

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Мележик Роман Сергійович

УДК 621.03.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО
ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА СИСТЕМАХ
ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ**

263 – цивільна безпека

26 – національна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. _____ Р.С. Мележик

Науковий керівник

Шевченко Роман Іванович,

доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2025

АНОТАЦІЯ

Мележик Р. С. Попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на системах життєзабезпечення міст. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – Цивільна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого наукового завдання у сфері цивільного захисту – розробці інформаційної, математичної моделей та формуванню на їх основі методики, застосування якої дозволить підвищити ефективність попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру за рахунок побудови прогнозу виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерній інфраструктурі міста.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів та підходів до попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на системах життєзабезпечення міст.

2. Розробити інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

3. Розробити математичну модель оцінки ефективності управління процесом попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста.

4. Розробити методику попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

5. Перевірити достовірність розроблених моделей та методики на їх основі.

Об'єкт дослідження – процес попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

Предмет дослідження – параметри процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

Для розв'язання поставлених наукових задач в дисертаційному дослідженні використовували моделі та методи теорії систем, теорію випадкових процесів, дискретно-подієве та імітаційне моделювання, методи математичної статистики, методи аналізу багатовимірних рядів, методи геостатистики.

При виконанні дисертації отримано нові наукові результати:

– *вперше розроблено інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, яка складається з дев'яти функціональних блоків, поєднаних прямими та зворотними зв'язками, що у сукупності забезпечує комплексне вирішення задачі (моніторинг, антикризове управління та управління обмеженими ресурсами), маючи за мету створення дієвої системи протидії надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на системах життєзабезпечення міст;*

– *вперше розроблено математичну модель оцінки ефективності управління надзвичайними ситуаціями техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, яка є різницею двох значень ймовірностей. Перша – поточне значення ймовірності виявлення ознак виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Друга – стандартне значення ймовірності, отримане для типового сценарію розвитку подій;*

– *вперше розроблено методику попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст у складі керуючого алгоритму та його процедурного*

наповнення, а саме процедур: обґрунтування та визначення форматів вихідних (вихідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення; інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення; організаційно-технічна реалізація розробленої математичної моделі аварії на інженерній мережі як джерела можливої надзвичайної ситуації; програмно-апаратна реалізація інформаційної моделі та методики на її основі; обґрунтування відповідних управлінських рішень, що дозволяє у подальшому мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення шляхом зниження ймовірності або недопущення останніх;

– *вперше розроблено інтерактивний апаратно-програмний комплекс попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, який базується: на функціоналі територіальної інформаційної системи в складі цифрової картографічної основи під управлінням ГІС-оболонки; прикладного програмного забезпечення для прогнозу наслідків НС та відповідної бази даних НС.*

У вступі обґрунтована актуальність напрямку досліджень за обраною темою; зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульована мета і завдання наукового дослідження; розкрита наукова новизна отриманих результатів і практична цінність роботи; наведені дані про особистий внесок здобувача і апробацію результатів дисертації.

У першому розділі визначено, що кожна з систем життєзабезпечення є важливою для нормального функціонування міста і їх уразливість до аварій може вплинути на комфорт і безпеку людей, мати довготривалі наслідки для розвитку міста, спричиняти фінансові труднощі та погіршення екологічної ситуації. Тому важливо забезпечувати стійкість та безпеку цих систем, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, воєнного стану та післявоєнної відбудови. Також зазначено, що системи життєзабезпечення міст мають низку уразливих місць, зокрема, застарілу інфраструктуру та взаємозалежність між

ними, перевантажень, характерна відсутність резервних потужностей або альтернативних джерел постачання ресурсів, ефективного моніторингу та оповіщення, кіберзагрози та уразливості в управлінні, що ускладнює реагування на надзвичайні ситуації. В умовах воєнного стану ці системи стають мішенями для атак, що може призвести до серйозних збоїв у їх функціонуванні. Оцінка уразливості систем життєзабезпечення допомагає своєчасно виявити потенційні загрози та вжити необхідних заходів для забезпечення комфорту і безпеки людей в будь-яких умовах.

У другому розділі вирішено завдання наукового дослідження щодо розробки інформаційної моделі підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Спочатку розглянуто механізми виникнення надзвичайних ситуацій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Далі розглянуто сучасний стан з попередження надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Після чого розроблено інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Модель складається з дев'яти функціональних блоків, поєднаних прямими та зворотними зв'язками, що у сукупності забезпечує комплексне вирішення задачі (моніторинг, антикризове управління та управління обмеженими ресурсами) маючи на меті створення дієвої системи протидії надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на системах життєзабезпечення міст.

У третьому розділі вирішено завдання наукового дослідження щодо розробки математичної моделі оцінки ефективності управління процесом попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Спочатку розглянуто системні особливості процесу попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Далі розглянуто особливості фази попередження надзвичайних ситуацій техногенного

характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Надалі виконано моделювання інженерних мереж систем життєзабезпечення міста як джерела надзвичайної ситуації техногенного характеру. Розглянуто характеристику процесу управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста як складової частини процесу управління ризиками. Після чого наведено опис математичної моделі оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Остання є різницею двох значень ймовірностей. Перша – поточне значення ймовірності виявлення ознак виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Друга – стандартне значення ймовірності, отримане для типового сценарію розвитку подій.

У четвертому розділі вирішено завдання наукового дослідження щодо розробки методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Спочатку сформовано інтегральну оціночну функцію важкості надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Далі розглянуто алгоритм практичної реалізації методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. На завершення надано опис процедур реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, яка складається з керуючого алгоритму та його процедурного наповнення, а саме процедур: обґрунтування та визначення форматів вихідних (вхідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення; інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення; організаційно-технічна реалізація розробленої математичної моделі аварії на інженерній мережі як джерела можливої надзвичайної ситуації; програмно-апаратна реалізація інформаційної моделі та методики на її основі;

обґрунтування відповідних управлінських рішень, що дозволяє у подальшому мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення шляхом зниження ймовірності або недопущення останніх.

У п'ятому розділі вирішено завдання наукового дослідження з перевірки достовірності розроблених моделей та методики. Спочатку розглянуто протокол інформаційного забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Далі надано опис інтерактивного апаратно-програмного комплексу. Після чого проаналізовано результати експериментів, які отримані за допомогою розробленого інтерактивного апаратно-програмного комплексу, що реалізує раніше розроблені математичну модель та відповідну методику та зроблено висновок про їх достовірність, а саме доведено, що результати натурного дослідження процесу настання аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби на водомережах Шевченківського району м. Харкова входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомогою розробленого математичного апарату, розрахованого з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі та методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення, що була створена на основі інформаційної та математичної моделей.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні алгоритмів реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Використання їх та інструментальних засобів створеного апаратно-програмного інтерактивного комплексу імітаційного моделювання параметрів надзвичайної ситуації техногенного характеру дозволяє формувати управлінські рішення щодо побудови плану оперативно-рятувальних дій територіальних підрозділів Державної служби України з

надзвичайних ситуацій (ДСНС України) у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Крім того, запропонований інтерактивний апаратно-програмний комплекс, який базується на розроблених інформаційній та математичній моделях попередження процесу виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій визначених типів в умовах мегаполісу, може бути застосований при управлінні програмами еволюції логістичної інфраструктури великих міст, що передбачає врахування невизначеності зовнішнього та внутрішнього середовища функціонування мегаполісу, зокрема, можливості виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, ідентифікація небезпеки, системи життєзабезпечення міст, попередження, прогнозування.

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Рогозін А. С., Мележик Р. С. Моделювання оперативної діяльності підрозділів оперативно-рятувальної служби. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 3(47). С. 96–99.

Здобувачу особисто належить аналіз інструментальних засобів прогнозування надзвичайних ситуацій техногенного характеру в умовах мегаполісу

2. Новожилова М. В., Чуб О. І. Мележик Р. С. Прогнозування параметрів надзвичайної ситуації техногенного характеру мегаполіса в умовах мегаполісу. Колективна монографія «Інформаційні системи і технології в міському просторі». Харків : ХНУМГ імені О.М. Бекетова. 2019. С. 150–166.

Здобувачу особисто належить побудова просторово-часової імітаційної моделі виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації із

застосуванням нестационарного розподілу Пуассона як аналітичного опису випадкових моментів реалізації надзвичайної ситуації

3. Новожилова М. В., Чуб І. А., **Мележик Р. С.** Імітаційне моделювання міської інженерної інфраструктури як джерела техногенної надзвичайної ситуації. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2018. Вип. 27. С. 169–174.

Здобувачу особисто належить формування імітаційної моделі виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури міста

4. Новожилова М. В., Чуб О. І., **Мележик Р. С.** Концепція city-логістики в управлінні мегаполісом. *Комунальне господарство міст*. 2018. № 139. С. 193–197.

Здобувачу особисто належить аналіз шляхів використання концепції сіті-логістики при формуванні програми розвитку житлово-комунального господарства мегаполісу з точки зору підвищення рівня техногенної безпеки

5. Чуб О. І., Новожилова М. В., **Мележик Р. С.** Модель функціонування логістичної інфраструктури мегаполіса в умовах надзвичайної ситуації техногенного характеру. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2018. № 4. С. 26–31.

Здобувачу особисто належить формулювання моделювання параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури як заявки на обслуговування логістичною підсистемою системи техногенної безпеки мегаполісу

6. Novozhylova M. V., Andronov V. A., **Melezhik R. S.** Computer modeling parameters of technogenic emergency situations on engineering infrastructure of the megapolis. *Radio Electronics, Computer Science. Control*. 2021. № 1. P. 66–77. Видання включене до наукометричної бази Web of Science.

Здобувачу особисто належить формулювання узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів територіальної системи техногенної безпеки в режимі техногенної надзвичайної ситуації

7. Miasoiedova A., Minska N., Shevchenko R., Azarenko O., Lukashenko V., Kyrychenko O., Zemlianskyi O., Trefilova L., Kamyshentsev G., **Melezhyk R.**

Improving the manufacturing technology of sensing gas sensors based on zinc oxide by using the method of magnetron sputtering on direct current. *Esteem-European Journal of Enterprise Technologies*. Applied physics. 2023. Vol. 2. № 5(122). P. 31–37.

Здобувачу особисто належить аналіз літературних та інформаційних джерел та формування логічних зав'язків інформаційної моделі управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Чуб І. А., Мележик Р. С., Новожилова М. В. Оцінювання просторово розподілених статистичних даних щодо стану виробничої бази мегаполісу як джерела надзвичайних ситуацій техногенного характеру. *Профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій* : збірник матеріалів наук.-практ. сем., м. Харків, 19 квітня 2017 р. / Харків НУЦЗУ. 2017. С. 61–63. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить побудова аналітичної ймовірнісної прогнозної моделі просторово-часових рядів відмов з урахуванням можливого ступеню важкості наслідків техногенної надзвичайної ситуації

9. Чуб І. А., Попов В. М., Мележик Р. С. Формалізація задачі прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій. *Інформаційні системи та технології ICT-2017* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. м. Коблево, 11–16 вересня 2017 р. / Харків, 2017. С. 61–63. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить побудова просторово-часової імітаційної моделі виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації із застосуванням нестационарного розподілу Пуассона як аналітичного опису випадкових моментів реалізації надзвичайної ситуації

10. Чуб І. А., Михайловська Ю. В., Мележик Р. С. Прогнозування ресурсного забезпечення ліквідації техногенної надзвичайної ситуації. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку* : матеріали XIX Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, м. Київ. ІДУЦЗ, 10–11 жовтня 2017 р. /

Київ, 2017. С. 358–360. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить формулювання узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів територіальної системи техногенної безпеки в режимі техногенної надзвичайної ситуації

11. Чуб І. А., Новожилова М. В., **Мележик Р. С.** Розподіл надзвичайних ситуацій на інженерній інфраструктурі мегаполісу. *Інформаційні системи та технології ICT-2018* : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Коблево, 10–15 вересня 2018 р. / Харків, 2018. С. 247–249. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить побудова карт ймовірності, які дозволяють визначити локальну функцію розподілу в точці оцінювання, а також отримати набір рівноймовірних стохастичних просторових реалізацій розподілу змінної, що спостерігається, при реалізації імітаційної моделі виробничої системи мегаполісу

12. **Мележик Р. С.** Прогнозування виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури мегаполісу. *Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах* : Матеріали 21 Всеук. наук.-практ. конф., 15–16 жовтня 2019 р. / Київ. тез. доп. Київ, ІДУЦЗ. 2019. С. 184–186. (Форма участі – заочна).

13. Чуб І. А., **Мележик Р. С.** Імітаційне моделювання міської інженерної інфраструктури як джерела техногенної надзвичайної ситуації в мегаполісі. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням* : матеріали круг. столу, м. Харків, 24 жовтня 2019 р. / Харків, НУЦЗУ. 2019. С. 129–131. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить параметрична та структурна ідентифікація імітаційної моделі прогнозу виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації в умовах міського середовища

14. **Мележик Р. С.** Особливості техногенних надзвичайних ситуацій на інженерних мережах мегаполісу. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали

Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 20 травня 2020 р. / Харків, НУЦЗУ. 2020. С. 112–113. (Форма участі – заочна).

15. **Мележик Р. С.**, Михайловська Ю. М. Проектування системи підтримки прийняття рішень з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру Інформаційні технології. *Теорія і практика* : тези доповідей III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. здобув. вищої освіти і молодих учених, м. Харків, ХНУМГ імені О. М. Бекетова 3–5 червня 2020 р. / Харків, 2020. С. 72–73. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить математична процедура врахування ієрархії управління та інтеграції моделей рішень, що відповідають певним етапам управління процесом ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру

16. **Мележик Р. С.** Імітаційне моделювання міської інженерної інфраструктури. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 02 квітня 2022 р. / Харків, НУЦЗУ. 2022. С. 62–63. (Форма участі – заочна).

17. Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., **Мележик Р. С.**, Щолоков Е. Е. Спосіб протипожежного захисту нормально відкритих отворів в перекриттях. XII International Scientific And Practical Conference «*Development Trends And Improvement Of Old Methods*». Warsaw, Poland, December 12–15. 2023. P. 418–421.

Здобувачу особисто належить математична процедура врахування ієрархії управління та інтеграції моделей рішень, що відповідають певним етапам управління процесом ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру

ABSTRACT

Melezhik R. S. Prevention of Technogenic emergencies as a result of accidents on the life support systems of cities. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 263 – Civil Security. – National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is devoted to solving an important scientific problem in the field of civil protection – the development of information, mathematical models and the formation of a methodology based on them, the application of which will allow increasing the effectiveness of preventing man-made emergencies by building a forecast of the occurrence and development of man-made emergencies in the engineering infrastructure of the city.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following scientific problems.

1. To analyze modern methods and approaches to the prevention of technogenic emergencies as a result of accidents in urban life support systems.
2. To develop an information model to improve the efficiency of preventing industrial emergencies as a result of accidents in the engineering networks of urban life support systems.
3. To develop a mathematical model for assessing the effectiveness of managing the process of preventing a technogenic emergency in the engineering networks of urban life support systems.
4. To develop a methodology for preventing industrial emergencies due to accidents in the engineering networks of urban life support systems.
5. To verify the reliability of the developed models and methods based on them.

The object of research is the process of preventing technogenic emergencies as a result of accidents in the engineering networks of urban life support systems.

The subject of the study is the parameters of the process of preventing technogenic emergencies as a result of accidents in the engineering networks of urban life support systems. To solve the scientific problems set in the dissertation research, models and methods of systems theory, the theory of random processes, discrete-event simulation modeling, methods of mathematical statistics, methods of analysis of multivariate series, and methods of geostatistics were used.

During the execution of the dissertation, new scientific results were obtained:

- for the first time, an information model was developed to increase the effectiveness of preventing man-made emergencies due to accidents on engineering networks of city life support systems. It consists of nine functional blocks connected by direct and feedback loops, which together provide a comprehensive solution to the problem (monitoring, anti-crisis management and management of limited resources) with the aim of creating an effective system for combating man-made emergencies on city life support systems;

- for the first time, a mathematical model was developed to assess the effectiveness of managing man-made emergencies on engineering networks of city life support systems, which is the difference of two probability values. The first is the current value of the probability of detecting signs of man-made emergencies on engineering networks of city life support systems. The second is the standard probability value obtained for a typical scenario of events;

- for the first time, a methodology for preventing man-made emergencies due to accidents on engineering networks of urban life support systems has been developed, as part of the control algorithm and its procedural content, namely the procedures: justification and definition of formats of output (input) data on the state of engineering networks of life support systems; engineering and technical justification of the system for monitoring the state of engineering networks of life support systems; organizational and technical implementation of the developed mathematical model of an accident on an engineering network as a source of a possible emergency; software and hardware implementation of the information model and methodology based on it; justification of relevant management decisions, allowing to further minimize the consequences of man-made emergencies due to accidents on engineering networks of life support systems, by reducing the probability or preventing the latter;

- for the first time, an interactive hardware and software complex has been developed to prevent man-made emergencies due to accidents on engineering networks of urban life support systems, based on the functionality of a territorial

information system as part of a digital cartographic basis managed by a GIS shell; application software for predicting the consequences of emergencies and the corresponding emergency database.

The introduction substantiates the relevance of the research direction on the chosen topic; indicates the connection of the work with scientific programs, plans, topics; formulates the goal and objectives of the scientific research; reveals the scientific novelty of the results obtained and the practical value of the work; provides data on the personal contribution of the applicant and the approval of the results of the dissertation.

The first section determines that each of the life support systems is important for the normal functioning of the city, and their vulnerability to accidents can affect the comfort and safety of people, have long-term consequences for the development of the city, cause financial difficulties and deterioration of the environmental situation. Therefore, it is important to ensure the stability and safety of these systems, especially in conditions of emergency situations, martial law and post-war reconstruction. It is also noted that urban life support systems have a number of vulnerabilities, including outdated infrastructure and interdependence between them, overloads, a characteristic lack of reserve capacity or alternative sources of supply of resources, effective monitoring and notification, cyber threats and vulnerabilities in management, which complicates the response to emergencies. In conditions of martial law, these systems become targets for attacks, which can lead to serious disruptions in their functioning. Assessing the vulnerability of life support systems helps to timely identify potential threats and take necessary measures to ensure the comfort and safety of people in any conditions.

The second section solves the second task of the scientific research on the development of an information model to increase the effectiveness of preventing man-made emergencies due to accidents in engineering networks of urban life support systems. First, the mechanisms of emergency situations in engineering networks of urban life support systems are considered. Next, the current state of emergency prevention due to accidents on engineering networks of urban life support

systems is considered. After that, an information model was developed to increase the effectiveness of preventing emergencies of a technogenic nature due to accidents on engineering networks of urban life support systems. The latter consists of nine functional blocks connected by direct and feedback loops, which together provide a comprehensive solution to the problem (monitoring, anti-crisis management and management of limited resources) with the aim of creating an effective system for countering emergencies of a technogenic nature on urban life support systems.

The third section solves the third task of the scientific research on the development of a mathematical model for assessing the effectiveness of the management of the process of preventing a technogenic emergency on the engineering networks of the city's life support systems. First, the system features of the process of preventing a technogenic emergency on the engineering networks of the city's life support systems are considered. Then, the features of the phase of preventing technogenic emergencies due to accidents on the engineering networks of the city's life support systems are considered. Further, the modeling of the engineering networks of the city's life support systems as a source of a technogenic emergency is performed. The characteristics of the process of managing a technogenic emergency on the engineering networks of the city's life support systems as a component of the risk management process are considered. After that, a description of the mathematical model for assessing the effectiveness of the management of technogenic emergencies on the engineering networks of the city's life support systems is given. The latter is the difference of two probability values. The first is the current value of the probability of detecting signs of man-made emergencies on the engineering networks of the city's life support systems. The second is the standard probability value obtained for a typical scenario of events.

