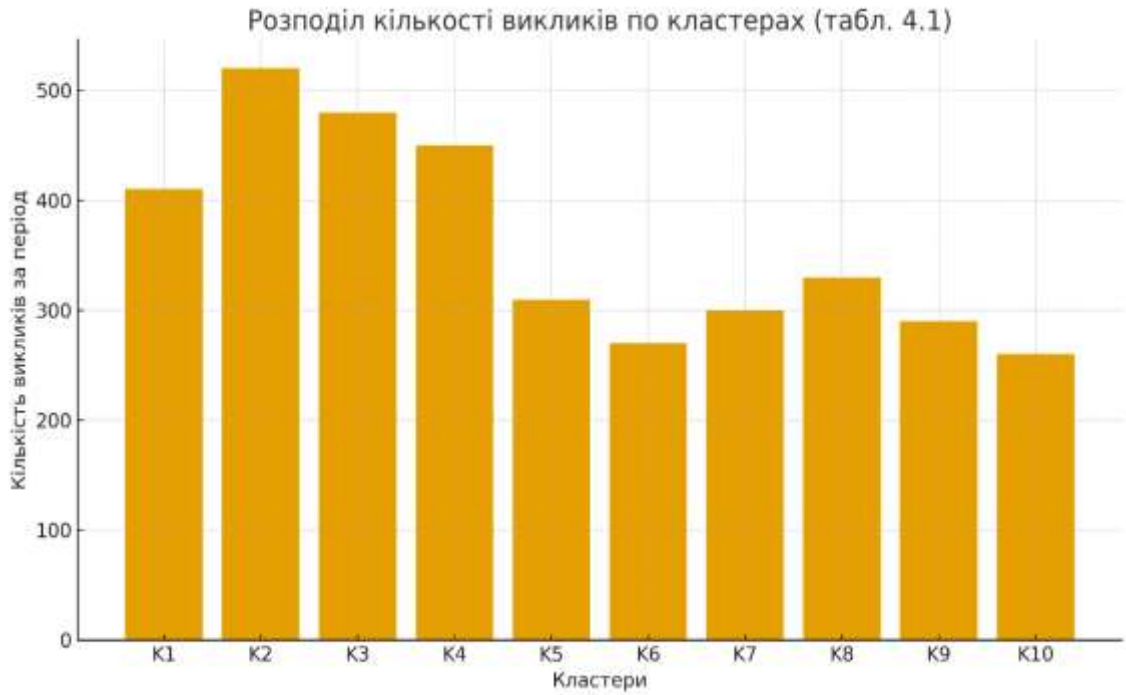


Рисунок 4.3 – Розподіл кількості викликів ЕМД за кластерами

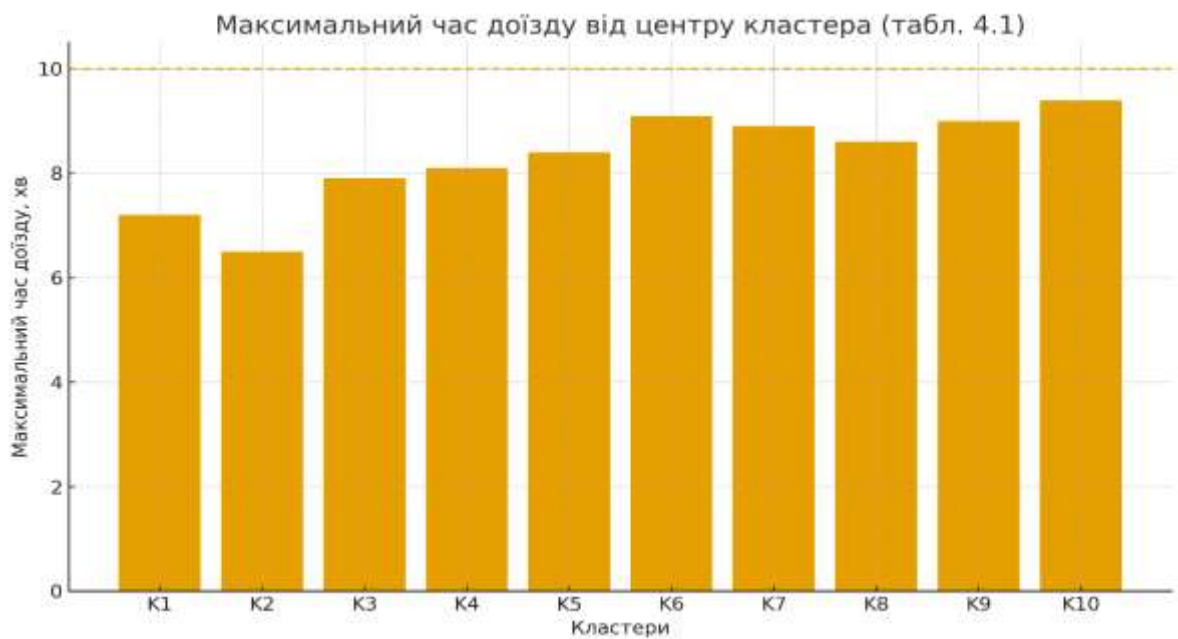


Рисунок 4.4 – Максимальний час прибуття бригад ЕМД на виклик від центру кластера

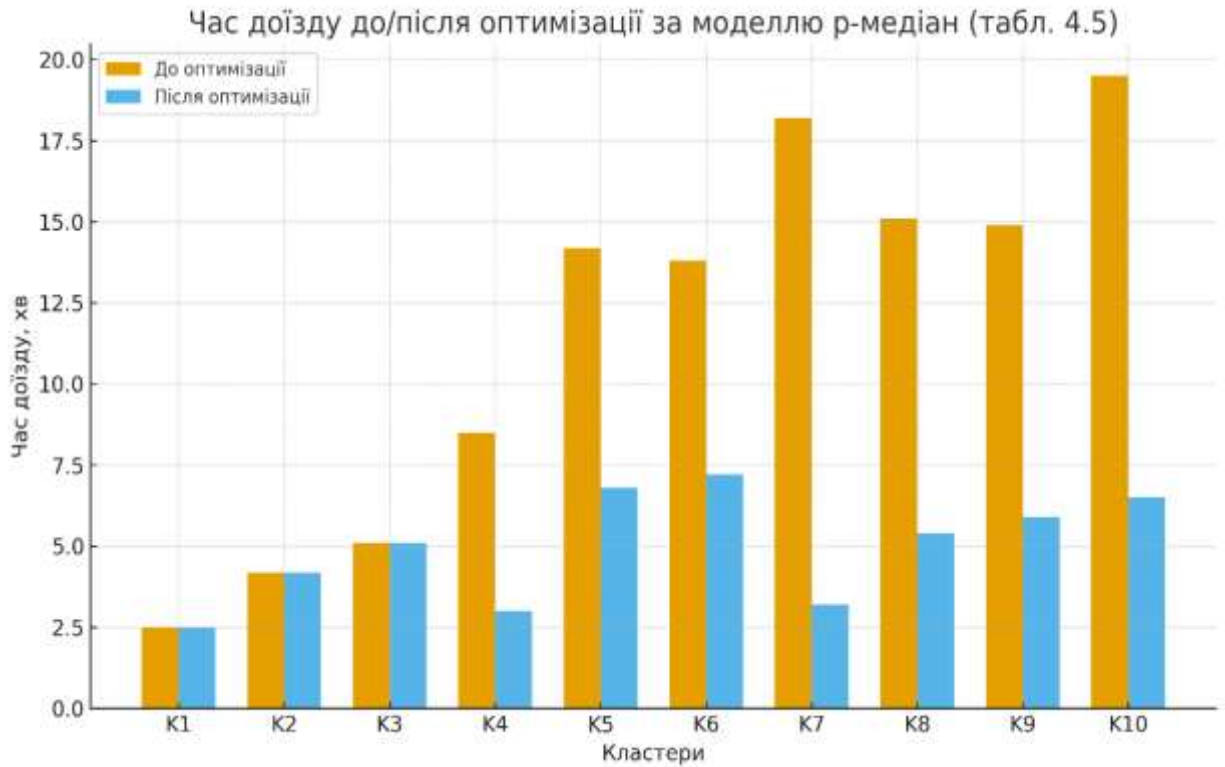


Рисунок 4.5 – Час прибуття бригад ЕМД до/після оптимізації за моделлю р-медіан

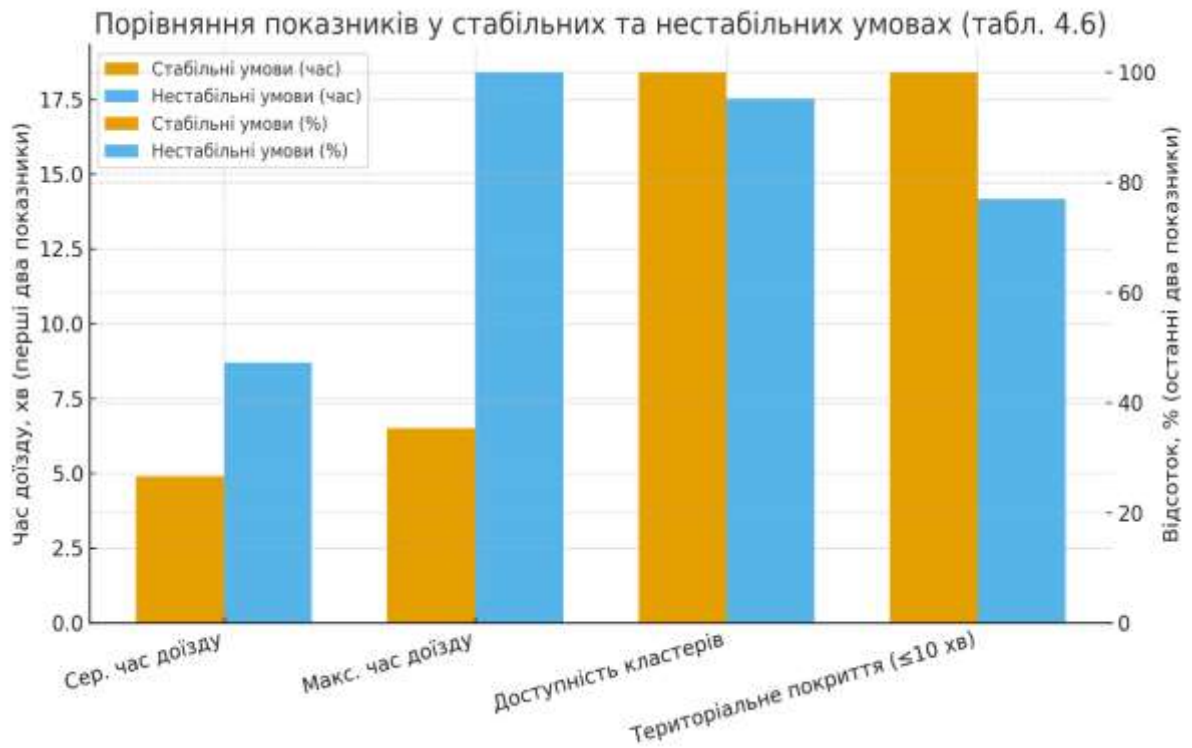


Рисунок 4.6 – Порівняння показників у стабільних та нестабільних умовах

Використання моделі р-медіан значно покращує ситуацію у стабільних умовах, скорочуючи час прибуття бригад ЕМД на місце події в середньому на 57,7%.

Метод Монте-Карло показав, що система залишається відносно стійкою лише до втрати приблизно 10-15% дуг графа (пошкоджених доріг)

При значних пошкодженнях доріг (пошкодження 15% дуг графа та більше) система втрачає до 23% територіального покриття, що потребує оперативного розгортання пересувних станцій.

Діаграми на рис. 4.4-4.6 демонструють, що навіть за несприятливих умов центральні кластери залишаються доступними, тоді як периферійні втрачають доступність. Це підтверджує коректність підходу кластеризації та необхідність моделювання нестабільних умов.

Комбінований метод вирішення задачі розташування станцій ЕМД демонструє суттєві переваги, оскільки поєднує сильні сторони зазначених підходів і компенсує їх вразливості.

На першому етапі застосовується попередня кластеризація транспортної мережі, що дає змогу значно скоротити кількість об'єктів, які підлягають аналізу. Замість обробки великої кількості вершин дорожнього графа система переходить до аналізу обмеженої кількості центроїдів кластерів.