In the fourth section, the fourth task of the scientific research on the development of a methodology for preventing man-made emergencies due to accidents on the engineering networks of the city's life support systems is solved. First, an integral evaluation function of the severity of a man-made emergency due to accidents on the engineering networks of the life support systems is formed. Then, an

algorithm for the practical implementation of the methodology for preventing a man-made emergency due to accidents on the engineering networks of the life support systems is considered. Finally, a description of the procedures for implementing the methodology for preventing man-made emergencies due to accidents on engineering networks of urban life support systems is provided, which consists of a control algorithm and its procedural content, namely the procedures: justification and definition of formats of output (input) data on the state of engineering networks of life support systems; engineering and technical justification of the system for monitoring the state of engineering networks of life support systems; organizational and technical implementation of the developed mathematical model of an accident on an engineering network as a source of a possible emergency; software and hardware implementation of the information model and methodology based on it; justification of relevant management decisions, which allows in the future to minimize the consequences of man-made emergencies due to accidents on engineering networks of life support systems, by reducing the probability or preventing the latter.

In the fifth section, the fifth task of the scientific research on checking the reliability of the developed models and methods is solved. First, the protocol of information support for the implementation of the method of preventing emergencies of a technogenic nature is considered. Then a description of the interactive hardware and software complex is provided. After that, the results of the experiments obtained with the help of the developed interactive hardware and software complex, which implements the previously developed mathematical model and the corresponding method, are analyzed and we will draw a conclusion about their reliability, namely, it is proven that the results of a field study of the process of the occurrence of accidents with a duration of localization and liquidation of more than one day on the water networks of the Shevchenkivskyi district of the city. Kharkiv are included in the confidence interval obtained during computer modeling using the developed mathematical apparatus, calculated with a reliability of 0.95, which confirms the reliability of the developed mathematical model and the methodology for preventing

man-made emergencies due to accidents on engineering networks of life support systems, which was created on the basis of information and mathematical models.

The practical significance of the results obtained is in creating algorithms for implementing the methodology for preventing man-made emergencies due to accidents on engineering networks of life support systems of cities. Under the conditions of their use and the tools of the created hardware and software interactive complex for simulation modeling of man-made emergency parameters, it allows forming management decisions regarding the construction of a plan of operational and rescue actions of territorial units of the State Emergency Service of Ukraine (SES of Ukraine) in the event of man-made emergencies.

In addition, the proposed interactive hardware and software complex, which is based on the developed information and mathematical models of the process of preventing the emergence and development of emergencies of certain types in the conditions of a megalopolis, can be used in the management of programs for the evolution of the logistics infrastructure of large cities, which involves taking into account the uncertainty of the external and internal environment of the functioning of a megalopolis, in particular the possibility of an emergency of a technogenic nature.

Key words: emergency, hazard identification, urban life support systems, warning, forecasting.

ЗМІСТ

Анотація	2
Зміст	19
Перелік умовних скорочень	22
Вступ	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА СИСТЕМАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ	30
1.1. Основні небезпеки на системах життєзабезпечення міст та їх наслідки	30
1.2. Уразливість систем життєзабезпечення міст до надзвичайних ситуацій	32
1.3. Організаційно-управлінські підходи до попередження надзвичайних ситуацій	35
1.4. Інженерно-технічні методи забезпечення безпеки систем життєзабезпечення	40
1.5. Особливості попередження аварій у системах життєзабезпечення в умовах воєнного стану	42
Висновки за першим розділом	45
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ	47
2.1. Механізми виникнення надзвичайних ситуацій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст	47
2.2. Сучасний стан діагностування технічного стану та	

попередження надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст	51
2.3. Інформаційна модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст	62
Висновки за другим розділом	67
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТА	69
3.1. Системні особливості процесу попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення	70
3.2. Особливості фази попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення	80
3.3. Моделювання інженерних мереж систем життєзабезпечення міста як джерела надзвичайної ситуації техногенного характеру	84
3.4. Характеристика процесу управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста як складової частини процесу управління ризиками	94
3.5. Опис математичної моделі оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста	100
Висновки за третім розділом	106

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ	108
4.1. Формування інтегральної оціночної функції важкості надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення	108
4.2. Алгоритм практичної реалізації методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення	114
4.3. Опис процедур реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст	124
Висновки за четвертим розділом	130
РОЗДІЛ 5. ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДИКИ	132
5.1. Протокол інформаційного забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру	132
5.2. Розробка інтерактивного апаратно-програмного комплексу	136
5.3. Результати експериментів з перевірки достовірності розробленої математичної моделі та методики на її основі	142
Висновки за п'ятим розділом	159
ВИСНОВКИ	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	164
ДОДАТОК А	185
ДОДАТОК Б	191

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДСНС України	– Державна служба України з надзвичайних ситуацій
ЄС	– Європейський Союз
ЖКГ	– житлово-комунальне господарство
НС	– надзвичайна ситуація
НУЦЗУ	– Національний університет цивільного захисту України
ОКІ	– об’єктів критичної інфраструктури
ОПР	– особа, що приймає рішення
ОРС ЦЗ	– оперативно-рятувальна служба цивільного захисту
ОТМ	– організаційно-технічний метод
ПЛАС	– план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій та аварій
ПНО	– потенційно небезпечний об’єкт
ПРВ	– подача та розподіл води
СТБ	– система техногенної безпеки
ТЗ	– транспортний засіб
ТНС	– надзвичайна ситуація техногенного характеру
ТП	– територіальний підрозділ
ТСТБ	– територіальна система техногенної безпеки

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. За оцінками Організації об'єднаних націй зростання чисельності населення супроводжується його старінням, зниженням рівня народжуваності, а також стрімкою урбанізацією. Вже через 30 років майже 70% загального населення планети складатиме міське населення, тобто людство проживатиме в мегаполісах – локаціях порядку одного мільйона людей з високою щільністю населення за наявності так званої маятникової міграції жителів. Функціонування об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) саме у мегаполісі пов'язано із додатковими підвищеними ризиками, які генеруються значною щільністю міського населення, критичною наближеністю об'єктів із масовим перебуванням людей до ОКІ, високим рівнем старіння основних фондів об'єктів міської інфраструктури та поглиблюється невизначеністю або відсутністю оперативної і повної інформації про міське господарство.

Складність, динамічність, загалом невизначеність відносин системоутворюючих компонент міської території, збільшення кількості промислових комплексів та небезпечних матеріалів у міських районах, що знаходяться під загрозою природної небезпеки, спричиняє руйнування рівноваги в екосистемах, в результаті чого виникають надзвичайні ситуації техногенного характеру різних рівнів та техногенні катастрофи.

При цьому значно зростає антропогенне навантаження, що призводить до зростання кількості і тяжкості надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру на системах життєзабезпечення великого міста як загалом, так і безпосередньо на мережі водогонів.

Надзвичайні ситуації техногенного характеру (ТНС) на системах інженерної інфраструктури мегаполіса, мають загалом локальний характер, але можуть бути критичними за значенням для функціонування міста і значним чином впливати на якість життя населення. Отже, прогнозування виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру

визначеного типу є необхідною складовою етапу попередження надзвичайної ситуації та має значний соціальний ефект.

Небезпеки можуть провокуватися усіма компонентами міста як складної відкритої динамічної системи, тому комплексний підхід до прогнозування динаміки НС техногенного характеру, що включає розгляд як потенційно небезпечних промислових об'єктів, так і складових системи життєзабезпечення міста, зокрема, інженерних мереж, є актуальним.

Крім того, поширення ТНС на системах життєзабезпечення міста мегаполіса може носити каскадний характер та служити причиною або фактором, що ускладнює проведення рятувальних операцій щодо можливої НС на потенційно небезпечних промислових об'єктах міста.

Таким чином, в умовах сучасного міста особливого значення набуває наявність системи технічних, організаційних, інформаційно-комунікаційних засобів недопущення виникнення НС техногенного характеру, а саме засобів забезпечення першої фази життєвого циклу НС – фази попередження НС. Світова практика свідчить про те, що реалізація методів та засобів попередження НС дозволяє уникнути їх виникнення або скоротити в 2–3 рази витрати на ліквідацію наслідків.

Ефективним принципом попередження НС техногенного характеру на системах життєзабезпечення міста є створення, розвиток та реалізація арсеналу моделей та методів прогнозування параметрів аварій, які є джерелом виникнення НС.

Характерною ознакою задачі прогнозування надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інфраструктурних мережах міст України є їх значна зношеність та додаткове ушкодження внаслідок постійних воєнних впливів з боку терористичних військ російської федерації, що обумовлює нестаціонарний розподіл моментів настання ТНС.

Таким чином, підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру за рахунок побудови прогнозу виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерній

інфраструктурі міста є актуальною науково-практичною задачею сфери цивільної безпеки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано відповідно до Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 квітня 2011 року № 368-р. «Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2012-2016 роки», «Стратегії реформування системи Державної служби з надзвичайних ситуацій», схваленої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 січня 2017 р. № 61-р. та Плану заходів з реалізації Стратегії розвитку органів системи Міністерства внутрішніх справ на період до 2020 року, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 року № 693, та у рамках науково-дослідної роботи «Побудова прогнозу виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру» (№ ДР 0118U001004), де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка інформаційної, математичної моделей та формування на їх основі методики, застосування якої дозволить підвищити ефективність попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру за рахунок побудови прогнозу виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерній інфраструктурі міста.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були поставлені та розв'язані наступні наукові завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів та підходів до попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на системах життєзабезпечення міст.

2. Розробити інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

3. Розробити математичну модель оцінки ефективності управління процесом попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста.

4. Розробити методику попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

5. Перевірити достовірність розроблених моделей та методики на їх основі.

Об'єкт дослідження – процес попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

Предмет дослідження – параметри процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

Методи дослідження Для розв'язання поставлених наукових задач в дисертаційному дослідженні використовувалися моделі та методи теорії систем, теорія випадкових процесів, дискретно-подієве імітаційне моделювання, методи математичної статистики, методи аналізу багатовимірних рядів, методи геостатистики.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-практичну задачу в галузі цивільної безпеки з підвищення ефективності процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерній інфраструктурі міста за рахунок формування дієвого механізму з прогнозу виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій.

При виконанні дисертації отримано нові наукові результати:

– *вперше розроблено інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, яка складається з дев'яти функціональних блоків, поєднаних прямими та*

зворотними зв'язками, що у сукупності забезпечує комплексне вирішення задачі (моніторинг, антикризове управління та управління обмеженими ресурсами), маючи за мету створення дієвої системи протидії надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на системах життєзабезпечення міст;

– *вперше розроблено* математичну модель оцінки ефективності управління надзвичайними ситуаціями техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, яка є різницею двох значень ймовірностей. Перша – поточне значення ймовірності виявлення ознак виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Друга – стандартне значення ймовірності, отримане для типового сценарію розвитку подій;

– *вперше розроблено* методику попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, у складі керуючого алгоритму та його процедурного наповнення, а саме процедур: обґрунтування та визначення форматів вихідних (вхідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення; інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення; організаційно-технічна реалізація розробленої математичної моделі аварій на інженерній мережі як джерела можливої надзвичайної ситуації; програмно-апаратна реалізація інформаційної моделі та методики на її основі; обґрунтування відповідних управлінських рішень, що дозволяє у подальшому мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення шляхом зниження ймовірності або недопущення останніх;

– *вперше розроблено* інтерактивний апаратно-програмний комплекс попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, який базується на функціоналі територіальної інформаційної системи в складі цифрової

картографічної основи під управлінням ГІС-оболонки; прикладного програмного забезпечення для прогнозу наслідків НС та відповідної бази даних НС.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні алгоритмів реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Використання їх та інструментальних засобів створеного апаратно-програмного інтерактивного комплексу імітаційного моделювання параметрів надзвичайної ситуації техногенного характеру дозволяє формувати управлінські рішення щодо побудови плану оперативно-рятувальних дій територіальних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України) у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Крім того, запропонований інтерактивний апаратно-програмний комплекс, який базується на розроблених інформаційній та математичній моделях попередження процесу виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій визначених типів в умовах мегаполісу, може бути застосований при управлінні програмами еволюції логістичної інфраструктури великих міст, що передбачає врахування невизначеності зовнішнього та внутрішнього середовища функціонування мегаполіса, зокрема можливість виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто і наведені в роботах додатку А [А1–А7]. В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: [А1] – аналіз інструментальних засобів прогнозування надзвичайних ситуацій техногенного характеру в умовах мегаполісу; [А2] – побудова просторово-часової імітаційної моделі виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації із застосуванням нестационарного розподілу Пуассона як аналітичного опису випадкових моментів реалізації надзвичайної ситуації; [А3] – формування імітаційної

моделі виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури міста; [A4] – аналіз шляхів використання концепції сіті-логістики при формуванні програми розвитку житлово-комунального господарства мегаполісу з точки зору підвищення рівня техногенної безпеки; [A5] – формулювання та моделювання параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури як заявки на обслуговування логістичною підсистемою системи техногенної безпеки мегаполісу; [A6] – формулювання узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів територіальної системи техногенної безпеки в режимі техногенної надзвичайної ситуації; [A7] – аналіз літературних та інформаційних джерел та формування логічних зав'язків інформаційної моделі управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць: 2 статті у наукових виданнях, які входять до наукометричної бази Scopus та Web of Science, 4 статті у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз, 1 розділ колективної міжнародної монографії, та 10 тез доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота загальним обсягом 195 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 185 найменувань і 2-х додатків, містить 29 рисунків та 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА СИСТЕМАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ

1.1 Основні небезпеки на системах життєзабезпечення міст та їх наслідки

Системи життєзабезпечення міст (СЖМ) – це сукупність інженерних, технічних та організаційних систем, які забезпечують нормальне функціонування урбанізованих територій, підтримують життєдіяльність населення та забезпечують комфортні умови для проживання.

СЖМ схильні до надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру, що виникають через аварії, поломки або інші людські фактори, особливо в умовах воєнного стану [1, 2]. У таких умовах НС набувають нових, ще більш небезпечних рис.

Техногенні НС, такі як аварії на електростанціях, підстанціях, пошкодження енергетичних мереж або котелень, можуть призвести до відключення енергопостачання, що викликає перебої в подачі електричної енергії, тепла та гарячої води. Це може мати серйозні наслідки для функціонування інших СЖМ, зокрема водопостачання та транспорту [3].

В умовах воєнного стану енергетична інфраструктура може стати прямою мішенню для ворожих атак. Вибухи, ракетні удари можуть призвести до значних збоїв у подачі енергії [4–6].

Викиди забруднюючих речовин у водні джерела, аварії на водозабірних станціях або трубопроводах, а також катастрофи на системах очищення

стічних вод можуть призвести до забруднення питної води або відсутності належного відведення стічних вод. Це може спричинити серйозні екологічні катастрофи та небезпеку для здоров'я мешканців [7].

Втрата доступу до чистої води під час війни стає серйозною гуманітарною проблемою [8, 9].

Техногенні катастрофи в транспортній сфері, такі як аварії на залізничних коліях, на дорогах, аварії в метрополітенах, а також катастрофи з транспортними засобами можуть призвести до значних затримок у перевезеннях, порушення зв'язків між районами та обмеження мобільності населення [10].

Пошкодження транспортної інфраструктури під час збройних дій ускладнює евакуацію, постачання гуманітарної допомоги, забезпечення військових і медичних підрозділів [11, 12].

Аварії на системі управління відходами, як елемент СЖМ, що включає мережу об'єктів для збору, транспортування, переробки та утилізації побутових і промислових відходів можуть призвести до забруднення навколишнього середовища, створення небезпечних умов для здоров'я людей [13, 14].

Усі системи життєзабезпечення взаємопов'язані й взаємодіють між собою. Наприклад, енергетична система забезпечує енергію для водопостачання, а також для транспорту. Транспортна система потребує електричних мереж для роботи громадського транспорту.

Таким чином, кожна з систем життєзабезпечення є важливою для нормального функціонування міста, і їх уразливість до аварій може вплинути на комфорт та безпеку людей, мати довготривалі наслідки для розвитку міста, спричиняти фінансові труднощі та погіршення екологічної ситуації. Тому важливо забезпечувати стійкість та безпеку цих систем, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, воєнного стану та післявоєнної відбудови.

1.2 Уразливість систем життєзабезпечення міст до надзвичайних ситуацій

Уразливість СЖМ до НС є актуальним напрямом досліджень у галузі безпеки, інженерії та управління ризиками.

У багатьох містах енергетичні системи мають застаріле обладнання, яке вже не здатне ефективно виконувати свої функції [15].

Міські енергетичні системи можуть бути схильні до перевантажень під час пікових навантажень (наприклад, влітку або взимку), що може стати причиною поломок, коротких замикань та відключень. Старі та неоновлені мережі з низьким рівнем автоматизації та контролю є особливо вразливими до небезпек [16].

У разі НС важливо мати резервні джерела енергії або можливості зберігання енергії [17]. Недостатня кількість або застарілі технології зберігання енергії можуть ускладнити швидке відновлення енергопостачання під час аварій [18].

Зі збільшенням цифровізації енергетичних систем виникає ризик кіберзагроз. Атаки на системи управління, особливо на диспетчерські центри, можуть призвести до перебоїв в енергопостачанні, маніпуляцій з параметрами енергетичних об'єктів або знищення критичних даних [19].

Багато міст мають старі водопровідні та каналізаційні мережі, які можуть бути схильні до поломок, витоків, корозії або закупорки через довготривале використання. Несправні труби, зношене обладнання на водозабірних станціях і насосних станціях можуть призвести до перебоїв у водопостачанні або утруднень у водовідведенні, що підвищує ризик забруднення водних ресурсів [20].

У випадку пошкоджень або витоків водопроводів вода може забруднювати ґрунт і підземні водоносні горизонти, що ускладнює процес очищення води та загрожує забрудненням питної води [21]. Порушення

герметичності в трубах може призвести до зниження тиску в мережі, що ускладнить подачу води споживачам.

Застарілі системи очищення води та стічних вод можуть бути неефективними, що призводить до недостатнього очищення води від шкідливих мікроорганізмів, хімічних забруднювачів та важких металів [22].

Під час великих дощів, повеней або техногенних катастроф система водовідведення може бути перевантажена, що призводить до затоплень, забруднення міських районів, пошкодження інфраструктури та виникнення санітарно-епідеміологічних загроз [23, 24].

Якщо водозабірні станції не здатні задовольнити високий попит на воду, це може призвести до зниження тиску, відключення води в деяких районах або навіть до цілковитого припинення водопостачання [25].

В умовах технологічних змін та розвитку цифрових технологій, системи водопостачання і водовідведення уразливі до кіберзагроз [26].

У разі нестабільності у постачанні хімікатів для очищення можуть виникати загрози неефективного очищення води та зростання рівня забруднення, що ставить під загрозу здоров'я населення.

Нестача сучасних систем моніторингу якості води та управління водопостачанням, а також відсутність регулярних перевірок стану мереж уповільнює процес виявлення та ліквідації аварій, що може посилити наслідки для населення [27].

Одним з основних слабких місць транспортної системи є перевантаження інфраструктури [28]. Проблеми перевантаження посилюються у разі НС або в умовах воєнного стану, коли виникає необхідність швидкого переміщення великої кількості людей або техніки.

Транспортна інфраструктура є потенційною мішенню для терористичних атак або диверсій [29].

Застаріле або погане дорожнє покриття, а також зношені мости, тунелі та інші транспортні споруди можуть стати причиною аварій, заторів та порушень руху [30].

Погіршення пропускної здатності транспортних мереж [31], незадовільний стан транспорту підсилюють небезпеку для жителів міста [32]. В умовах НС важлива оперативність і достатня кількість транспорту для евакуації людей або доставки допомоги.

Сучасні шляхи забезпечення стійкості роботи об'єктів транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану розглянуті в роботі [33].