Це зменшує обчислювальну складність та дозволяє забезпечити швидке перепланування мережі у режимі реального часу.

Розроблений комбінований метод вирішення задачі розташування станцій ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування можна вважати придатним до використання в реальних ІС екстреної медицини.

Розроблений комбінований метод реалізується автоматизованим способом у модулі «Розташування об'єктів системи ЕМД» ІС екстреної медицини та може надавати дані для подальшого аналітичного опрацювання.

4.3 Висновки до розділу 4

Експериментальна перевірка запропонованого комбінованого методу вирішення задачі розташування станцій ЕМД та інформаційної технології є необхідним етапом для підтвердження їхньої адекватності, ефективності та практичної значущості. Моделювання реальних умов функціонування системи ЕМД дозволяє оцінити стійкість мережі станцій ЕМД до дестабілізуючих факторів та обґрунтувати управлінські рішення.

Результати експериментального дослідження комбінованого методу та інформаційної технології надають необхідну інформацію для ключових користувачів системи охорони здоров'я:

- керівників центрів ЕМД та медицини катастроф (для стратегічного планування мережі станцій ЕМД, оптимізації маршрутів та розподілу необхідних матеріальних, транспортних та людських ресурсів);
- старших диспетчерів оперативно-диспетчерських служб (для прийняття оперативних рішень щодо передислокації бригад ЕМД або розгортання мобільних пунктів базування у відповідь на виникнення зон масового попиту або руйнування інфраструктури);
- органів місцевого самоврядування та військових адміністрацій (для оцінки вразливості міської дорожньої інфраструктури та розробки планів реагування на надзвичайні ситуації).

Автоматизація процесу вирішення задачі розташування станцій ЕМД стає необхідною через низку аспектів:

- обробка великих масивів даних (сучасна міська транспортна мережа описується графами з тисячами вершин та дуг.
- швидкість прийняття рішень в умовах динамічних змін, наприклад, при раптовому перекритті доріг або масованому обстрілі, час на прийняття рішення про передислокацію вимірюється хвилинами);

– сценарний аналіз (автоматизація дозволяє застосовувати імітаційне моделювання для програвання тисяч сценаріїв «що-якщо», виявляючи приховані вразливості мережі).

ВИСНОВКИ

У результаті досліджень, які виконувались в кваліфікаційній роботі, було проведено аналіз і класифікацію організаційних об'єктів системи ЕМД (станцій, пунктів постійного та тимчасового базування, відділень багатопрофільної лікарень), актуальною проблемою для ефективного функціонування яких є їх розташування на відповідній території для надання якісної і своєчасної медичної допомоги в стабільних і нестабільних умовах функціонування.

На основі проведених досліджень розробок науковців в цій галузі, запропонованих існуючих моделей і методів, які можна застосовувати при вирішенні задачі розташування об'єктів системи ЕМД, в роботі було показано, що різні моделі та методи ефективно використовуються тільки для окремих етапів розв'язання поставленої задачі.

В кваліфікаційній роботі для вирішення задачі розташування станцій ЕМД розроблено комбінований метод, який дозволяє:

- при використанні методів кластерного аналізу вирішити проблему знаходження ефективного покриття медичною допомогою визначеної території;

- вирішити задачу розташування об'єктів системи ЕМД (станцій ЕМД) в стабільних умовах функціонування, використовуючи модель р-медіан;

- реалізувати перепланування розташування об'єктів системи ЕМД при нестабільних умовах функціонування, використовуючи метод імітаційного моделювання (метод Монте-Карло).

Для вирішення задачі розташування станцій ЕМД розроблена і обґрунтована інформаційна технологія, яка дозволяє поетапно реалізувати комбінований метод в рамках ІС екстреної медицини і внести ці розробки до загальної системи цифровізації медичного обслуговування.

В кваліфікаційній роботі проведено експериментальне дослідження способу використання розробленого комбінованого методу, яке на модельних даних продемонструвало його працездатність при вирішенні задачі розташування станцій ЕМД.