До слабких місць у системі управління відходами можна віднести недосконалу інфраструктуру для збору та транспортування відходів [34]. У разі аварій або НС погіршується здатність системи реагувати на підвищений обсяг відходів.

Низький рівень участі громадян у сортуванні відходів та недостатня інформованість населення про важливість сортування підвищують навантаження на систему [35].

Зазначається на необхідності модернізації та оновлення об'єктів для переробки відходів. [36].

Небезпечні відходи, такі як хімічні, токсичні або радіоактивні матеріали, потребують особливих умов для зберігання та утилізації [37]. Недостатнє управління цими відходами може призвести до їх потрапляння в навколишнє середовище, забруднення ґрунтів, водних ресурсів і повітря, що створює серйозні екологічні небезпеки та загрози для здоров'я.

Значна частина полігонів для відходів досягли своєї максимальної потужності, мають обмежену кількість доступних ділянок для нових відходів і потребують регулярного очищення та підтримки [38, 39]. У разі перевантаження полігонів може виникнути проблема з викидом токсичних газів, запахами, а також із забрудненням водоносних горизонтів.

Під час НС, зокрема воєнного стану, система управління відходами може не впоратися з великими обсягами відходів, що зростають через руйнування інфраструктури або збільшення кількості забруднюючих матеріалів [40, 41]. Без належної організації та наявності резервних потужностей у таких умовах може виникнути хаос, що значно ускладнить ліквідацію наслідків НС.

Аварія в одній системі (наприклад, відключення електроенергії) може спричинити ланцюгові відмови в інших сферах. Спостерігаються каскадні ефекти відмов [42, 43].

Взаємопов'язаність інфраструктурних мереж робить міста чутливими до навіть незначних збоїв [44].

В роботі зазначається низький рівень підготовки до техногенних катастроф, а саме відсутність ефективних планів реагування на аварії на критичних об'єктах, недостатня підготовка персоналу [45, 46].

Уразливість визначається високою щільністю населення та урбанізацією. У разі аварії можливі значні людські жертви через скупчення населення. Наголошується на важкодоступності районів у випадку евакуації або ліквідації наслідків небезпеки. [47].

Таким чином, системи життєзабезпечення міст мають низку уразливих місць, зокрема застарілу інфраструктуру та взаємозалежність між ними, перевантажень, характерну відсутність резервних потужностей або альтернативних джерел постачання ресурсів, ефективного моніторингу та оповіщення, кіберзагрози та уразливості в управлінні, що ускладнює реагування на надзвичайні ситуації. В умовах воєнного стану ці системи стають мішенями для атак, що може призвести до серйозних збоїв у їх функціонуванні. Оцінка уразливості систем життєзабезпечення допомагає своєчасно виявити потенційні загрози та вжити необхідних заходів для забезпечення комфорту і безпеки людей в будь-яких умовах.

1.3 Організаційно-управлінські підходи до попередження надзвичайних ситуацій

Наукові дослідження зосереджені на впровадженні інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення безпеки та стійкості СЖМ.

Одним із напрямів є розробка систем підтримки прийняття рішень для аналізу аварій та НС у міському транспорті. Такі системи використовують дані з різних джерел для моделювання можливих сценаріїв та оптимізації дій у разі виникнення НС [48]. Це дозволяє мінімізувати наслідки та забезпечити швидке відновлення нормального функціонування транспорту.

Використання сенсорних мереж та автоматизованих систем контролю дозволяє виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях та запобігати їх переростанню в НС. Наприклад, моніторинг стану трубопроводів може виявити витoki або зниження тиску, що дозволяє оперативно вжити заходів для усунення несправностей [49].

Крім того, впровадження технологій розумного міста сприяє покращенню громадської безпеки. Інтелектуальні датчики та системи відеоспостереження можуть моніторити зони з високим рівнем злочинності або підвищеної небезпеки, забезпечуючи своєчасне інформування відповідних служб та населення про потенційні загрози [50, 51]. Це підвищує готовність до НС та сприяє швидкому реагуванню на них.

Важливою складовою є розробка систем акустичного моніторингу джерел небезпеки [52]. Такі системи здатні автоматично виявляти та ідентифікувати звуки, що свідчать про потенційні загрози, наприклад, вибухи або аварії, що дозволяє оперативно реагувати на них та запобігати масштабним наслідкам витоків води [53, 54].

Одним із перспективних напрямів є використання оптичних сенсорних мереж для моніторингу міської інфраструктури в реальному часі [55]. Ці мережі забезпечують високу точність вимірювань, стійкість до електромагнітних перешкод та здатність передавати дані на великі відстані без втрати якості сигналу.

Інтелектуальні системи управління міською інфраструктурою базуються на використанні сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) (наприклад, датчики контролю витоків води [56], якості повітря [57]), навантаження на транспортні магістралі [58] або споживання

енергії [59, 60], системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) [61, 62] та геоінформаційні системи (ГІС) [63].

ІоТ-системи використовують сенсорні мережі для збору даних про стан міської інфраструктури в режимі реального часу. Дозволяють швидко виявляти відхилення від норми та запобігати аварійним ситуаціям. Вони сприяють автоматизації процесів управління, зменшуючи залежність від людського фактору.

Іншим важливим напрямом є інтеграція мобільних сенсорних мереж із безпілотними літальними апаратами (дронами) для збору та оновлення геопросторових даних. Такі системи дозволяють оперативно отримувати інформацію про стан міської інфраструктури, особливо в важкодоступних або небезпечних для людини місцях [64].

Для забезпечення точного та узгодженого збору даних у мобільних сенсорних мережах важливою є проблема синхронізації часу між різними сенсорами [65, 66].

Сучасні дослідження також акцентують увагу на інтелектуалізації сенсорних мереж шляхом впровадження туманних обчислень. Цей підхід дозволяє обробляти дані ближче до джерела їх виникнення, зменшуючи затримки та підвищуючи надійність системи [67, 68].

Сучасні тенденції в розвитку SCADA-систем включають їх інтеграцію з іншими інформаційними технологіями для підвищення ефективності управління. Наприклад, у статті розглядається використання програмних засобів SCADA та Catman у складі перспективних інформаційно-вимірювальних систем [69].

Пропонуються стратегії додаткового захисту, такі як використання односторонніх шлюзів (data diodes) та підходів «виявлення та реагування» (detect-and-respond), для забезпечення безпечної інтеграції SCADA-систем у сучасні інфраструктури [70].

ГІС-технології дозволяють створювати інтерактивні карти міської інфраструктури, що містять інформацію про мережі електропостачання,

водопроводи, каналізацію, транспортні маршрути та екологічні об'єкти. Це дає змогу прогнозувати можливі проблеми, аналізувати наслідки НС та ефективно планувати заходи з їх попередження.

Одним із ключових напрямів є інтеграція ГІС з іншими інформаційними системами та технологіями, такими як дистанційне зондування [63], глобальні навігаційні супутникові системи [71] та лазерне сканування [72].

Важливим аспектом є розробка інтелектуальних ГІС, які здатні самонавчатися та адаптуватися до нових умов. Такі системи поєднують традиційні ГІС з елементами штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати процеси аналізу та прийняття рішень [73]

Об'єктно-просторове планування територій у поєднанні з цифровізацією міського середовища відкриває можливості для створення інноваційних, комфортних та сталих міст [74].

Впровадження систем контролю та регулювання навантажень розглядається як один із кроків до модернізації міської інфраструктури, що дозволяє підвищити її ефективність, надійність та безпеку: водопостачання та водовідведення [75], електропостачання [76] транспортної мережі [77], управління відходами [78, 79].

Моделювання сценаріїв розвитку аварійних ситуацій та оцінка їх впливу на міську інфраструктуру.

Одним із напрямів забезпечення безпеки та стійкості міст є моделювання сценаріїв розвитку аварійних ситуацій та оцінка їх впливу на міську інфраструктуру [80, 81].

Пріоритет надано моделюванню сценаріїв, пов'язаних з аваріями, та вивченню впливу таких ситуацій на різні компоненти міської інфраструктури, включаючи енергетичні системи [82] та водопостачання [83].

В роботі [84] представлено агентно-орієнтоване моделювання сценаріїв евакуації в міських районах під час аварійних ситуацій. Автори аналізують

поведінку населення та ефективність евакуаційних планів, враховуючи різні фактори, що впливають на процес евакуації.

Розглянуто методику моделювання сценаріїв аварійних ситуацій з використанням реляційної моделі таблиць рішень. Запропоновано підхід, який дозволяє автоматизувати процес формування таблиць рішень для аналізу технічних систем у контексті ризик-орієнтованого підходу [85].

В роботі [86] пропонується підхід до оцінювання загроз шляхом застосування методу системної динаміки.

Інформаційні технології для моделювання трафіку дорожнього руху дозволяють аналізувати альтернативні сценарії організації руху, оцінювати кількість аварійних ситуацій та розподіл часу зупинок [87, 88].

Досліджується використання ГІС для моделювання аварійних ситуацій у міському середовищі, що дозволяє оцінювати їх вплив на інфраструктуру та приймати обґрунтовані управлінські рішення [89].

Дослідження підкреслює необхідність інтеграції людино-центричного підходу в моделюванні для планування відновлення критичної інфраструктури після катастроф [90].

Висунуті пропозиції щодо поєднання симуляційного моделювання з дизайном, орієнтованим на користувача, щоб зробити процес планування більш зрозумілим для експертів з управління інфраструктурою та надзвичайними ситуаціями [91].

Запропоновано нову трирівневу оптимізаційну модель, яка дозволяє оцінювати стійкість взаємозалежних інфраструктурних систем до комбінованих небезпечних подій та пропонує практичні рекомендації щодо політики захисту протигіпотетичних комбінованих небезпек [92].

Автори [93, 94] зосереджуються на створенні автоматизованих систем раннього виявлення, які дозволяють миттєво локалізувати аварії в енергетичних та водопостачальних системах.

Таким чином, наукові дослідження спрямовані на підвищення безпеки та стійкості міської інфраструктури через впровадження інформаційно-

комунікаційних технологій, а саме розробляються системи підтримки прийняття рішень для аналізу аварійних ситуацій, сенсорні мережі та автоматизовані системи контролю для раннього виявлення загроз. Технології розумного міста, зокрема ГІС, IoT та SCADA, сприяють ефективному управлінню інфраструктурою та запобіганню надзвичайним ситуаціям.

1.4 Інженерно-технічні методи забезпечення безпеки систем життєзабезпечення

Дослідження демонструють важливість резервних об'єктів для забезпечення критичних інфраструктур міста [95, 96], а також використання гібридних енергетичних систем, що комбінують традиційні та відновлювальні джерела енергії [97, 98].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії сприяє не лише надійності енергопостачання, але й екологічній безпеці та економічній ефективності [99, 100].

Увага приділяється впровадженню адаптивних систем зв'язку для оперативного реагування на НС [101].

Розвиток інженерних конструкцій значною мірою залежить від упровадження міцних і довговічних матеріалів, стійких до руйнування.

У дослідженні [102] розглянуто формування наноструктурованої бейнітної матриці у високохромистих чавунах. Показано, що такі матеріали мають підвищені трибологічні властивості, зокрема зносостійкість, що робить їх перспективними для застосування в умовах інтенсивного зношування.

Досліджені фізичні механізми, що визначають міцність закристалізованих евтектичних сплавів на основі боридів та карбідів. Встановлено, що такі матеріали зберігають високу міцність при температурах

до 2000 °С, що робить їх придатними для використання в екстремальних умовах [103].

Дослідження показали, що додавання графену до полімерних матриць значно підвищує механічні властивості композитів, зокрема їхню міцність та стійкість до пошкоджень [104, 105]. Це відкриває можливості для створення легких і міцних матеріалів для аерокосмічної та автомобільної промисловості.

Розробка сталей з ультрадрібнозернистою структурою дозволяє досягти високих показників міцності та пластичності одночасно [106]. Такі матеріали є перспективними для використання в будівництві та машинобудуванні.

Дослідження механічних властивостей наноструктурованих металів, які демонструють вищу міцність і кращу зносостійкість порівняно з традиційними металевими сплавами [107].

Введення дисперсних наночастинок у керамічну матрицю сприяє підвищенню її тріщиностійкості та загальної міцності, що робить такі матеріали придатними для застосування в умовах високих температур та агресивних середовищ [108].

Огляд матеріалів, які мають здатність до відновлення форми після деформації, що підвищує їхню довговічність та надійність [109].

Сплави на основі нікелю та титану, здатні відновлювати свою форму після деформації [110].

Введення вуглецевих нанотрубок у металеві та полімерні матриці дозволяє значно підвищити їхню міцність та електропровідність, що є перспективним для електроніки та енергетики [111, 112].

Досліджено можливостей використання полімерних композитів, армованих вуглецевим та арамідним волокном, для зниження ваги та підвищення міцності конструкцій [113].

Впровадження біологічно активних мікроорганізмів у бетон, які здатні заповнювати тріщини кальцитовими відкладеннями [114].

Представлено можливості використання 3D-друку для виготовлення надміцних структур [115, 116].

Розробка матеріалів із відштовхувальними властивостями для захисту від корозії та забруднення [117].

Створення полімерних аерогелів із високою вогнестійкістю та міцністю для використання у високотемпературних умовах [118].

Таким чином, інженерно-технічні методи забезпечення безпеки систем життєзабезпечення міста включають використання резервних об'єктів, гібридних енергетичних систем та адаптивних засобів зв'язку для оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Інтеграція відновлюваних джерел енергії сприяє підвищенню надійності енергопостачання.

1.5 Особливості попередження аварій у системах життєзабезпечення в умовах воєнного стану

Попередження аварій у СЖМ в умовах воєнного стану пов'язане із складністю оперативного реагування [119, 120] та необхідністю забезпечення безперервності постачання ресурсів [121, 122]. На основі результатів обчислення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій та ймовірності втрат від них для різних типів інфраструктури України в умовах військових дій, зокрема ракетних і артилерійських обстрілів [123], високий ризик прямих втрат характерний для об'єктів критичної інфраструктури.

Ключовим напрямом є проведення аналізу вразливостей та ризиків критичної інфраструктури [124, 125].

Особливістю оцінки ризиків для критичної інфраструктури є врахування численних взаємозв'язків та залежностей [126]. Поширеним методом оцінки загроз і ризиків для даних об'єктів у разі військових дій в зоні ведення бойових дій виявляється метод експертних оцінок [127]. Для врахування сумарного ефекту від одночасної дії різних загроз під час

вогневого впливу противника додатково використовується статистичний аналіз та теорія ймовірності [128].

Обчислення надійності системи критичної інфраструктури проводиться методами статистичного аналізу, декомпозиції, методами резервування та прогнозування [129].

На прикладі теплових електростанцій та теплових електроцентралей України, застосований метод «аналізу ієрархій» Т. Салаті [130].

Автори [131] розробляють метод оцінювання ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, враховуючи їхній деструктивно-кумулятивний потенціал під час бойових дій, використовуючи теорію графів, теорію ймовірності та імітаційне моделювання.

Удосконалена методика оцінювання загроз і ризиків за сценаріями розвитку НС для запобігання втрат населення та особового складу сил оборони пропонує чотири функціональні блоки (визначення об'єктів КІ, оцінювання загроз і ризиків для об'єктів КІ в зоні ведення бойових дій, формування каталогу загроз і ризиків, формування сценаріїв розвитку подій, побудова моделей розвитку катастроф) та блок прийняття рішень [132].

На прикладі аналізу сучасних енергетичних викликів та загроз встановлений взаємозв'язку між стійкістю та енергетичною безпекою [133].

Механізми забезпечення стійкості включають створення резервних потужностей, диверсифікацію або резервні системи для зменшення ризику збоїв та тривалих періодів перебоїв у роботі систем критичної інфраструктури [134].

Одним із напрямів попередження НС в СЖМ є впровадження мобільних та автономних систем водо- [135, 136], електро- [137, 138] та теплопостачання в умовах воєнного стану [139].

Технології моніторингу, такі як супутникові знімки, дрони, можуть значно прискорити оцінку пошкоджень внаслідок бойових дій і сприяти швидкому плануванню відновлювальних робіт [140, 141].

Використання спеціалізованих мобільних бригад для ремонту та відновлення пошкоджених елементів інфраструктури, таких як комунікації, електричні мережі та водопостачання, є важливою частиною планів швидкого відновлення [142, 143].

Міжнародна допомога та співпраця сприяє швидкому відновленню пошкодженої МСЖ інфраструктури [144, 145].

До основних стратегій захисту належить розміщення важливих елементів інженерних комунікацій у спеціально укріплених спорудах, здатних витримувати механічні навантаження, вибухи чи інші руйнівні фактори. Перенесення інженерних мереж під землю значно підвищує їхню безпеку [146].

Деякі країни використовують тунельні системи для транспортування води, газу та енергії [147].

У разі порушення доступу до питної води та продуктів харчування, міжнародні гуманітарні організації, такі як WFP (World Food Programme) та Oxfam, розробляють програми постачання ресурсів через наземні чи повітряні шляхи.

Міжнародні організації використовують цифрові платформи для реального часу моніторингу ресурсів, логістичних процесів та координації. Інформаційні платформи, які працюють на основі технологій ГІС та Big Data, дозволяють відслідковувати постачання та доставку необхідних ресурсів [148, 149].

Таким чином, попередження аварій у системах життєзабезпечення в умовах воєнного стану ускладнене через складність оперативного реагування та необхідність безперервного постачання ресурсів. Високий ризик втрат характерний для об'єктів критичної інфраструктури, що потребує аналізу вразливостей, оцінки ризиків та використання експертних і статистичних методів. Методи забезпечення стійкості включають резервні потужності, диверсифікацію джерел та автономні системи постачання води, електро- і теплопостачання. Моніторинг за допомогою супутникових знімків і дронів

прискорює оцінку пошкоджень, а мобільні ремонтні бригади сприяють швидкому відновленню. Стратегії захисту критичної інфраструктури включають розміщення інженерних комунікацій у підземних або укріплених спорудах. Міжнародна допомога та цифрові платформи покращують логістику й координацію постачання ресурсів, що сприяє оперативному відновленню інфраструктури.

Висновки по першому розділу

1. Кожна з систем життєзабезпечення є важливою для нормального функціонування міста і їх уразливість до аварій може вплинути на комфорт і безпеку людей, мати довготривалі наслідки для розвитку міста, спричиняти фінансові труднощі та погіршення екологічної ситуації. Тому важливо забезпечувати стійкість та безпеку цих систем, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, воєнного стану та післявоєнної відбудови.

2. Системи життєзабезпечення міст мають низку уразливих місць, зокрема застарілу інфраструктуру та взаємозалежність між ними, перевантажень, характерну відсутність резервних потужностей або альтернативних джерел постачання ресурсів, ефективного моніторингу та оповіщення, кіберзагрози та уразливості в управлінні, що ускладнює реагування на надзвичайні ситуації. В умовах воєнного стану ці системи стають мішенями для атак, що може призвести до серйозних збоїв у їх функціонуванні. Оцінка уразливості систем життєзабезпечення допомагає своєчасно виявити потенційні загрози та вжити необхідних заходів для забезпечення комфорту і безпеки людей в будь-яких умовах.

3. Наукові дослідження спрямовані на підвищення безпеки та стійкості міської інфраструктури через впровадження інформаційно-комунікаційних технологій, а саме розробляються системи підтримки прийняття рішень для аналізу аварійних ситуацій, сенсорні мережі та автоматизовані системи

контролю для раннього виявлення загроз. Технології розумного міста, зокрема ГІС, IoT та SCADA, сприяють ефективному управлінню інфраструктурою та запобіганню надзвичайним ситуаціям.

4. Інженерно-технічні методи забезпечення безпеки систем життєзабезпечення міста включають використання резервних об'єктів, гібридних енергетичних систем та адаптивних засобів зв'язку для оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Інтеграція відновлюваних джерел енергії сприяє підвищенню надійності.