Виходячи з цього розроблене рішення для розв'язання задачі розташування станцій ЕМД є ефективним, дозволить використовувати цей метод та інформаційну технологію для планування розташування об'єктів ЕМД в стабільних і нестабільних умовах функціонування різного типу.

За тематикою кваліфікаційної роботи підготовлено та опубліковано дві статті в студентському науковому журналі «Universum».[43].

Кваліфікаційна робота виконувалась згідно з вимогами методичних вказівок з організації та виконання кваліфікаційної роботи [44] та національним стандартом ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення» [45].

Перелік джерел посилання оформлено згідно з національним стандартом ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання» [46].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Закон України «Основи законодавства України про охорону здоров'я». Документ 2801-XII, поточна редакція. Прийняття від 27.03.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення: 02.12.25).

2. Іванчов Павло В. Проблеми реформування системи охорони здоров'я в Україні: інституційний аспект. Актуальні проблеми економіки. 2020. №6 (228). С. 133-145. DOI: 10.32752/1993-6788-2020-1-228-133-145

3. Стратегія розвитку системи охорони здоров'я до 2030 року. URL: <https://moz.gov.ua/uploads/ckeditor/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F/UKR%20Health%20Strategy%20Feb%2024.2022.pdf> (дата звернення: 10.11.2025).

4. Закон України «Про екстрену медичну допомогу» № 5081-VI від 05.07.2012, № 333-VII від 18.06.2013, № 1197-VII від 10.04.2014, № 766-VIII від 10.11.2015, № 580-VIII від 02.07.2015, № 2269-VIII від 18.01.2018, № 124-IX від 20.09.2019, № 421-IX від 20.12.2019, № 1089-IX від 16.12.2020, № 1967-IX від 16.12.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5081-17#Text> (дата звернення: 24.11.2025).

5. Екстрена допомога. Сайт МОЗ. URL: <https://moz.gov.ua/uk/ekstrenadopomoga> (дата звернення: 24.11.2025).

6. Реформа екстреної медичної допомоги в Україні в контексті викликів надзвичайних ситуацій мирного і воєнного часу. Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України // Корда М. М., Гудима А. А., Цимбалюк Г. Ю. та ін. 2024. № 2 (100). С. 11–20. DOI 10.11603/1681-2786.2024.2.14781 (дата звернення: 15.11.2025).

7. Нечепоренко С. А., Васильцова Н.В. Розробка архітектури модуля «Облік та аналіз показників діяльності відділення екстреної (невідкладної)

медичної допомоги» інформаційної системи «Швидка допомога». Universum. Вінниця: UKRLOGOS Group, 2025. № 26. С. 428-444.

8. Ігнатенко О., Урузбаєва І. Розвиток цифровізації екстреної медичної допомоги. Публічно-управлінські та цифрові практики. Київ : Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Вип. 2(5). 2025. С. 31-40.

9. Деякі питання створення єдиного аеромедичного простору: Постанова Кабінету Міністрів України від 17.03.2021 р. № 262. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/262-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 25.11.2025).

10. Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 17 березня 2021 р. № 262: Постанова № 1428 від 29.12.2021. URL: https://zakononline.ua/documents/show/503601___686881 (дата звернення: 25.11.2025).

11. Про норматив прибуття бригад екстреної (швидкої) медичної допомоги на місце події: постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2020 р. № 1271. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1271-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення: 25.11.2025).

12. Уніфікований клінічний протокол екстреної медичної допомоги «Випадкове утоплення або занурення у воду». Електронний науково-практичний журнал про кардіологію «WebCardio». URL: <https://www.webcardio.org/unifikovanyj-klinichnyj-protokol-ekstrenoji-medychnoji-dopomoghy-vypadkove-utoplennya-abo-zanurennya-u-vodu.aspx>. (дата звернення: 25.11.2025).

13. Порядок формування спроможних мереж надання первинної медичної допомоги. Наказ Міністерства охорони здоров'я України, Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України 06.02.2018 № 178/24. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0215-18#Text>. (дата звернення: 24.11.2025).

14. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Типового положення про станцію екстреної (швидкої) медичної допомоги»: постанова від 21.11.2012 № 1117: із змінами, внесеними постановами КМУ від 23.12.2020 № 1314 та від 03.05.2024 № 500: станом на 15.11.2025. URL : <https://www.kmu.gov.ua/npas/245850101> (дата звернення: 15.11.2025).