5. Попередження аварій у системах життєзабезпечення в умовах воєнного стану ускладнене через складність оперативного реагування та необхідність безперервного постачання ресурсів. Високий ризик втрат характерний для об'єктів критичної інфраструктури, що потребує аналізу вразливостей, оцінки ризиків та використання експертних і статистичних методів. Методи забезпечення стійкості включають резервні потужності, диверсифікацію джерел та автономні системи постачання води, електро- і тепlopостачання. Моніторинг за допомогою супутникових знімків і дронів прискорює оцінку пошкоджень, а мобільні ремонтні бригади сприяють швидкому відновленню. Стратегії захисту критичної інфраструктури включають розміщення інженерних комунікацій у підземних або укріплених спорудах. Міжнародна допомога та цифрові платформи покращують логістику й координацію постачання ресурсів, що сприяє оперативному відновленню інфраструктури.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ

Вирішувати друге завдання наукового дослідження щодо розробки інформаційної моделі підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст будемо наступним чином. Спочатку розглянемо механізми виникнення надзвичайних ситуацій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Далі розглянемо сучасний стан з попередження надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст. Після чого розробимо інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

2.1 Механізми виникнення надзвичайних ситуацій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст

Аварії на мережах електроенергетичної системи та системи життєзабезпечення населення міст України, які викликають техногенні НС у електричних, газових, каналізаційних, водопровідних і теплових мережах рідко супроводжуються загибеллю людей, однак вони створюють суттєві

труднощі життєдіяльності, особливо в холодну пору року, та приносять не тільки прямі збитки, але й збитки, пов'язані з організацією життєзабезпечення населення, санітарно-епідеміологічними заходами, забрудненням навколишнього середовища тощо.

Переважає більшість цих НС виникає у зв'язку з незадовільним технічним станом споруд, конструкцій, обладнання і інженерних мереж та їх значною зношеністю внаслідок закінчення нормативного строку експлуатації, невиконання нормативних обсягів планово-попереджувальних ремонтів, порушення регламенту експлуатації та недостатньої надійності функціонування в умовах екстремальних природних явищ.

Аварії на електроенергетичних системах призводять до надзвичайних ситуацій, зазвичай, через вторинні наслідки та за умови накладання на них буд-яких надзвичайних ситуацій. Особливо тяжкі наслідки мають аварії на електроенергетичних мережах у зимовий сезон, також у віддалених та важкодоступних районах. Особливо характерні такі надзвичайні ситуації для сільських регіонів або в дуже холодні зими через перевантаження електромереж у зв'язку з різким збільшенням витрат енергії на обігрів.

На сьогодні в електроенергетичній галузі країни експлуатується близько 1 млн км повітряних та кабельних ліній електропередач всіх класів напруги, а також 203 тис. трансформаторних підстанцій з напругою 6750 кВ загальною потужністю 201 тис. МВА.

В той же час, у магістральних електромережах потребують відновлення 63% повітряних ліній від їх загальної довжини напругою 220 кВ і 19% напругою 330 кВ.

Стан українських електричних мереж із року в рік погіршується, що призводить до аварійних ситуацій на рівні окремих областей.

Аварії в системах водопостачання порушують забезпечення населення водою або роблять воду непридатною для пиття, що завжди викликає значну соціальну напругу.

Технічний стан об'єктів системи водопостачання визначається високим ступенем зношеності.

Аварії на каналізаційних системах сприяють масовому викиду забруднюючих речовин та погіршенню санітарно-епідеміологічної обстановки, порушенню умов життєдіяльності населення.

Кожна п'ята насосна станція відпрацювала нормативний термін амортизації – потребує заміни більше 30% насосних агрегатів на водопровідних насосних станціях та 35% на каналізаційних насосних станціях в Україні. Потужність водопровідних та каналізаційних очисних споруд яка потребує реконструкції сягає 25 %.

Технічний стан об'єктів системи водовідведення також визначається високим ступенем зношеності: в аварійному стані знаходяться 18 893,2 км, або 36,8 % загальної протяжності каналізаційних мереж (51 396,8 км).

Аварії на теплових мережах в зимовий час року призводять до неможливості проживання населення в неопалюваних приміщеннях, розгерметизації системи опалення. Український незадовільний стан мереж теплопостачання останнім часом спричинив ряд серйозних аварій у таких містах як Одеса, Полтава, Харків. Технологічний рівень та зношення обладнання систем теплопостачання дійшли до критичної межі, коли подальша його експлуатація несе значні ризики.

Незадовільний стан теплових мереж в Україні зумовлює значні втрати тепла (в середньому понад 14%, а в окремих випадках – до 25%). Теплові мережі у своїй більшості мають значний ступінь зношення – 15,8%.

Основними складовими газорозподільної мережі в Україні є мережа магістральних газопроводів та газопроводів-відгалужень, газорозподільні станції та компресорні станції. Довжина газотранспортних мереж, які експлуатує Оператор ГТС (ОГТСУ), складає близько 35 тис. км. Протяжність газорозподільних систем, які перебувають на балансі (в обслуговуванні) операторів ГРМ, станом на кінець 2019 року складала 289,98 тис. км, з них

високого тиску – 48,55 тис. км, середнього тиску – 117,15 тис. км, низького тиску – 124,28 тис. км.

За результатами проведення обстеження в Україні вже вичерпано термін експлуатації понад 12 тис. км газорозподільних мереж, близько 500 км газопроводів потребують капітального ремонту, а понад 100 км – заміни.

Проведений аналіз дозволив узагальнити та класифікувати причини аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення (рис. 2.1).

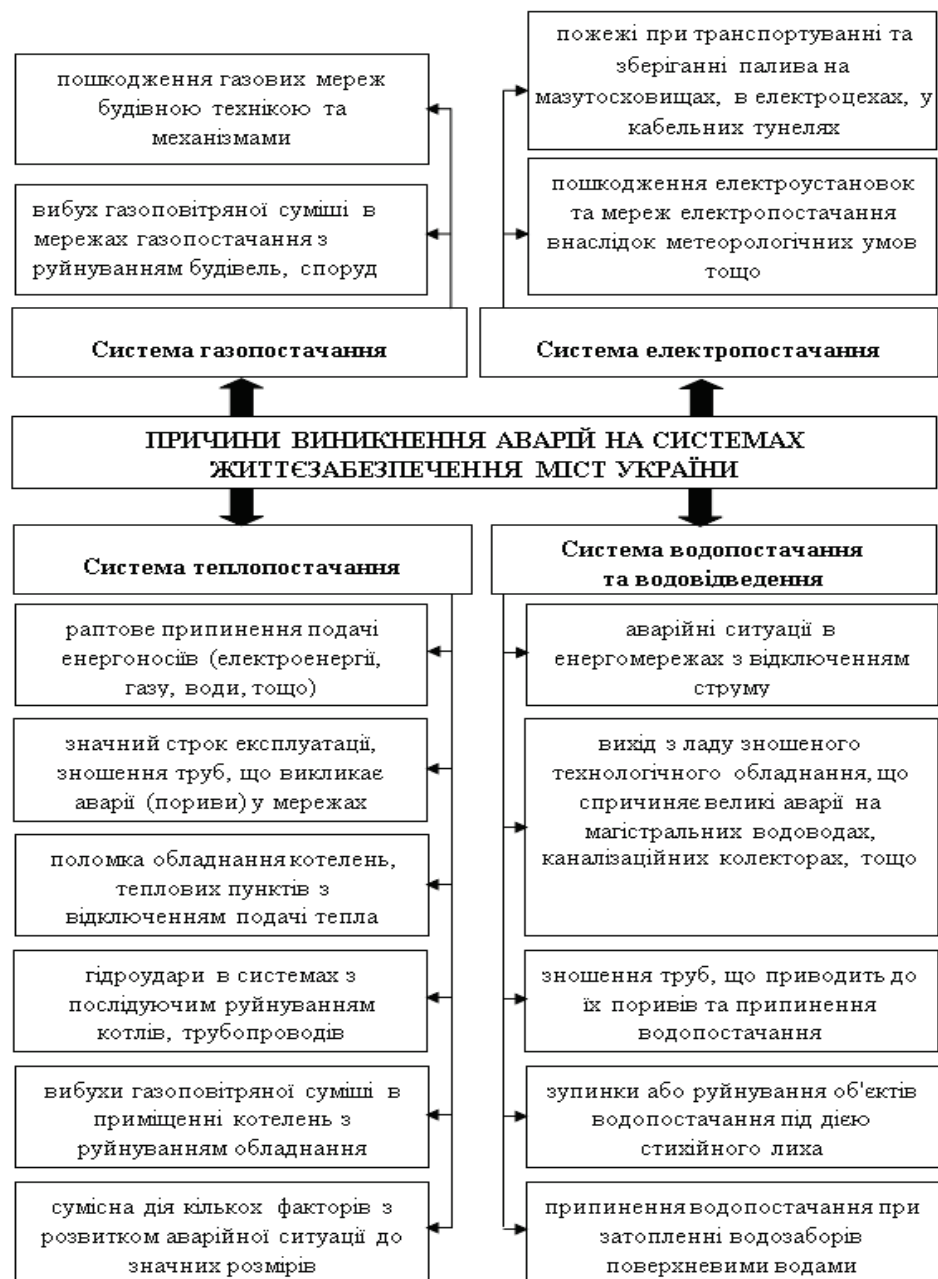


Рисунок 2.1 – Класифікація причин аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення

Таким чином, проведені дослідження структури і динаміки розвитку нормативної бази в сфері захисту від надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст та критичний огляд вітчизняних та закордонних літературних джерел і нормативних документів за темою дисертаційного дослідження дозволили виконати системологічний аналіз основних понять теорії та практики цивільного захисту, що складають термінологічну основу дослідження.

2.2 Сучасний стан діагностування технічного стану та попередження надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст

Проведений аналіз наявного арсеналу засобів діагностування технічного стану та попередження надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст дозволив визначити в якості основних напрямів попередження надзвичайних ситуацій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, серед яких можна виділити нормативно-правові та організаційні заходи, апаратно-технічні засоби та формальні моделі здійснення прогнозу можливих аварій, що наведено на рис. 2.2.

Аналіз апаратно-технічних засобів діагностування стану та попередження аварій на інженерних мережах водопостачання та водовідведення показав, що у сучасній практиці в якості базової концепції оцінки технічного стану трубопроводів та залишкового ресурсу інженерної інфраструктури системи водопостачання прийнятий підхід, заснований на принципі «безпечної експлуатації за технічним станом». Оцінка стану інженерних структур і обладнання відповідно до зазначеного принципу здійснюється за параметрами технічного стану, що забезпечує його надійну і безпечну експлуатацію. В свою чергу, залишковий ресурс оцінюється за

визначальними параметрам технічного стану. До них відносяться параметри, зміна яких (окремого або сукупності) може привести інженерну інфраструктуру до неробочого стану.

Попередження надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення

- Моніторинг НС внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, що відбулись
- Комплекс організаційних та інженерно-технічних заходів відповідно до чинного законодавства:
 - Кодекс цивільного захисту, Постанови КМУ
 - Регіональні програми щодо запобігання виникненню НС
 - Плани дій щодо запобігання виникненню та ліквідації НС на відповідних об'єктах
 - Плани реагування і взаємодії органів управління та сил цивільного захисту в разі виникнення НС
- Технічні засоби діагностування вірогідних локальних пошкоджень, що можуть спричинити аварії рівня НС
- Формальні моделі, методи та апаратно-програмне забезпечення прогнозування характеристик можливої НС

Генерація управлінського рішення

Рисунок 2.2 – Основні напрями попередження надзвичайних ситуацій на системах життєзабезпечення міста

Основними причинами пошкодження водопровідних мереж є корозія, порушення проектного стану трубопроводу, розгерметизація, ушкодження стикових з'єднань тощо. У загальному випадку програма виконання ремонтних робіт включає в себе комплекс заходів, що носить універсальний характер та регламентований нормативною документацією. Важливими факторами, які впливають на зміст ремонтних робіт, є не тільки реальний технічний стан об'єкта, а й придатність для контролю, а також технічна можливість проведення діагностування. Ці чинники повинні бути враховані при плануванні робіт з діагностики та вибору ділянки водопровідної мережі для реконструкції.

Практика діагностування показує, що в процесі експлуатації більш вірогідні місцеві і локальні пошкодження, а не загальний знос трубопроводу. Причинами таких пошкоджень є інтенсивні пластичні деформації, що розвиваються в зонах перенапруги через технологічні дефекти, дефекти монтажу, корозійні пошкодження, переміщення ґрунту, температурні та інші впливи. Джерелами течі трубопровідних систем можуть виступати кілька зон: корпус, фланцеві з'єднання і ущільнення запірно-регулюючої арматури, технологічні з'єднання, різного роду локальні дефекти експлуатаційного характеру (наскрізні тріщини і корозійні пошкодження).

Своєчасне виявлення течі дозволяє запобігти можливому руйнуванню інженерної мережі. Для цього визначають як якісні (місце розташування, характер виникнення), так і кількісні характеристики течі. Визначення місць пошкоджень на водопровідній мережі проводиться шляхом фіксування місця виникнення акустичних сигналів, які виникають при пошкодженні напірних трубопроводів (свищ, розстикування, тріщина тощо). При цьому застосовуються акустичні і електронно-акустичні методи визначення місць пошкоджень напірних трубопроводів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 Способи визначення місць пошкоджень напірних трубопроводів водопостачання

Спосіб	Опис
Акустичне прослуховування з поверхні землі	Прослуховування траси проводиться через кожні 1–3 метри за допомогою геомікрофонів. Результати вимірювань заносяться в пам'ять приладу, за якими і визначається місце пошкодження
Кореляційний спосіб	Акустичні сигнали, які виникають в місцях пошкодження трубопроводу, перетворюються в електричні сигнали і передаються в підсилювач приладу-корелятора. На кореляційний блок подаються радіосигнали від двох підсилювачів, розташованих на початку та наприкінці досліджуваного ділянки. Корелятор обробляє дані, що надходять, і обчислює відстань від місця витoku до найближчого випромінювача
Електронно-акустичний спосіб з датчиком звуку	Комплект приладів складається з датчиків (реєстраторів) і приймача. Датчики фіксують місце появи та інтенсивність шуму на водопровідній мережі. Чутливість датчиків дозволяє визначити 250-метровий діапазон, в якому є пошкодження. Точне місце витoku визначають за допомогою акустичного корелятора

Коректна оцінка поточного стану трубопроводів водопостачання дозволяє зробити вибір щодо першочергових ділянок водопровідної мережі, які вимагають відновлення і реконструкції. Мета даних заходів – скоротити кількість пошкоджень труб, знизити втрати води, зменшити навантаження на аварійні служби, поліпшити технічний стан та відновити гідравлічну пропускну здатність трубопроводу.

Важливим показником при виборі ділянки реконструкції є наявність прихованих витоків. Іноземний та вітчизняний досвід свідчить, що для

більшості підприємств водопровідно-каналізаційного господарства неприйнятним вважається рівень втрат понад 15% від сумарної подачі води.

У якості критеріїв прийняття рішення можна використовувати коефіцієнт ушкоджень труб (R_q) і чисті втрати води (V_e) (табл. 2.2.).

Таблиця 2.2 Орієнтовні значення критерію R_q

Номиналь ний діаметр (DN)	Щорічний відсоток реконструкції (відсоток від довжини трубопроводів)					
	Орієнтовне значення 1. Коефіцієнт пошкоджень труб			Орієнтовне значення 2. Втрати води		
	<0,5	0,5–1	> 1	<0,05	0,05 – 0,1	>0,1
<80	1	2	3	1	2	3
80-500	0,5	1	2	0,5	1	2
>500	0,25	0,5	1	0,25	0,5	1

Наступним способом є телеінспекція. Телеінспекція є одним з найефективніших методів обстеження інженерних мереж. Телеінспекція дає змогу виявити невеликі тріщини, засмічення, сторонні предмети, визначити точне місце розташування і характер дефекту, оцінити стан трубопроводу навколо дефекту. Це дозволяє обґрунтувати рішення про характер ремонту – локальний ремонт або повна заміна ділянки трубопроводу.

Телеінспекційними системами можна досліджувати трубопроводи діаметром від 25 до 2000 мм та довжиною до 1000 м. Системи, до складу яких входять відеокамери, роботи і телеінспекційний автомобіль, дозволяють здійснювати збір та обробку даних про місце дослідження, передачу зображення з камери на відеомонітор, відображати, зберігати і каталогізувати цифрові фотографії, робити вимірювання профілів ухилу і температури, вимірювання пошкодженої ділянки і формування протоколів обстеження.

Відеокамера знаходиться в герметичному корпусі, має якісне фокусування та обладнана пристроєм наведення. Роботи мають бортовий поворот, мають захист від перекидання, додаткове освітлення і підйомний пристрій. Така конфігурація дозволяє проводити обстеження труб різних діаметрів. На рис. 2.3 та 2.4 представлений процес та результат телеінспекції.



Рисунок 2.3 – Процес телеінспекції трубопроводу

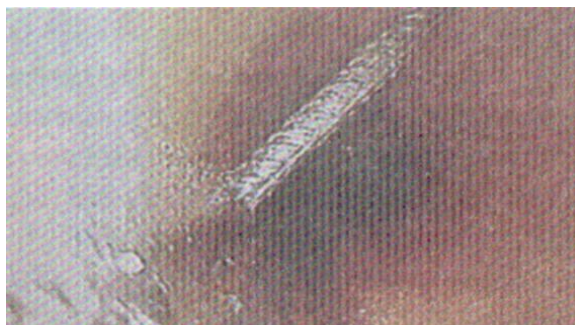


Рисунок 2.4 – Пошкодження, виявлене в результаті телеінспекції

Теледіагностика проводиться повторно після проведення реновації мереж безтраншейним методом. В цьому випадку вона має на меті отримати всебічну оцінку якості виконаних робіт, оперативно усунути дефекти, якщо такі будуть виявлені, та вчасно здійснити здачу-приймання ділянки трубопроводу в експлуатацію. На рис. 2.5 та 2.6 представлений трубопровід

DN 600 до та після проведення ремонтних робіт. Теледіагностика підтвердила, що реновація була виконана якісно.



Рисунок 2.5 – Стан водопровідної мережі до реновації

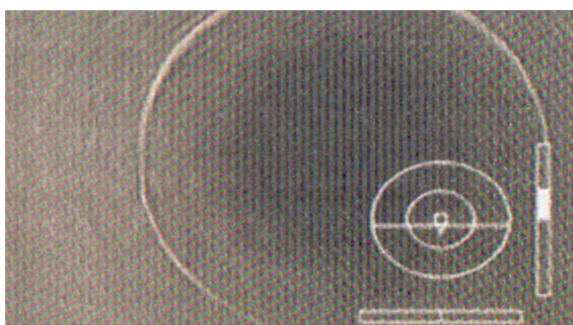


Рисунок 2.6 – Стан водопровідної мережі після реновації

Сучасні системи теледіагностики через високу ціну доступні лише комунальним службам найбільших міст. Неможливість в більшості регіонів України проведення регулярного обстеження мереж водопостачання не дозволяє надати дослідженням систематичного характеру. Ця обставина негативно впливає на якість стратегії відновлення національної мережі трубопроводів водопостачання та водовідведення.

Системологічний аналіз вітчизняної та закордонної наукової літератури щодо існуючих методів та інструментальних засобів прогнозування ТНС дозволив виділити в якості основних такі наукові напрями.

В дослідженні [150], зважаючи на нестаціонарність процесів, що

розглядаються, та необхідність урахування урбаністичних ризиків, можливості аналізу та прогнозування комплексних ризиків природно-техногенних та соціально-економічних загроз в галузі житлово-комунального господарства України розширено за рахунок застосування дерев подій та методів теорії катастроф.

Також дослідження [150] присвячено оцінці стану потенційно небезпечних об'єктів в умовах невизначеності за допомогою елементів теорії ідентифікації та теорії статистичних рішень.

У дослідженні [151] розглядається побудова територіальної системи техногенної безпеки із застосуванням теорії та методів проактивного управління, що розвиваються авторами.

Окрім того, дослідження [151] містить аналіз наявних методів економічної оцінки збитків від надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що застосовуються у світі й Україні. Досліджено теоретичні засади оцінки збитків, завданих техногенними катастрофами.

Дослідження [152] присвячено упорядкуванню термінологічної бази предметної галузі і узагальненню відомих на цей час методів прогнозування НС техногенного та природного характеру. В огляді наголошується, що кількість наукових праць в предметній області застосування теорії дослідження операцій та системного аналізу опрацювання інформації щодо перебігу та наслідків надзвичайної ситуацій природного та техногенного характеру в період 1980 – 1990 років минулого сторіччя подвоїлась завдяки дослідженням, присвяченим реалізації надзвичайних ситуацій в великих містах. Можливими причинами є процеси глобалізації та зростаючий економічний та соціальний вплив НС на суспільство.

У дослідженні [153] докладно розглянуто та узагальнено міжнародний досвід в галузі упорядкування множини можливих загроз природного та техногенного характеру, що можуть призвести до реалізації надзвичайної

ситуації у містах, завдати значних матеріальних збитків та навіть втрат людських життів.

Дослідження [154] присвячено проблемі вразливості систем водопостачання та водовідведення від надзвичайних ситуацій. Показано, що існуючі плани реагування на НС в секторі водопостачання та водовідведення, не враховують специфіки вразливості конкретних інженерних мереж, що призводило до затримки відновлення цих послуг на кілька тижнів в деяких постраждалих містах. Розглянуто приклад Латинської Америки та країн Карибського басейну. Методологія реагування на НС природного та техногенного характеру, що розглядається в роботі, спрямована на пришвидшення реакції відповідальних осіб на надзвичайні ситуації та розвиток планів готовності до надзвичайних ситуацій та надзвичайних ситуацій, що враховують існуючі небезпеки та вразливості.

В дослідженні [155] обговорюються основні напрямки розвитку системи забезпечення безпеки життєдіяльності сучасного міста. Відзначається, що ряд факторів обумовлює високий рівень небезпек, пов'язаних з експлуатацією інженерної інфраструктури житлово-комунального господарства міста. В якості основного напрямку компенсації техногенних загроз розглядається застосування моніторингу параметрів стану технічних об'єктів, прогнозування на цій основі аварійних ситуацій і прийняття своєчасних заходів по їх запобіганню.

Методи розв'язання проблеми формалізації просторово розподілених даних розвиваються у межах такої сучасної наукової дисципліни як геостатистика.

Також у дослідженні [155] при прогнозуванні НС техногенного характеру застосовано стохастичну теорію черг. Дослідження [156] присвячено вивченню потоку відмов обладнання потенційно небезпечних виробничих та інфраструктурних об'єктів на основі теорії надійності.

Також у дослідженні [156] міститься аналіз рядів статистики аварійних

ситуацій на об'єктах міського господарства як нестационарних часових рядів.

В дослідженні [157] розглянуто проблему формування й функціонування механізмів державного регулювання природно-техногенної безпеки великих міст. Запропоновано методичні підходи до аналізу та прогнозування природно-техногенної безпеки великих міст України із застосуванням нейромереж і карт Кохонена. Зокрема, за цією методикою м. Харків віднесено до кластеру із вищим за середній рівнем частоти прояву НС.

Дещо інший підхід пропонується в дослідженні [158]. Ця стаття зосереджена на факторах, що формують та становлять управління в міських / столичних управліннях надзвичайних ситуацій. Основна увага в статті приділяється багатогранним міжорганізаційним відносинам, що виробляють спільні цілі, які практикуються на місцевому рівні, а особливо в контексті управління міськими надзвичайними ситуаціями на регіональному рівні.

Різноманіття підходів до розв'язання поставленої задачі свідчить, з одного боку про складність проблеми, що розглядається, а з іншого – про відсутність адекватних засобів аналізу та синтезу прийнятних управлінських рішень.

Аналіз наукової літератури показує, що одним із підходів, що часто застосовується для оцінки параметрів можливої надзвичайної ситуації, є методи і моделі теорії надійності, в рамках якої прогнозування аварій базовані на елементарній статистиці та дискретному розподілі Пуассона [159].

Загалом задача класифікації надзвичайних ситуацій, арсеналу наявних прогнозних та оптимізаційних моделей, а також методів управління фазою попередження ТНС, активно розглядається науковою спільнотою [160–163]. Дослідження [161] присвячено класифікації надзвичайних ситуацій в мегаполісі, що ґрунтується на визначенні параметрів надзвичайної ситуації, оцінці впливу на громаду та можливості здійснення дорожнього руху. Застосовується апарат нечітких множин.

Узагальнено класифікацію існуючих методів та інструментальних засобів прогнозування ТНС наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 Класифікація існуючих методів та інструментальних засобів прогнозування техногенних надзвичайних ситуацій

Проблема	Інструментальні засоби
Побудова оптимальних планів інспектування	Багатокритеріальна оптимізація, теорія ймовірностей
Аналіз просторово розподілених даних	Геостатистика
Урбаністичні ризики: можливості аналізу та прогнозування	Дерева подій, методи теорії катастроф
Оцінка стану потенційно небезпечних об'єктів в умовах невизначеності	Теорія ідентифікації, теорія статистичних рішень
Побудова територіальної системи техногенної безпеки	Теорія та методи проактивного управління
Прогнозування надзвичайних ситуацій	Теорія черг
Відмови обладнання потенційно небезпечних виробничих та інфраструктурних об'єктів	Теорія надійності, статистика
Ресурсне забезпечення стадій управління ТНС	Стохастичне програмування
Аналіз аварійних ситуацій на об'єктах міського господарства, оцінка прямих і непрямих збитків ТНС	Методика експертного оцінювання

Однак вищезазначені підходи не враховують багатовимірність та нестационарність реальних статистичних рядів, зокрема, нестационарний розподіл Пуассона розглядається лише в окремих публікаціях, таким чином, не враховується показник зношеності основних фондів інженерних мереж,

внаслідок чого аварії, викликані систематичними відмовами обладнання, практично виключені із розгляду.

Таким чином, досліджено сучасний стан проблеми прогнозування параметрів надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення великого міста як невід'ємної частини етапу попередження таких НС. Визначено, що наявні підходи до прогнозування не враховують багатовимірність реальних статистичних рядів, що містять дані про аварії, більш того, практично виключений із розгляду показник зношеності основних фондів, що є джерелом нестаціонарності цих статистичних рядів.

2.3 Інформаційна модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст

Розглянемо етапи побудови інформаційної моделі підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

Вихідними даними процесу прогнозування виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру є такі.

1. Горизонт прогнозування:
 - короткостроковий (оперативне прогнозування);
 - довгостроковий (стратегічне прогнозування).
2. Задача ідентифікації багатовимірної функції розподілу вирішується на основі застосування статистичної інформації двох типів.

Статистична інформація типу 1 – інформація, що стосується складових організаційно-технічної системи території, а саме кількість, характер, координати розташування ТНС на мережах життєзабезпечення, тип

інженерної інфраструктури, типи небезпечних факторів, стан інфраструктурних об'єктів, статистичні дані по моментах настання відмов, час розвитку ТНС, час ліквідації ТНС.

Важкість ТНС оцінюється за часом розвитку та часом ліквідації ТНС.

Статистична інформація типу 2 – інформація про відомі ТНС на подібних об'єктах критичної інфраструктури в інших регіонах (за браком інформації першого типу).

Формування вихідної статистичної інформації є одним із найбільш трудомістких етапів побудови прогнозу.

Теоретичними гіпотезами для побудови імітаційної моделі виробничої системи та інженерної інфраструктури мегаполісу як джерел ТНС є такі:

- моменти надходження відмов обладнання як причини ТНС (настання подій) – дискретна випадкова величина;
- мають місце поступові та випадкові відмови обладнання;
- теоретична інтенсивність λ потоку відмов є функцією часу, тобто потік не є стаціонарним;
- базовий теоретичний розподіл моментів настання відмови – нестаціонарний розподіл Пуассона (розподіл рідких подій) у часі;
- врахування кількох джерел настання подій, що в цілому порушує вимогу ординарності процесу;
- випадковий потік подій є розподіленим як у часі, так і у просторі.

Розглянемо основні етапи структурної та параметричної ідентифікації імітаційної моделі.

1. Визначення джерел можливої ТНС

У якості об'єктів просторово-часового моделювання події виникнення та рівня складності ТНС розглядаються такі типи інфраструктурних об'єктів: мережі водопостачання та водовідведення; мережі теплопостачання. Причиною ТНС виступають технічні відмови обладнання.

На виділених типах інфраструктурних об'єктів вихідні дані для моделювання НС однакові.

2. Аналіз вихідних даних для моделювання НС

Потік моментів виникнення аварій, унаслідок яких має місце ТНС, моделюється як послідовність заявок на обслуговування територіальною системою техногенної безпеки.

3. Обробка просторових даних

Для визначення координат можливої аварії проводиться розбиття контрольованої території сіткою вимірів на осередки. У геостатиці застосовують різні засоби побудови сітки вимірів: триангуляція, діаграми Вороного, а також стандартна прямокутна (регулярна) сітка, яка використовується у подальшому.

При цьому виникає ефект просторової роздільної здатності, тобто визначення адекватного розміру осередку ($\Delta x, \Delta y$).

На даній сітці здається N -вимірний випадковий функція $Z(v)$ функцією розподілу

$$F(v_1, v_2, \dots, v_N, z_1, z_2, \dots, z_N) = P\{Z(v_1) \leq z_1, Z(v_2) \leq z_2, \dots, Z(v_N) \leq z_N\}, \quad (2.1)$$

яка характеризує просторову ймовірність виникнення ТНС та визначається як набір випадкових змінних $Z(v_i)$ по одній для кожної локації $v_i, i=1,2,\dots, N$, території міста.

Суттєвим фактором моделювання є типи відмов обладнання, що розглядаються: випадкові, поступові, або їх комбінація.

У першому випадку функцію $Z(v)$ можна вважати такою, що володіє властивістю стаціонарності другого порядку, тобто математичне сподівання $m(v)$ функції $Z(v)$ існує і не залежить від локації v :

$$\forall v; m(v) = E\{Z(v)\} = \text{const.}$$

У другому і третьому випадках врахування наявності поступових відмов, що залежать від стану основних фондів обладнання, означає, що математичне сподівання $m(v)$ є функцією районів міста (географічних локацій) та є відбиттям того факту, що аварії частіше виникають в тих місцях, де основні фонди старіші.

4. Обробка часових рядів даних

Стан основних фондів інженерної інфраструктури міст України є таким, що необхідно передбачає при моделюванні врахування акту наявності поступових відмов обладнання. Відповідно, теоретична інтенсивність λ потоку відмов є функцією часу, тобто потік заявок на обслуговування не є стаціонарним.

Отже, в якості базового теоретичного розподілу моментів настання відмови приймається нестационарний розподіл Пуассона (розподіл рідких подій) у часі.

5. Завдання функції результатів можливої ТНС

У якості оціночної функції результатів для водопровідних мереж приймаються прямі збитки, тобто приведені витрати на заходи для ліквідації наслідків ТНС, включаючи забруднення оточення, так звані пофакторні та пореципієнтні збитки.

Даний етап містить моделювання місця, часу і рівня тяжкості ТНС.

Моделювання проводиться в рамках парадигми дискретно-подієвого моделювання протягом деякого періоду модельного часу як ітераційний процес, на кожній ітерації якого підраховуються сумарні витрати, тобто визначається інтегральна оціночна функція результатів.

Дискретно-подієве моделювання є однією із трьох основних парадигм імітаційного моделювання та використовується для побудови комп'ютерної моделі, що відбиває розвиток системи в часі, коли стани змінних при реалізації певної події змінюються миттєво в конкретні моменти часу.

Сумуючи наведене, шукана інформаційна модель підвищення

ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст представлена на рис. 2.7.

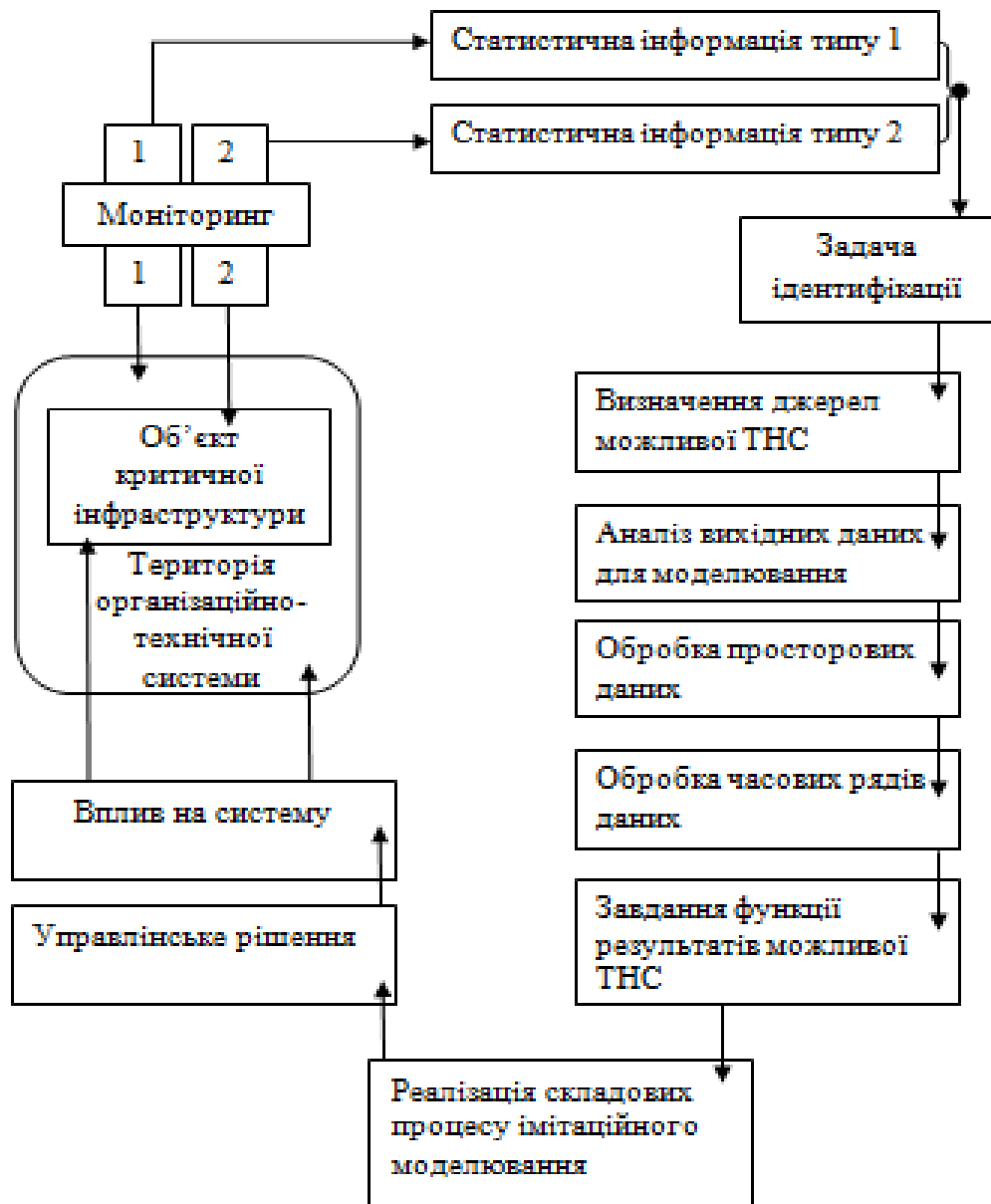


Рисунок 2.7 – Інформаційна модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст

Подальша алгоритмічна та програмна реалізація імітаційної моделі, що розглядається, створює інформаційне середовище зниження масштабів та

пом'якшення наслідків впливу небезпечних факторів ТНС, а також раціонального використання обмежених ресурсів територіальної системи техногенної безпеки в рамках короткострокового (оперативне прогнозування) як довгострокового (стратегічне прогнозування) горизонту прогнозування.

Таким чином, інформаційна модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст складається з дев'яти функціональних блоків, поєднаних прямими та зворотними зв'язками, що у сукупності забезпечує комплексне вирішення задачі (моніторинг, антикризове управління та управління обмеженими ресурсами) маючи за мету створення дієвої системи протидії надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на системах життєзабезпечення міст.

Висновки за другим розділом

1. Проведені дослідження структури і динаміки розвитку нормативної бази в сфері захисту від надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст та критичний огляд вітчизняних та закордонних літературних джерел і нормативних документів за темою дисертаційного дослідження дозволили виконати системологічний аналіз основних понять теорії та практики цивільного захисту, що складають термінологічну основу дослідження.

2. Досліджено сучасний стан проблеми прогнозування параметрів надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення великого міста як невід'ємної частини етапу попередження таких НС. Визначено, що наявні підходи до прогнозування не враховують багатовимірність реальних статистичних рядів, що містять дані

про аварії, більш того, практично виключений із розгляду показник зношеності основних фондів, що є джерелом нестаціонарності цих статистичних рядів.

3. Інформаційна модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст складається з дев'яти функціональних блоків поєднаних прямими та зворотними зв'язками, що у сукупності забезпечує комплексне вирішення задачі (моніторинг, антикризове управління та управління обмеженими ресурсами) маючи за мету створення дієвої системи протидії надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на системах життєзабезпечення міст.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТА

Вирішувати третє завдання наукового дослідження щодо розробки математичної моделі оцінки ефективності управління процесом попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста будемо наступним чином. Спочатку розглянемо системні особливості процесу попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Далі розглянемо особливості фази попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Надалі проведемо моделювання інженерних мереж систем життєзабезпечення міста як джерела надзвичайної ситуації техногенного характеру. Розглянемо характеристику процесу управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста як складової частини процесу управління ризиками. Після чого дамо опис математичної моделі оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста.

3.1 Системні особливості процесу попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення

Дано визначення основних концептів предметної області дисертаційного дослідження, що розглядається.

Мегаполіс – це місто, яке досягло населення порядку одного мільйона людей з високою щільністю населення за наявності так званої маятникової міграції жителів [164]. Характеризується також невизначеністю або відсутністю оперативної і повної інформації про міське господарство.

Таким чином, мегаполіс – це дуже велике як за площею, так і за чисельністю населення місто, яке може утворюватися за рахунок приєднання суміжних населених пунктів.

Як свідчать оцінки International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, мегаполіс – це форма майбутнього співіснування людства [165]. За даними [153] кількість міських жителів зросте до 2025 року майже до 5 мільярдів.

Системоутворюючі компоненти території мегаполіса: виробнича система, житлове господарство, системи життєзабезпечення, екосистема – знаходяться між собою в складних, постійно мінливих і, часом, невизначених відносинах.

Виробнича система мегаполіса – складна багаторівнева ієрархічна система, котра перетворює вихідні напівфабрикати, сировину та матеріали у кінцевий продукт, що відповідає суспільному замовленню.

Виникнення, розвиток, тривалість, а також ступінь тяжкості наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру (ТНС) у мегаполісі безпосередньо залежить від поточного стану основних фондів виробничої системи мегаполісу, яка містить просторово розподілену множину потенційно небезпечних об'єктів (ПНО). Стан основних фондів характеризується

наступними факторами: закінчення терміну амортизації, старіння, недбале або нецільове використання обладнання та приміщень, тощо.

Аналіз стану техногенної безпеки в регіонах України свідчить, що в залежності від регіону дослідження, можна визначити різні джерела можливої техногенної небезпеки. У складі виробничої системи Харківського регіону та, зокрема, міста Харкова виділені такі їх типи, як, насамперед, об'єкти хімічної промисловості або промислові об'єкти, що використовують небезпечні хімічні речовини, які, зокрема, представляють загрозу виникнення ТНС, поряд з об'єктами інженерної інфраструктури міста, що включають системи водопостачання, водовідведення, теплопостачання, газопостачання та ін.