15. Іскра Н.І., Печиборщ В.П., Кузьмін В.Ю. Особливості планування функції та структури відділень екстреної (невідкладної) медичної допомоги багатопрофільних лікарень на основі досвіду США. Журнал «Гострі та невідкладні стани у практиці лікаря». 2016, 5(62). С. 5-13.

16. Maghfiroh M. F. N., Hanaoka S. Mobile clinics: medical service strategy for disaster healthcare response operation. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 470–483. DOI: 10.3926/jiem.3941.

17. Wang W., Wu S., Wang S., Zhen L., Qu X. Emergency facility location problems in logistics: status and perspectives. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Vol. 154. Art. 102465. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102465.

18. Dzator M., Dzator J. Optimization models to locate health care facilities. In: El Sawah S. (ed.). *MODSIM2019, 23rd International Congress on Modelling and Simulation, 1–6 December 2019, Canberra, Australia*. Canberra, 2019. P. 96–101. DOI: 10.36334/modsim.2019.A5.dzator.

19. Яковлев С. В., Карташов О. В., Мумрієнко О. А. Формалізація та розв'язування задачі максимального покриття області з використанням бібліотеки Shapely для моніторингу територій. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2022. № 2. С. 35–45. URL: https://www.researchgate.net/publication/361829007_Formalizacia_ta_rozv'azuvanna_zadaci_maksimalnogo_pokritta_oblasti_z_vikoristannam_biblioteki_Shapely_dla_monitoringu_teritorij (дата звернення: 10.12.2025).

20. 361829007_Formalizacia_ta_rozv'azuvanna_zadaci_maksimalnogo_pokritta_oblasti_z_vikoristannam_biblioteki_Shapely_dla_monitoringu_teritorij (дата звернення: 10.12.2025).

21. Baskar A., Anthony Xavier M. Solving facility location and supply chain management problems using modified population-based TP-AB algorithm.

EAI Endorsed Transactions on Digital Transformation of Industrial Processes. 2025. Vol. 1, No. 1. DOI: 10.4108/dtip.8561. URL: <https://publications.eai.eu/index.php/dtip/article/view/8561> (дата звернення 10.12.2025).

22. Третьяк В. Ф., Воронін В. В., Дуденко С. В., Колмиков М. М. Метод пошуку маршруту в графі на основі рангового підходу до розв'язання задачі цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними. Scientific Trends and Trends in the Context of Globalization : proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference, 19–20 June 2025, Umeå, Kingdom of Sweden. 2025. No. 252. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/article/view/6932> (дата звернення: 10.12.2025).

23. Слабоспицький О. С. Задачі класифікації : навчальний посібник. Київ : Видавництво «Людмила», 2020. 43 с.

24. Солодка Н. О., Троцило О. В. Оптимальне проектування базових станцій мобільних мереж. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025. № 1(92), ч. 2. С. 210–214. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/894/857 (дата звернення: 29.09.2025).

25. Іванько К. О., Попов А. О., Іванушкіна Н. Г. Машинне навчання та обробка сигналів в біомедичних електронних системах : конспект лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 97 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058625.pdf> (дата звернення: 29.11.2025).

26. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. 4th ed. Cambridge, MA : The MIT Press, 2022. P. 620–626, 655–662.

27. Abbas A., Goosheh S. Fundamentals of Operations Management : textbook. London (ON) : Fanshawe College Pressbooks, 2024. URL: <https://ecampusontario.pressbooks.pub/fundamentalsopsmgmt/> (дата звернення: 29.11.2025).

28. Drane M., Faramarzi H. Introduction to Operations Management : textbook. [S.l.] : Seneca Open Textbook Project, [б. п.]. URL:

<https://pressbooks.senecapolytechnic.ca/operationsmanagementintro/> (дата звернення: 10.12.2025).

29. Shetab-Boushehri S.-N., Rajabi P., Mahmoudi R. Modeling location-allocation of emergency medical service stations and ambulance routing problems considering the variability of events and recurrent traffic congestion: a real case study. *Healthcare Analytics*. 2022. Art. 100048. DOI: 10.1016/j.health.2022.100048.