Системи життєзабезпечення – упорядкована множина об'єктів, що забезпечують водопостачання, водовідведення, електро-, тепло-, газо- та холодопостачання, а також провідний зв'язок і транспортне сполучення в межах визначеної території.

Відповідно з одного боку об'єкти систем життєзабезпечення мегаполісу є джерелами можливої техногенної небезпеки. Поряд з цим вищезазначені елементи є невід'ємною складовою життєзабезпечення міста, базовим компонентом територіальної системи техногенної безпеки. Двоїстий характер інженерних мереж підвищує важливість їх надійної експлуатації, що визначає стійкість стану міста та регіону в цілому з точки зору техногенної безпеки.

Відмови елементів систем водопостачання, котрі є потенційно небезпечними об'єктами, можуть стати причиною каскадного розвитку ТНС, стати на заваді ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру.

До джерел техногенної небезпеки відносяться також пожежі і вибухи на підприємствах виробничої системи мегаполіса, що викликають ТНС.

Потенційно небезпечні об'єкти (ПНО) та складові інженерної інфраструктури мегаполіса представляють собою просторово розподілену множину елементів, небезпечних з точки зору виникнення ТНС. При цьому

важливе значення має фактор часу експлуатації певної ланки виробничої системи мегаполіса, оскільки старіння обладнання та інфраструктури може збільшувати ризики виникнення ТНС.

Ризик – ступінь імовірності певної негативної події, яка може відбутися в певний час або за певних обставин на території об'єкта підвищеної небезпеки та/або за його межами.

Техногенний ризик – це ймовірність настання техногенної НС різного ступеню важкості.

Одне з головних завдань системи прогнозування і попередження ТНС у мегаполісі – це виявлення та ідентифікація техногенних ризиків з якими пов'язана діяльність міського господарства.

За джерелом виникнення техногенні ризики мегаполісу можна об'єднати у три групи.

Група 1. Ризики, пов'язані з діяльністю ОКІ. Кількість таких об'єктів на території мегаполісів, зважаючи на тенденцію розширення меж великих міст, обчислюється десятками.

До цієї групи належать об'єкти енергетики, газо-, нафто- і продуктопроводи, хімічні та нафтохімічні виробництва тощо. Чинна нормативна база не дозволяє в повному обсязі провести реальну оцінку відповідних загроз.

Група 2. Ризики, пов'язані з об'єктами життєзабезпечення мегаполісу – тепловими мережами, розподільними електричними та газовими мережами, мережами холодного водопостачання та водовідведення, системами утилізації твердих побутових відходів, транспортними міськими системами, лініями зв'язку.

Сукупний портфель ризиків цієї групи дуже великий, оскільки кількість об'єктів технічного регулювання в системі життєзабезпечення мегаполісу обчислюється тисячами одиниць.

Група 3. Ризики загального характеру, в управлінні якими бере участь адміністрація мегаполісу. До цієї групи належать ризики, пов'язані з

порушенням обмежень проектування та режимів експлуатації гідротехнічних систем, тунелів, мостів, висотних споруд, будівельних об'єктів на проблемних ґрунтах, а також відсутністю координації дій різних міських служб.

Для кожної з цих груп існує множина чинників, що генерує техногенні ризики.

Проведений в роботі аналіз показав, що дана множина подається двома класами чинників, що сприяють появі раптових (стрибкоподібна зміна значень параметрів системи, що розглядається) та поступових відмов обладнання на різних об'єктах.

Наявність поступових відмов, що носить нелінійний за часом характер, спричиняє одну з основних проблем, з якою стикаються експлуатаційні служби мегаполіса – високий знос основних фондів систем життєзабезпечення мегаполіса, та обладнання житлово-комунального господарства в цілому.

Реалізація програм модернізації та технічного переозброєння комплексів ЖКГ, особливо тих об'єктів, що є потенційно небезпечними, критично залежить від об'єктивних обмежень бюджетного характеру. Разом з тим кількість техногенних ризиків, що генеруються зношеним, застарілим обладнанням об'єктів, з кожним роком збільшується. На цьому тлі підвищується ймовірність реалізації раптових відмов різного обладнання, і, як наслідок, виникнення техногенної НС.

За таких умов функціонування територіальної системи техногенної безпеки як системи запобігання та реагування на техногенні НС, значно ускладнюється внаслідок недетермінованості та нестаціонарності процесів виникнення НС, що розглядаються, та невизначеності як географічної локації, так і ступеню важкості наслідків техногенної НС.

Розвиток ТНС – це динаміка (у часі) рівня небезпечних факторів ТНС та їх впливу на оточення.

Ще одним важливим концептом даної предметної області є управління [166, 167].

Процес управління техногенною безпекою мегаполісу у режимі повсякденного функціонування – це здійснення органами управління та силами цивільного захисту цілодобового чергування та забезпечення функціонування системи збору, оброблення, узагальнення та аналізу інформації про обстановку в районах виникнення надзвичайних ситуацій та координації дій територіальних підрозділів ДСНС України.

Управління в режимі надзвичайної ситуації полягає у постійному керівництві з боку органу управління та уповноваженого керівника з ліквідації надзвичайної ліквідації залученими службами і силами та в організації виконання завдань із ліквідації НС або її наслідків.

В даному дослідженні об'єктом управління є інженерні мережі систем життєзабезпечення, при цьому зміна стану інженерних мереж означає зміну стану небезпеки на них (підвищення або зниження). У свою чергу, стан небезпеки інженерної мережі оцінюється прогнозованою ймовірністю виникнення аварії як джерела НС, її важкістю і частотою її ліквідації, що безпосередньо впливає на класифікацію певної частки аварій як НС техногенного характеру.

Порівняльний аналіз україномовної та англomовної наукової літератури показав, що в останній існує своя усталена термінологія, порівняння якої з вітчизняними підходами наведено на рис. 3.1.

Так в окремих роботах [166, 167] доведено, що функції управління (планування, визначення джерел та обсягів необхідних ресурсів, регулювання, періодичний контроль ходу виконання програми) трансформуються у два базові види управління – проактивне і реактивне управління.

Проактивне управління здійснюється на основі деяких очікувань. Реалізація проактивного управління означає застосування прогнозних моделей щодо результатів і стану оточення проекту, які дозволяють завчасно оцінити ефективність як окремих фаз і процесів, так і системи, що розглядається, в цілому. На сьогодні застосування проактивного управління визнається науковою спільнотою потужним засобом

підвищення ефективності управління.

В англomовних фахових публікаціях фаза попередження (проактивне управління) визначається як «mitigation + preparedness», тобто буквально – пом'якшення наслідків та забезпечення готовності до ТНС. Це усталене визначення.

Реактивний вид управління полягає в реакції на деякі події, які вже сталися в результаті виникнення певних обставин випадкового або детермінованого характеру.

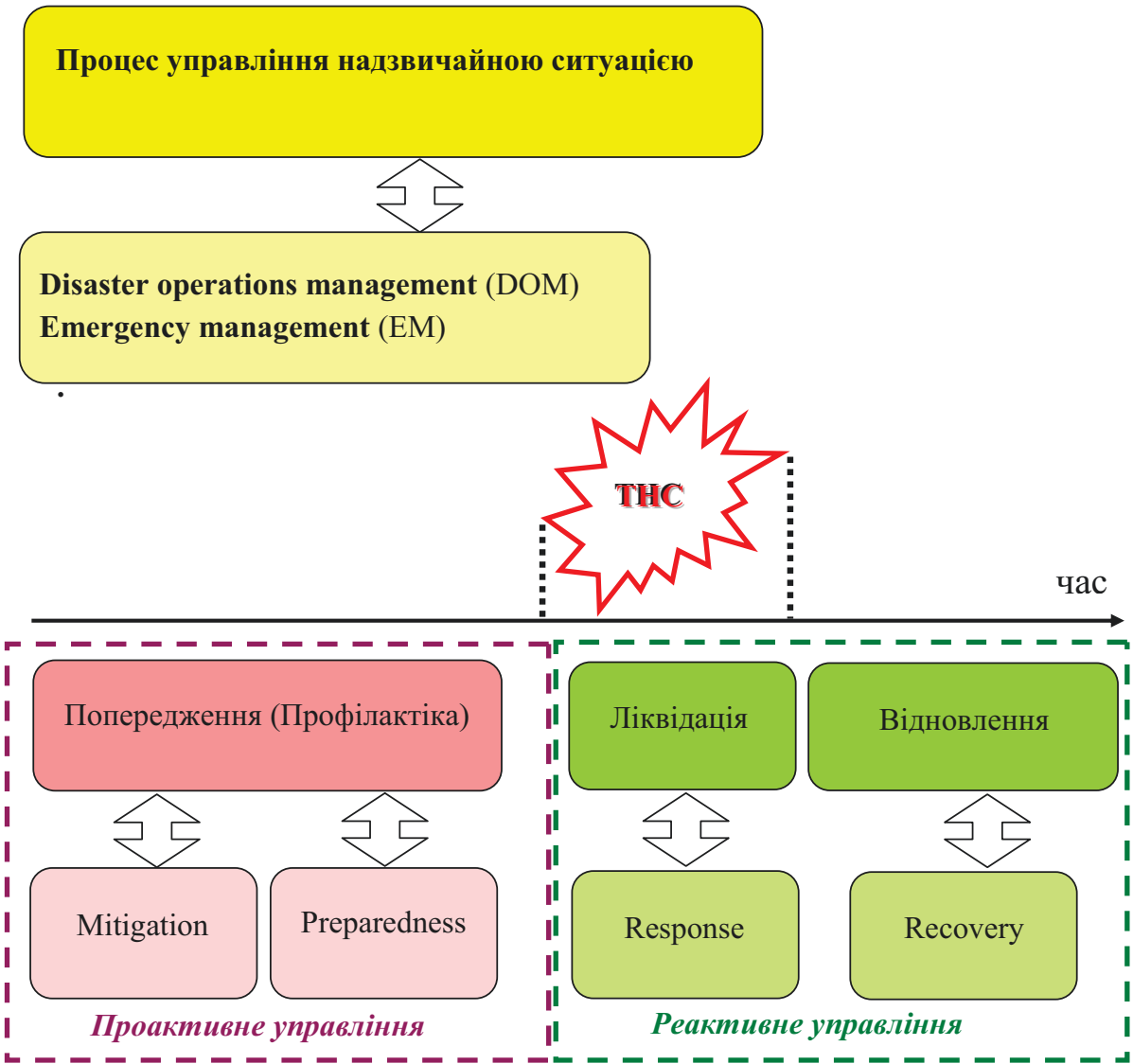


Рисунок 3.1 – Життєвий цикл управління надзвичайною ситуацією

Фаза реактивного управління містить етапи «response + recovery», буквальный переклад: реагування та відновлення.

Відповідно основними інструментами реактивного управління стають функції контролю виконання та регулювання дій.

Ефективність управління на етапі попередження НС є векторним показником та включає в себе такі складові, як ефективність процесів збору та обробки інформації, ефективність інструментальних засобів прогнозування та оцінки соціально-економічних наслідків НС, ефективність процедур уточнення управлінського рішення.

Розглядаючи проблему життєвого циклу ТНС унаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст необхідно відзначити наступні особливості розвитку таких НС табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікаційні ознаки НС техногенного характеру, які викликані аваріями на системах життєзабезпечення міст, та порогові значення їх показників

№ ознаки	Опис ознаки (короткий опис ситуації, випадку, події, пригоди, аварії, явища)	Одиниця виміру показника ознаки	Порогові значення показника ознаки
1	2	3	4
НС, унаслідок аварії в електричних мережах			
1.55	Припинення енергопостачання з аварійних причин об'єктів, підприємств, установ та організацій, повне відключення яких від електричних мереж може призвести до негативних екологічних та техногенних наслідків, що створюють загрозу життю та здоров'ю людей	Факт	1

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
1.56	Припинення енергопостачання основних об'єктів і спеціальних споруд військового призначення, що може призвести до негативних екологічних та техногенних наслідків, які створюють загрозу життю та здоров'ю людей	Година	Від 12
1.70	Припинення електропостачання населених пунктів області на добу і більше з причини масового пошкодження електричних мереж напругою 6 кВ і вище	Відсоток населених пунктів	Від 10
1.71	Відключення або вихід з ладу на 12 годин і більше потужності підстанцій напругою 110 кВ і вище, що забезпечують енергопостачання міста	Відсоток потужності від загальної потужності	Від 25
1.72	Припинення експлуатації об'єктів водопостачання та водовідведення в місті з причини відключення їх від джерел енергоживлення внаслідок аварії у системі енергозабезпечення (пошкодження електричних мереж)	Година	Від 8
НС унаслідок аварії в каналізаційній системі із скиданням забруднювальних речовин			
1.69	Скидання неочищених чи недостатньо очищених стічних вод на території населеного пункту або у водні об'єкти в обсязі понад 100 куб.м за годину, (загальний обсяг скиду)	Куб. м за годину (куб. м)	Понад 500
НС унаслідок аварії в теплових мережах (системах гарячого водопостачання) холодної пори року			

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
1.73	Припинення теплопостачання споживачів за температури зовнішнього повітря нижче 0°C в опалювальний період року через пошкодження магістральних теплових мереж або обладнання комунальних та відомчих котелень	Година	Від 24
1.74	Припинення теплопостачання споживачів за температури зовнішнього повітря від 0°C до +8°C в опалювальний період року через пошкодження магістральних теплових мереж або обладнання комунальних та відомчих котелень	Година	Від 48
НС унаслідок аварії в системах забезпечення населення питною водою			
1.72	Припинення експлуатації об'єктів водопостачання та водовідведення в обласних центрах з причини відключення їх від джерел енергоживлення внаслідок аварії у системі енергозабезпечення (пошкодження електричних мереж)	Година	Від 8
1.75	Припинення водопостачання більше 30 відсотків розрахункового обсягу водопостачання населеного пункту через аварії на об'єктах водопостачання або пошкодження мереж водопостачання	Година	Від 18
НС унаслідок аварії на газопроводі систем газопостачання та газифікації			
1.1	Загибель або травмування людей (персоналу) внаслідок пожеж і вибухів (окрім випадків пожеж і вибухів у житлових будівлях та спорудах), руйнування підземних споруд (у тому числі обрушення покрівель гірничих виробок у шахтах)	Особа	Загинуло від 2 осіб, Постраждало (травмовано) від 5 осіб

Продовження таблиці 3.1.

1	2	3	4
1.6	Виникнення безпосередньої загрози життю людей небезпечними (уражальними) чинниками джерела небезпечної ситуації (аварії, події), що призвело до екстреної евакуації понад 50 осіб	Факт	1
1.24	Руйнування підприємства (об'єктів підприємства) промислового (агропромислового) виробництва внаслідок виходу з ладу газового обладнання з причини аварії на газопроводі	Факт	1
1.63	Аварія на газопроводі та вихід з ладу газового обладнання, що створюють загрозу вибуху газу в багатоквартирних житлових будинках або витік газу з утворенням загрози для життя людей, які перебувають за межами охоронної зони газопроводу	Факт	1
1.76	Припинення подачі газу внаслідок аварії на комунальному газопроводі в район (населений пункт), що обслуговується (з кількістю абонентів понад 500)	Година	Від 24

Для цього визначимо такі ознаки аварії:

$$O_A = \{\eta_{OA}, t_{OA}\}, \quad (3.1)$$

де η_{OA} – важкість аварії, t_{OA} – час ліквідації аварії.

Відповідно надзвичайна ситуація техногенного характеру унаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст може виникнути:

- в момент аварії, якщо її важкість η_{OA} є такою (початкове пошкодження є настільки сильним), що відповідає класифікаційним ознакам 1.55, 1.70, 1.1, 1.6, 1.24, 1.63 (табл.3.1);

- протягом ліквідації аварії, якщо час t_{OA} її ліквідації порівняний з класифікаційними ознаками 1.56, 1.71, 1.72, 1.69, 1.73, 1.74, 1.72, 1.75, 1.76 (табл. 3.1).

В обох випадках умови життєдіяльності міста змінюються, тому система управління техногенною безпекою мегаполісу має здійснювати адекватне урахування цих умов та визначення раціональних управлінських рішень. У той же час згідно парадигми проактивного управління для здійснення випереджаючого впливу на зовнішні умови та внутрішні умови функціонування муніципальна система управління як цілеспрямована система повинна мати можливість компенсувати дії середовища за рахунок зміни свого внутрішнього стану.

Таким чином, швидке наростання потоку різномірної інформації і ступеня невизначеності середовища призводять до ускладнення внутрішніх взаємозв'язків системи управління мегаполісом, функціонування якого ускладнюється наявністю та високим рівнем концентрації потенційно небезпечних промислових об'єктів на відносно невеликій території та пов'язано із додатковими підвищеними ризиками.

3.2 Особливості фази попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення

Моделювання виникнення та розвитку ТНС унаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення мегаполісу має враховувати наступні характеристики мегаполісу як середовища виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру, зокрема на об'єктах інженерної інфраструктури.

1. Швидке зростання міського населення, що ускладнює захист людей від техногенних катастроф, критично посилює навантаження на існуючі системи життєзабезпечення, погіршує умови експлуатації таких систем.

2. Погіршення умов проживання у мегаполісах:

- концентрація на відносно невеликій території значної кількості потенційно небезпечних об'єктів;
- високий рівень старіння основних фондів потенційно небезпечних об'єктів;
- наближеність об'єктів із масовим перебуванням людей до потенційно небезпечних об'єктів.

3. Складність, динамічність, загалом невизначеність відносин системоутворюючих компонент міської території:

- збільшення кількості промислових комплексів та небезпечних матеріалів у міських районах, що знаходяться під загрозою природної небезпеки.

4. Урбанізація спричиняє руйнування рівноваги в екосистемах, в результаті чого виникають техногенні катастрофи.

5. Невизначеність або відсутність оперативної, повної і несуперечливої інформації про міське господарство як в повсякденному режимі функціонування, так і в режимі надзвичайної ситуації.

За цих умов одним з головних факторів підвищення рівня техногенної безпеки міста є побудова прогнозу виникнення ТНС.

Для обрання інструментальних засобів прогнозування проведено класифікацію особливостей надзвичайних ситуацій техногенного характеру в мегаполісі (рис. 3.2).

Визначимо місце етапу прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру в загальній концепції управління техногенною безпекою.

Упорядкований опис функцій управління техногенною безпекою

мегаполісу у фазі попередження ТНС можна подати у вигляді 3-х основних етапів:

- прогнозування часу, місця виникнення та рівня складності ймовірної надзвичайної ситуації техногенного характеру;
- організація ресурсозабезпечення процесів попередження, ліквідації наслідків ймовірної надзвичайної ситуації техногенного характеру;
- моніторинг техногенних небезпек та контроль ключових параметрів системи управління техногенною безпекою мегаполісу.



Рисунок 3.2 – Характеристика особливостей виникнення та протікання ТНС в умовах мегаполісу

В даному дослідженні основна увага приділятиметься саме прогнозуванню як першій функції управління техногенною безпекою.

Організація захисту населення, об'єктів і територій великих міст від НС техногенного характеру ускладнюється через свою специфіку, зумовлену складним адміністративно-територіальним устроєм, високою щільністю населення, рівнем концентрації небезпечних виробництв та зношеності основних фондів підприємств.

Імплементация основних етапів функцій управління техногенною безпекою мегаполісу представлена на рис. 3.3.

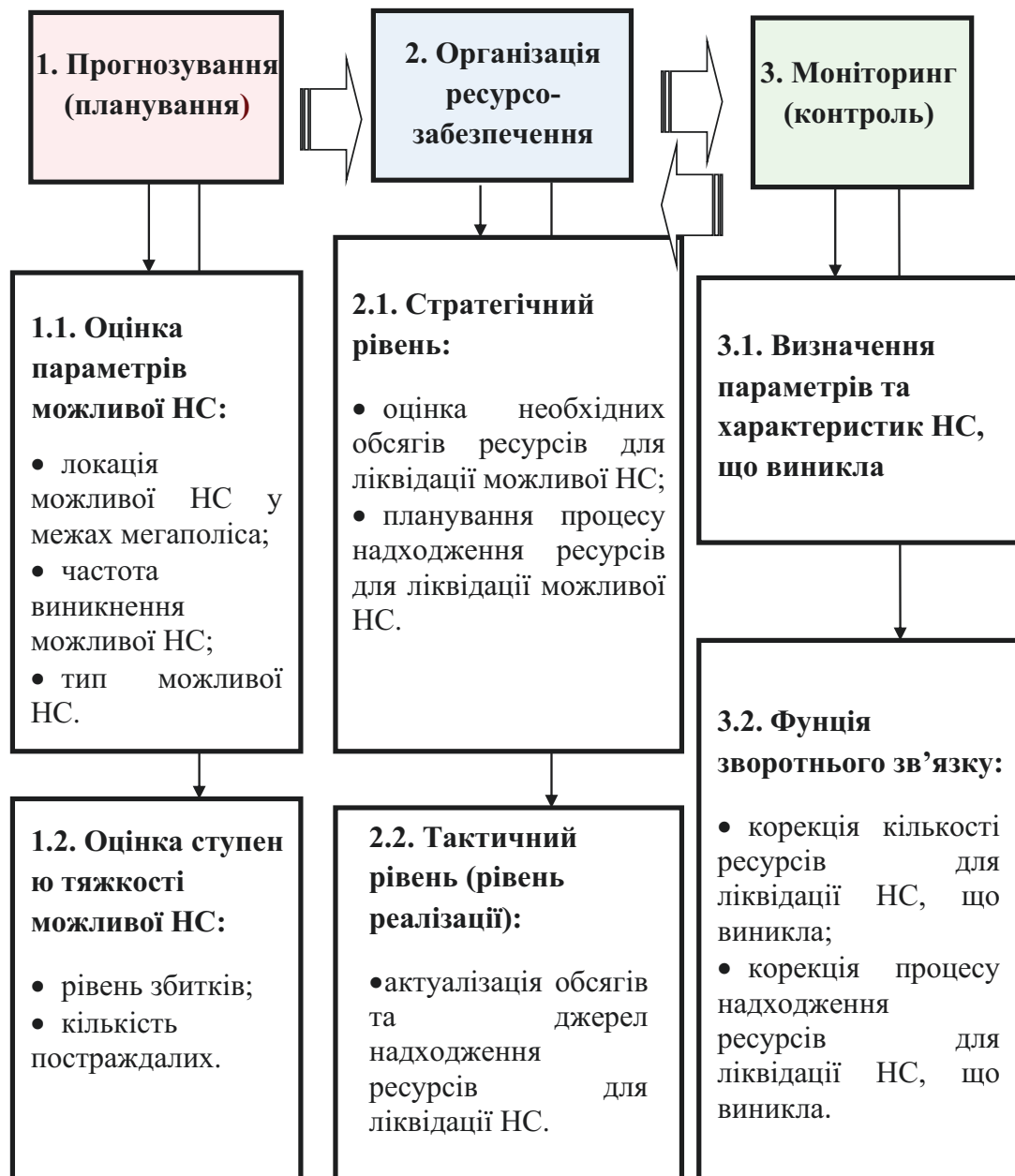


Рисунок 3.3 – Етапи управління техногенною безпекою міста

Таким чином, особливості управління техногенною безпекою мегаполісу дозволяють визначити основні етапи процесу попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру в загальній концепції управління техногенною безпекою, зокрема прогнозувати основні параметри небезпеки можливої техногенної надзвичайної ситуації.

3.3 Моделювання інженерних мереж систем життєзабезпечення міста як джерела надзвичайної ситуації техногенного характеру

Складові інженерних мереж систем життєзабезпечення мегаполіса представляють собою просторово розподілену множину елементів, небезпечних з точки зору виникнення ТНС.

При цьому важливе значення має фактор часу експлуатації певної ланки інженерної мережі системи життєзабезпечення мегаполіса.

Загалом, аналіз стану основних фондів виробничої системи регіону, що включає визначення множини дестабілізуючих факторів, які генеруються внутрішнім і зовнішнім середовищем виробничої системи регіону та викликають випадкові і поступові відмови виробничого обладнання, включає опис його динаміки, тобто в якості вихідних даних дослідження є ряди даних, що мають розглядатися у просторово-часовому континуумі.

Відповідно, прогнозування виникнення і розвитку ТНС в мегаполісі передбачає побудову аналітичної ймовірнісної прогнозної моделі просторово-часових рядів R_S аварій з урахуванням можливого ступеню важкості наслідків ТНС.

Такі просторово-часові ряди є реалізацією випадкового поля

$$Z(x, t); x \in D, t \in T, \quad (3.2)$$

де $D \in R^{2L}$ – просторова обмежена область, що може бути як неперервною, так і дискретною; L – кількість типів джерел можливої техногенної небезпеки; T – часовий інтервал, за яким розглядаються статистичні ряди даних.

Існуючі на сьогодні моделі просторово-часової кореляційної структури активно вивчаються геостатистикою [168]. Застосування наукового і методологічного доробку геостатистики базується на визначенні просторово-часової кореляційної структури поля $Z(x, t)$, що задається всіма випадковими змінними в області дослідження ($D \times T$).

Згідно з ґрунтовним дослідженням [168], геостатистичні моделі просторово-часової кореляційної структури можна розділити на два види: такі, що передбачають розподіл на просторову та часову компоненти (метрична модель, лінійна модель, модель добутку, модель добуток-сума тощо), та такі, що такого розподілу не припускають.

Зважаючи на складність задачі, одним з прийнятних підходів першого типу є методологія порівняльної статистики, тобто дискретизація наявної сукупності статистичних даних за часом та послідовний розгляд множини часових перерізів без опису переходу від одного перерізу до іншого.

Проведене дослідження традиційних і новітніх конструктивних засобів аналізу та обробки просторово розподілених даних, серед яких – інтерполяційні моделі: лінійна інтерполяція на основі триангуляції [169], метод обернених середньозважених відстаней (inverse distance weighting) тощо; власне моделі, що базуються на статистичній інтерпретації даних; алгоритми, засновані на навчанні – штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми [170].

Аналіз і моделювання просторових даних ускладнюється наявністю великих неупорядкованих зашумлених обсягів кількісної та якісної інформації, багатовимірністю та наявністю різних факторів впливу, у тому числі характером керування у «ручному» режимі.

При оцінці просторово розподілених статистичних даних необхідно вирішувати ряд задач. Це такі задачі, як

- визначення ймовірності реалізації випадкової величини, що спостерігається (настання відмови елементу інженерної мережі систем життєзабезпечення мегаполісу, що спричиняє ТНС),
- визначення ймовірності перевищення величиною, що спостерігається, заданого рівню.

Більш узагальнено це означає побудову карт ймовірності, що дозволяє визначити локальну функцію розподілу в точці оцінювання, а також отримати набір рівноймовірних стохастичних просторових реалізацій розподілу змінної, що спостерігається.

Такий просторовий аналіз даних (в сукупності із дослідженням часової складової) є важливим проміжним етапом в процесі побудови та реалізації імітаційної моделі виробничої системи мегаполісу, що містить елементи інженерної інфраструктури, як джерела надзвичайної ситуації техногенного характеру.

Спираючись на висновки роботи, подібна формалізація закладає теоретичну базу побудови методичного й інформаційного забезпечення прогнозування ризику зниження рівня техногенної безпеки мегаполіса як засобу оптимізації відповідних управлінських рішень.

В роботі [171] автором проведено характеристику цілей управління мегаполісом як багатовимірної категорії з точки зору управління його ресурсним потенціалом, що включає оптимізацію міської логістичної інфраструктури.

Розвиваючи цей підхід, приймемо, що K_{general} – узагальнений критерій якості управління містом, має вигляд:

$$K_{\text{general}} = \Psi(F_{\text{life_Level}}, F_{\text{resist}}), \quad (3.3)$$

де $F_{\text{life_Level}}$ – критерій підвищення рівня життя громади, F_{resist} – критерій забезпечення стійкості інфраструктури, Ψ – певний вид згортки.

Визначимо таку класифікацію ресурсів Ω :

$$\Omega = \{\Omega^{\text{accum}}, \Omega^{\text{instant}}\}, \quad (3.4)$$

де Ω^{accum} – множина ресурсів, що мають накопичувальний характер: резервні фонди, імідж, інформація, інтелектуальний потенціал, природні ресурси тощо; Ω^{instant} – ресурси миттєвої дії: ліквідні активи, технології, час.

Моделюючи сценарії розвитку міста (рис 3.4), необхідно відмітити таку особливість: результати дії різних сценаріїв (штрихові стрільці на рис.3.4), що застосовують різні типи ресурсів, можуть демонструвати однакові значення K_{general} . Іншими словами, спостерігається певне плато значень узагальненого критерію якості. Крім того, впливи зовнішнього та внутрішнього середовища можуть як сприяти (стимулятори), так і заважати (дестимулятори) підвищенню значення K_{general} .

Один з таких суттєвих дестабілізуючих впливів генерується елементами інженерних мереж системи життєзабезпечення міста як джерелами можливої ТНС.

Моделювання виникнення та розвитку ТНС в умовах мегаполісу має враховувати основні особливості ТНС (рис.3.2), як розподіленість у часі та просторова розподіленість ТНС; випадковість моментів настання; унікальність умов протікання; високий рівень збитків та впливів на оточення;

Інформація щодо параметрів аварії, наслідком якої є можлива НС техногенного характеру, є відмінною за змістом, формою та вимірністю, тому найбільш прийнятним її поданням у імітаційній моделі, що розглядається, є кортеж I вигляду:

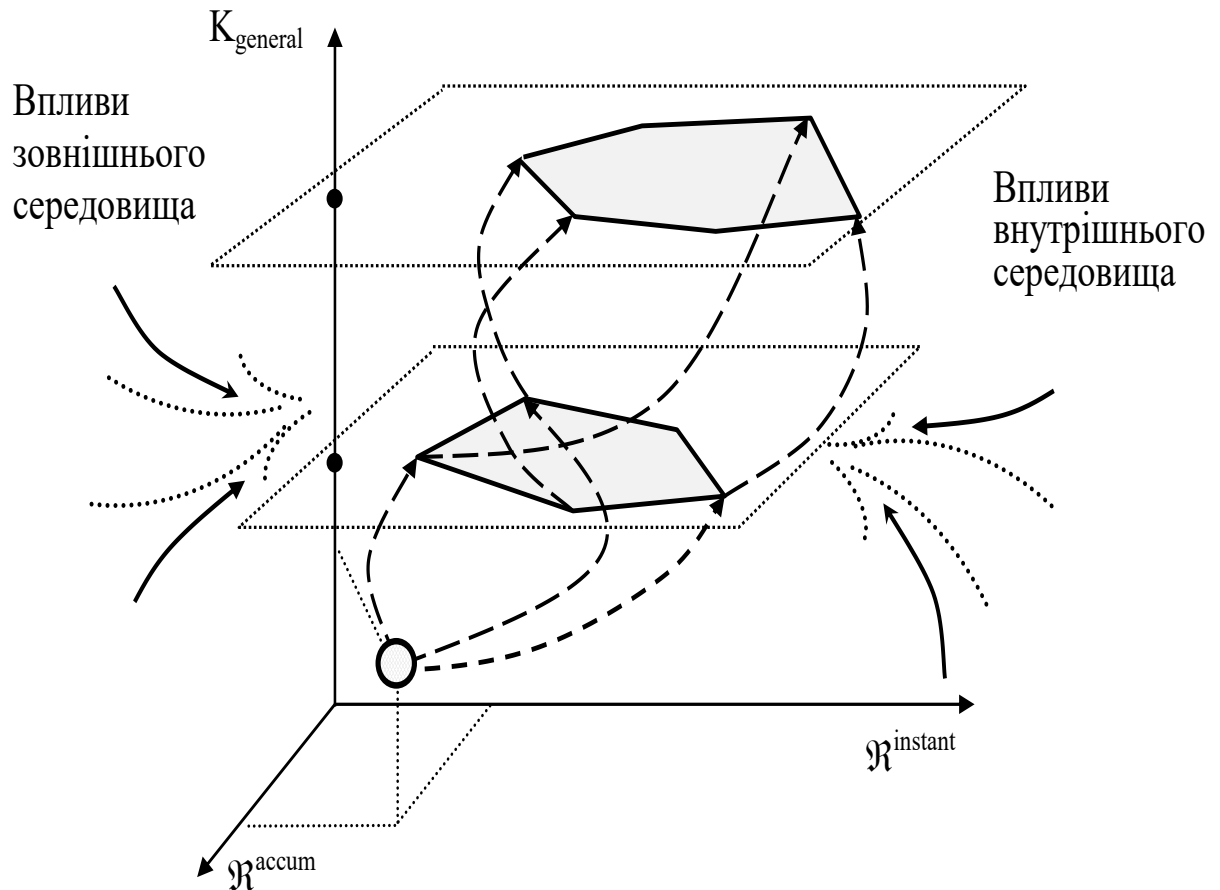


Рисунок 3.4 – Сценарії розвитку міста як складної системи невизначеність (багатоваріантність) причин реалізації ТНС; недостатній обсяг та зашумленість статистичної інформації про попередні ТНС

$$I = \langle v, \{\lambda(t), \beta(x,y)\}, \tau, \mathfrak{Z}, \mathfrak{R} \rangle, \quad (3.4)$$

де $v=(x,y)$ – вектор параметрів локації можливої ТНС у межах міської забудови; $\lambda(t)$, $\beta(x,y)$, – параметри законів розподілу моментів та локації виникнення ТНС відповідно; τ – моменти виникнення ТНС; $\mathfrak{Z}$ – тип можливої ТНС; $\mathfrak{R}$ – рівень тяжкості ТНС, що теж є випадковою величиною.

Зазначимо, що $\mathfrak{R}$ є функцією характеристик аварії – $\mathfrak{R}(\eta_{OA}, t_{OA})$ (3.1) – унаслідок якої розвивається ТНС.

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_J\}, G \subset D. \quad (3.5)$$

При цьому часова складова просторово-часового ряду R_s характеризується інтенсивністю виникнення аварій (випадкових подій), що є функцією часу $\lambda(t)$, тобто часова складова є нестационарною.

Очевидно, що параметри $\{\lambda(t), \beta(x,y)\}$, τ , $\mathfrak{Z}$, $\mathfrak{R}$ залежать від типу інженерної мережі, що розглядається.

У теорії надійності показано, що періоду нормальної експлуатації складних систем відповідає стаціонарний пуассоновський потік числа k випадкових відмов протягом періоду t вигляду

$$P_k(t) = \frac{(\lambda^{\text{вип}} t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (3.6)$$

де $\lambda^{\text{вип}}$ – параметр розподілу Пуассона.

Проведемо аналіз властивостей пуассоновського потоку, які використовуватимуться в подальшому дослідженні.

Потоком подій називають послідовність дискретних подій, які наступають у випадкові, але упорядковані моменти часу [172].

Найпростішому (пуассонівському) потоку притаманні властивості стаціонарності, відсутності післядії і ординарності.

Властивість стаціонарності характеризується тим, що ймовірність появи k подій на будь-якому проміжку часу залежить тільки від числа k і від тривалості t проміжку і не залежить від початку його відліку; при цьому різні проміжки часу передбачаються непересічними.

Отже, якщо потік володіє властивістю стаціонарності, то ймовірність появи k подій за проміжок часу тривалості t є функція, яка залежить тільки від k і t .

Властивість відсутності післядії характеризується тим, що ймовірність появи k подій на будь-якому проміжку часу не залежить від того з'являлися або не з'являлися події в моменти часу, що передували початку даного проміжку. Іншими словами, умовна ймовірність появи k подій на будь-якому проміжку часу дорівнює безумовній ймовірності. Таким чином, передісторія потоку не позначається на ймовірності появи подій в найближчому майбутньому.

Властивість ординарності характеризується тим, що поява двох і більше подій за малий проміжок часу практично неможлива. Іншими словами, ймовірність появи більше однієї події нікчемно мала в порівнянні з ймовірністю появи тільки однієї події.

Факт розподілу ймовірності відмов $P_k(t)$ за законом Пуассона з постійною інтенсивністю $\lambda^{\text{вип}}$ в період нормального функціонування (визначається, наприклад, періодом амортизації $[0, t_A]$), підтверджується також результатами аналізу наявних статистичних даних та досвіду експлуатації технічних систем.

Як зазначалося раніше, у сучасній практиці господарювання параметри інженерних мереж систем життєзабезпечення міста такі, що відповідають багато в чому періоду старіння. На даному етапі життєвого циклу особливе значення набувають систематичні відмови, обумовлені закономірними і неминучими явищами, що викликають поступове накопичення ушкоджень, втому, зношення обладнання.

Аналіз історичних рядів статистичних даних та досвіду експлуатації складних технічних систем показує, що в період старіння об'єкта дослідження інтенсивність систематичних відмов $\lambda^{\text{сист}}(t)$ зростає, лінійно або квадратично (рис.3.5).

Тоді параметр $\eta(t, t_H)$ розподілу Пуассона приймає вигляд:

$$\eta(t, t_H) = \lambda_{t \geq t_H}(t) = \lambda^{\text{вип}} + \lambda^{\text{сист}}(t) \Big|_{t \geq t_H}. \quad (3.7)$$

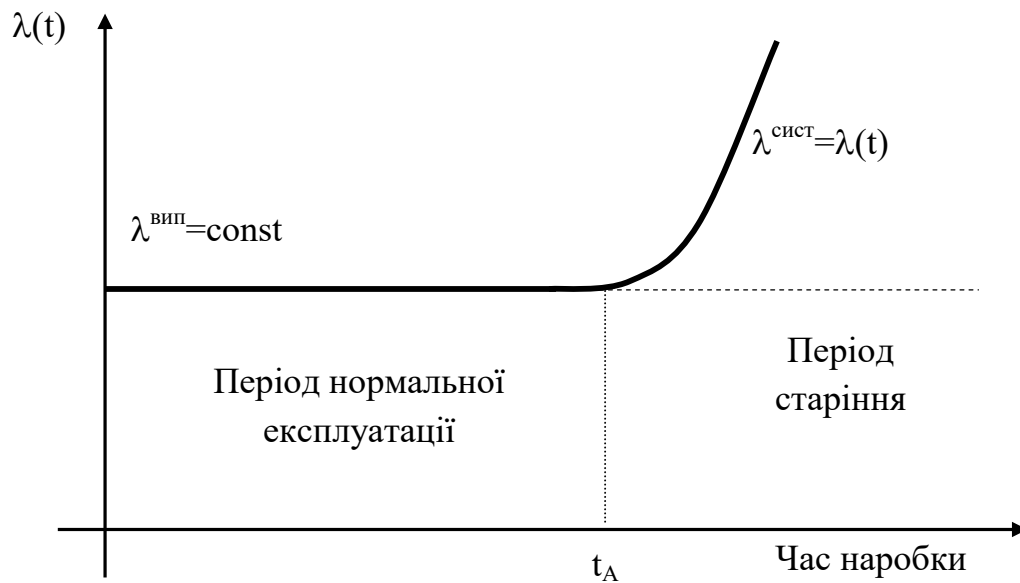


Рисунок 3.5 – Характеристика параметру розподілу закону Пуассона

Відповідно при перевищенні періоду амортизації – в період старіння – пуассонівський потік θ відмов отримує властивість нестационарності, тобто перестає бути найпростішим.

$$P_{\theta}(t, t_H) = \frac{\eta(t, t_H)^{\theta}}{k!} e^{-\eta(t, t_H)}, \quad (3.8)$$

де t_H – початок періоду старіння, θ – кількість відмов в інтервалі $[t_H, t]$, $\eta(t, t_H)$ – параметр нестационарного розподілу Пуассона, що є функцією $\lambda^{\text{сист}}(t)$ (рис.3.6).