30. Коцовський В. М. Основи дискретної математики : навчальний посібник. Ужгород : ПП «АУТДОР-ШАРК», 2020. 128 с.

31. Кононюк А. Ю. Нейронні мережі і генетичні алгоритми : підручник. Київ : Корнійчук, 2008. 446 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Кoнoнyк_2008_470.pdf (дата звернення: 10.12.2025).

32. Марусенко Р. Алгоритми ройового інтелекту та їх застосування. Фізико-математичні та комп'ютерні науки, технології, навчання: науково-практичні рішення та підходи молодих науковців. Комп'ютерні науки та інформаційні технології : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Кропивницький : Центральноукраїнський державний університет імені В. Винниченка, 2017.

33. Kungurtsev V., Novokhatska M. Application of clustering algorithm CLOPE to the query grouping problem in the field of materialized view maintenance. *Journal of Computing and Information Technology*. 2016. Vol. 24, No. 1. P. 79–89. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/228604> (дата звернення: 10.12.2025).

34. Espinola-Arredondo A., Muñoz-Garcia F. *Game Theory : An Introduction with Step-by-Step Examples*. Cham : Palgrave Macmillan, 2023. 455 p. Розділ «Nash Equilibrium». P. 47–75.

35. Neira-Rodado D., Escobar-Velasquez J. W., McClean S. Ambulances deployment problems: categorization, evolution and dynamic problems review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022. Vol. 11, No. 2. Art. 109. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/11/2/109> (дата звернення: 10.12.2025).

36. Оптимізаційні методи та моделі : навчальний посібник / Н. В. Буреннікова, О. В. Зелінська, І. М. Ушкаленко, Ю. Ю. Буренніков. Вінниця : ВНТУ, 2019. 121 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Burennikova_2019_121.pdf (дата звернення: 02.12.2025).

37. Уривський Л. О., Мошинська А. В., Осипчук С. О. Імітаційне моделювання систем і процесів у телекомунікаціях : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 202 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/de7cd488-c9a3-433a-b6ce-a5dacff9e9dd/content> (дата звернення: 10.12.2025).

38. Нечепоренко С. А., Васильцова Н. В. Аналіз моделей та методів вирішення задачі розташування організаційних об'єктів системи екстреної медичної допомоги. *Universum*. 2025. № 27. С. 503-517.

39. Донченко М. В., Коваленко І. І. Геоінформаційні системи : навчальний посібник. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 132 с. ISBN 978-966-336-245-8. URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/449/1/%D0%94%D0%BE%D0%BD%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%9C.%20%D0%92.%20%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%96%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D1%96%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8.pdf> (дата звернення: 10.12.2025).

40. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник / П. І. Бідюк, О. Л. Тимошук, А. С. Коваленко, О. В. Коршевніюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 610 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6958f683-fbac-4506-9c85-5115c8f8b4c6/content> (дата звернення: 10.12.2025).

41. Деякі питання електронної системи охорони здоров'я : постанова Кабінету Міністрів України від 25.04.2018 № 411. Офіційний вісник України. 2018. № 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/411-2018-%D0%BF> (дата звернення: 08.12.2025).

42. Alghanmi N., Alotaibi R., Alshammari S., Alhothali A., Bamasag O., Faisal K. A survey of location-allocation of points of dispensing during public health emergencies. *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. Art. 811858. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2022.811858> (дата звернення: 10.12.2025).

43. Гавриленко С. Ю., Клименко А. М., Любченко Н. Ю., Смоляр В. Г., Тишко С. О. Теорія цифрових автоматів та формальних мов. Вступний курс: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2011. 176 с. (дата звернення: 10.12.2025).

44. Методичні вказівки щодо розробки та оформлення кваліфікаційної роботи другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Інформаційні управляючі системи та технології» спеціальності 122 Комп'ютерні науки / Упоряд.: Петров К.Е., Левикін В.М., Чалий С.Ф., Євланов М.В., Саєнко В.І., Міхнов Д.К., Міхнова А.В., Чала О.В. Харків: ХНУРЕ, 2021. 24 с.

45. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлювання. Чинний від 01-07-2017. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 31 с.

46. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Чинний від 01-07-2016. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с.