В практичних застосуваннях функцію інтенсивності систематичних відмов $\lambda^{\text{сист}}(t)$ на інтервалі $[t_H, t]$ доцільно замінити певним наближенням, наприклад кусково-постійною функцією вигляду

$$\lambda^{\text{сист}}(t) = \lambda_{c-1}^{\text{сист}}, \text{ якщо } t_{c-1} \leq t < t_c, c=1, 2, \dots, C, t_c \in [t_H, t]. \quad (3.9)$$

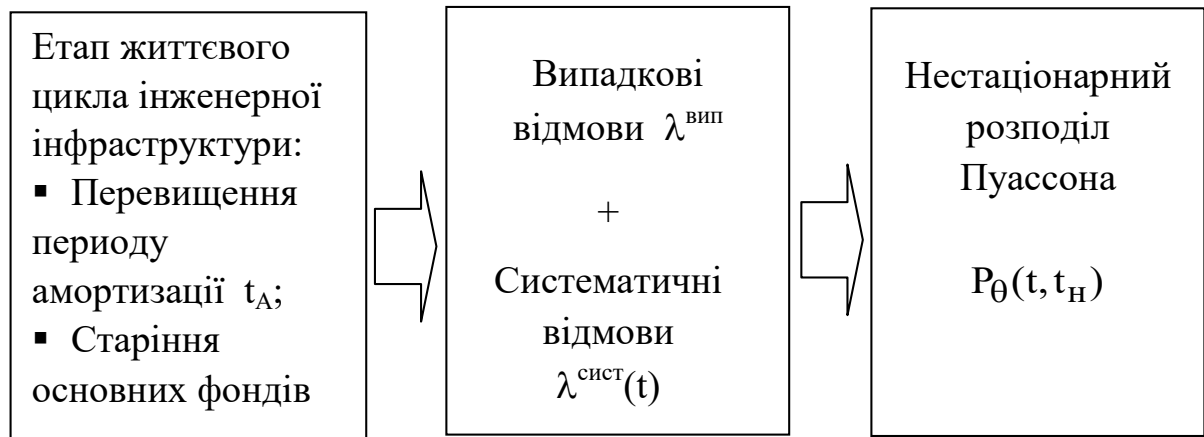


Рисунок 3.6 – Етап старіння інженерних мереж систем життєзабезпечення

Відповідно мету прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на етапі її попередження подано на рис. 3.7.

Окреслимо основні риси моделювання надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення.

1. Момент настання та місце настання надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення мають задаватися певним розподілом ймовірності дискретної ймовірнісної величини, тобто має виконуватися просторово-часове моделювання події виникнення ТНС.

2. Об'єктами розгляду та аналізу є такі складові інженерної інфраструктури:

- мережі водопостачання та водовідведення;
- теплові мережі;
- мережі електропостачання;
- мережі теплопостачання;
- мережі газопостачання.

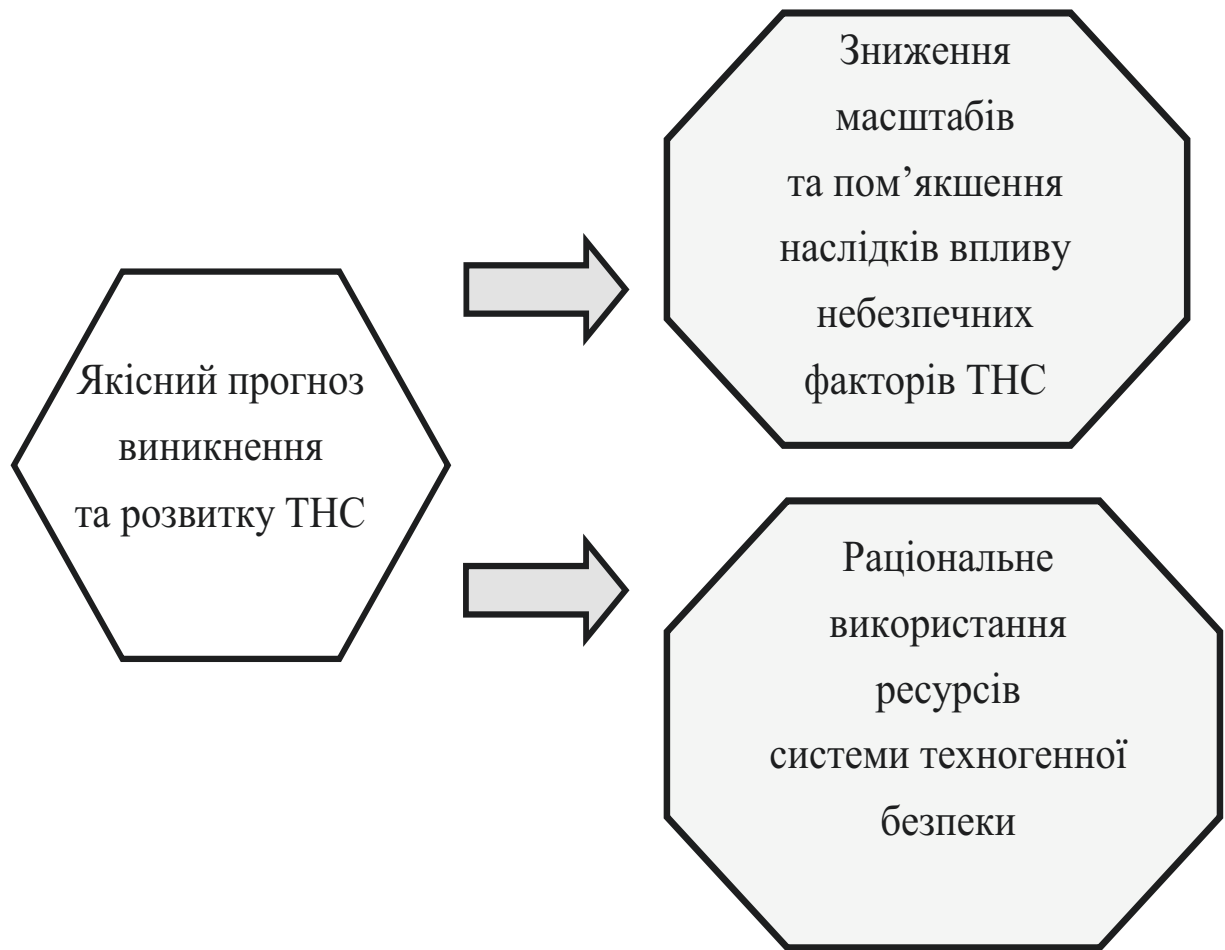


Рисунок 3.7 – Мета прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру

3. Аналіз вихідних даних для моделювання ТНС на системах інженерної інфраструктури мегаполісу:

- на виділених типах об'єктів структура вихідних даних для моделювання НС є однаковою;
- потік виникнення аварій можна сприймати як послідовність заявок на обслуговування;
- для визначення координат можливої аварії проводиться розбиття контрольованої території сіткою на осередки;
- закон розподілу географічних локацій аварії – Пуасона (аварії частіше виникають в тих місцях, де стан основних фондів гірший).

4. Аналіз результатів аварії:

- для водопровідних мереж та мереж теплопостачання – прямі збитки або вартість витрат;

- для електричних мереж та мереж газопостачання – непрямі збитки.

5. Аналіз процесу моделювання:

- моделювання місця, часу і рівня тяжкості НС;
- моделювання проводиться протягом деякого періоду часу, підраховуються сумарні витрати, оцінюється готовність територіальної системи техногенної безпеки (ТСТБ) до обслуговування визначеної множини ТНС.

Таким чином, просторово-часовий ряд даних R_S формують результати спостережень за аваріями елементів інженерної мережі як складної технічної системи, що є просторово-розподіленою і подається скінченою дискретною множиною ланок.

3.4 Характеристика процесу управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста як складової частини процесу управління ризиками

Ризик – це характеристика ситуації, яка має невизначеність результату при обов'язковій наявності несприятливих наслідків. Йти на ризик – це значить, мати на увазі можливу небезпеку або діяти навмання в надії на щасливий результат.

Слово «ризик», на думку Фасмера, є запозиченим із французької й італійської мов, які, у свою чергу, запозичили його з давньогрецького від слова, яке означає скеля або підніжжя гори. Звідси термін «ризикувати» перекладається із французької та італійського як «лавірувати між скелями» .

Одні автори термін «ризик» застосовують до реального явища (ризик пожежі, ризик автомобільно-транспортної події), інші – до моделі реального явища, побудованої за допомогою тих або інших математичних засобів, наприклад, апарата теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії нечітких множин, інтервальної математики.

«Ризик – це небажана можливість». Тут термін «ризик» застосовується для опису реальної події. «Ризик – ймовірність виникнення збитків або недоодержання доходів у порівнянні із прогнозованим варіантом». У цьому випадку термін «ризик» використовується в процесі моделювання реальної події за допомогою теорії ймовірності. Іноді ці протиріччя створюють плутанину.

Досить типовим є наступне визначення, яке застосовується при розробці автоматизованих систем прогнозування й запобігання подій на авіаційному транспорті. Ризик – це міра кількісного багатокомпонентного виміру небезпеки із включенням величини збитку від впливу загроз для безпеки, ймовірності виникнення цих загроз і невизначеності у величині збитку та ймовірності. Автори цієї статті відзначають, що при виконанні проекту вони на кожному етапі обирають свій, найбільш прийнятний опис ризику. На першому етапі вони змушені зупинитися на ймовірнісно-статистичній моделі ризику, яка характеризується ймовірністю реалізації небезпеки й описом випадкового збитку його математичним очікуванням [170]. Використання квантилей функції розподілу випадкового збитку, а також моделей оцінки, аналізу й управління ризиками на основі теорії нечітких множин і статистики інтервальних даних є предметом розгляду на наступних етапах виконання роботи.

Проблема обліку безповоротних людських втрат і втрат, пов'язаних з нанесенням шкоди здоров'ю людей, вирішується шляхом звертання до даних страхових компаній. Кожним проектом також передбачений моніторинг прийнятих в авіакомпанії, яка замовляє автоматизовану систему, показників

рівня безпеки польотів із забезпеченням автоматизованої процедури розрахунку їхніх поточних значень.

Ризик порівняно рідко пов'язаний з діяльністю суб'єкта. Об'єктами ризику можуть бути матеріальні об'єкти, майнові або інші інтереси, життя й здоров'я людини, навколишнє середовище. Сучасна ситуація в теорії ризиків характеризується тим, що переважна частина робіт з оцінки, аналізу й управління ризиками відноситься до тієї або іншої конкретної області, наприклад, ризику випуску дефектної продукції, ризиків конкурентного оточення, безпеки польотів, ризиків персоналу, промисловим аваріям, екологічній безпеці, терористичним ризикам і т.д.

Для оцінки ризику необхідно визначити можливість настання небажаної події й збиток, породжений ризиком. В ймовірнісній моделі оцінка можливості настання небажаної події зводиться до обчислення ймовірності, тобто оцінка можливості виникнення ризику є безрозмірною величиною, яка приймає значення від 0 до 1.

Нехай величина збитку, породженого ризиком, описується випадковою величиною X з функцією розподілу $F(x) = P(X < x)$, де x – дійсне число, а $P(X < x)$ – ймовірність випадкової події $X < x$.

Оскільки випадкова величина X інтерпретується як величина збитку, то вона є ненегативною випадковою величиною. Залежно від припущень про властивості функції розподілу $F(x)$ ймовірнісні моделі ризику поділяються на параметричні й непараметричні.

В першому випадку передбачається, що функція розподілу входить в одне з відомих сімейств розподілів – нормальне (тобто гауссове), експонентне або інше. Однак звичайно таке припущення є недостатньо обґрунтованим, тому що реальні дані виходять за рамки заздалегідь заданого сімейства. Тоді необхідно застосовувати непараметричні статистичні методи, які не передбачають, що розподіл збитку взятий з того або інших популярного серед математиків сімейства. При використанні

непараметричних статистичних методів звичайно роблять допущення, що функція розподілу $F(x)$ є безперервною функцією числового аргументу x .

Часто говорять, що оскільки величина збитку залежить від багатьох причин, то вона повинна мати так званий нормальний розподіл. Це твердження недостатньо коректне. Все залежить від способу взаємодії причин.

Якщо причини діють адитивно, викликані ними ефекти складаються, то, дійсно, у силу Центральної граничної теореми теорії ймовірностей має місце підстава застосовувати нормальний (гауссовий) розподіл.

Якщо ж причини діють мультиплікативно, виходить, викликані ними ефекти перемножуються, тоді в силу тої ж Центральної граничної теореми теорії ймовірностей варто наближати розподіл величини збитку X за допомогою логарифмічно нормального розподілу.

Якщо ж основний вплив робить «слабка ланка» – заздалегідь відомий набір параметрів, то відповідно до теорем, доведених академіком Б. В. Гнеденко, варто описувати зміну величини збитку X за допомогою розподілу із сімейства Вейбулла-Гнеденко. Можливе також використання двох інших типів граничних розподілів крайніх членів варіаційного ряду.

Розглянемо ситуацію, коли можлива величина збитку, пов'язаного з ризиком, описується функцією розподілу $F(x) = P(X < x)$.

Звичайно намагаються звести функцію, що залежить від великої кількості параметрів, до функції з мінімальним числом змінних, шляхом введення постійних величин, які прямо або побічно характеризують процес. Із цією метою для дослідження позитивної випадкової величини (величини збитку) часто розглядають такі її числові характеристики, як математичне очікування, медіана, квантілі, тобто значення $x = x(a)$, при яких функція розподілу досягає певного значення a . Інакше кажучи, значення квантіля $x = x(a)$ визначається з рівняння $F(x) = a$.

Крім того, використовуються такі числові характеристики випадкової величини, як дисперсія σ^2 , середньоквадратичне відхилення (квадратний

корінь із дисперсії, тобто σ), коефіцієнт варіації (відношення середньоквадратичного відхилення до математичного очікування), лінійна комбінація математичного очікування й середньоквадратичного відхилення (наприклад, правило трьох сигм), математичне очікування функції втрат і т.д. Тоді завдання оцінки збитку може зводитися до аналізу тієї або іншої з перерахованих вище характеристик.

Найчастіше оцінку проводять за емпіричними даними (за вибіркою величин збитків, яка відповідає аналогічним раніше випадкам). При відсутності емпіричного матеріалу варто використовувати експертні оцінки. Найбільш обґрунтованим є модельно-розрахунковий метод, який спирається на моделі управлінської, економічної, соціально-психологічної, еколого-економічної ситуації, що дозволяє розрахувати характеристики збитку.

Якщо модель ризику будується в термінах теорії нечітких множин, то ризик моделюється нечіткою множиною, а його оцінка – та або інша характеристика цієї множини так само нечітка множина.

Нехай $X = \{x\}$ – універсальна множина, тобто множина, яка охоплює всю проблемну область. Нечітка множина $A \subseteq X$ являє собою набір пар $\{(x, \mu^A(x))\}$, де $x \in X$ й $\mu^A : X \rightarrow [0,1]$ – функція приналежності, що являє собою деяку суб'єктивну міру відповідності елемента x нечіткій множині A .

Величина $\mu^A(x)$ може приймати значення від нуля, яке позначає абсолютну неприналежність, до одиниці, яке, навпаки, говорить про абсолютну приналежність елемента x нечіткій множині A . Іноді зручно розглядати значення $\mu^A(x)$ як ступінь сумісності елемента x з розмитим поняттям, представленим нечіткою множиною A . Часто нечітку множину $A \subseteq X$ і його функцію приналежності $\mu^A(x)$ розглядають як взаємозамінні поняття. Якщо множину $[0,1]$ замінити на $\{0,1\}$, то функція приналежності буде являти собою характеристичну функцію звичайної (не нечіткої) множини.

Опис ризику за допомогою ймовірнісних моделей на перший погляд відрізняється від опису за допомогою нечітких інтервальних моделей, оскільки вони по різному формалізують невизначеність. У теорії ймовірностей розглядається статистична невизначеність, наприклад, «ймовірність браку деталі дорівнює 0,1». Теорія нечітких множин націлена на роботу з лінгвістичною невизначеністю, наприклад, «висока частка браку». Причому остання називається лінгвістичною змінною, котра може приймати значення фраз із природної або штучної мови. Так, лінгвістична змінна «температура» може приймати значення «висока» і «низька». Фрази, значення яких приймає змінна, у свою чергу, є іменами нечітких змінних і описуються нечіткою множиною. Однак теорія нечітких множин може бути зведена до теорії випадкових множин і тим самим – до теорії ймовірностей.

Для оцінки значень невідомих змінних іноді зручно використовувати методи статистики інтервальних даних. З їх допомогою можна, наприклад, оцінити розмір інфляції. Ці методи добре підходять і для оцінки ризиків. У рамках інтервальної парадигми під ризиком для обраного критерію ефективності розуміється можливість одержання негативного результату, оцінюване числом r , яке може приймати значення від нуля до одиниці, тобто $0 \leq r \leq 1$. Поняття можливості аналогічне поняттю ймовірності, але не опирається на гіпотезу про випадковість і не припускає визначення щільності ймовірності на інтервалі невизначеності.

Таким чином, між процесом управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста й процесом управління ризиками можливості виникнення аварії на об'єкті інженерних мереж системи життєзабезпечення міста можна поставити знак рівності, тому що безпосереднє запобігання надзвичайній ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста покладається на ті самі структури. Це наочно демонструє наступна інформаційна модель підвищення ефективності

попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

3.5 Опис математичної моделі оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста

Основне завдання управління надзвичайною ситуацією – це зменшення ступеню небезпеки, яка виникає в процесі її розвитку. Однією з концепцій оцінки небезпеки або загрози є концепція ризику. Тут ризик варто розуміти як можливість настання подій з негативними наслідками, тобто можливість реалізації передбачуваної небезпеки. З такого погляду ефективність управління надзвичайною ситуацією оцінюється ступенем зменшення ймовірності настання негативних подій або наслідків від них за допомогою виконання певних заходів, які вимагають розумних затрат.

У випадках, коли існує невизначеність, апелюють до такого теоретичного поняття, як ймовірнісний розподіл можливих результатів (позитивних і негативних), тоді ризик буде мірою невідповідності між різними результатами рішень, які оцінюються через їх корисність, шкідливість, а також ефективність за критеріями відповідності, обраним оператором або керівником. Така концепція використовується в теорії прийняття рішень в умовах невизначеності, теорії ігор і т.п. Із цього погляду оцінка ефективності управління здійснюється за різницею дисперсій між очікуваними результатами й дійсними результатами.

За допомогою ризику оцінюється можливість небезпечних явищ. Під небезпечним розуміється таке явище (природне, техногенне, соціальне, економічне) у природі, техносфері, суспільстві, економіці, яке є результатом розвитку процесів, що приводять до формування в навколишнім середовищі негативних (шкідливих, вражаючих, несприятливих) впливів на населення,

об'єкти техносфери й природне середовище, що погіршує умови діяльності для соціально-економічних систем.

Люди й організації здійснюють свою повсякденну діяльність і відпочинок у рамках системи життєдіяльності. Елементами такої системи є самі люди, об'єкти, які викликають їх потреби, предмети потреби, норми моралі й правові акти, що регламентують поведінку людей і організацій при їх взаємовідносинах один з одним. Окремі інтереси людей (організацій) задовольняються в рамках окремих систем діяльності. Як система діяльності можуть розглядатися людина й сукупність об'єктів зовнішнього середовища, взаємодія яких забезпечує реалізацію певного інтересу людини. Процеси життєдіяльності та діяльності стосовно людей і організацій мають ряд властивостей, найважливішими з яких є небезпека та безпека.

Життєдіяльність людини відбувається у світі небезпек, які створюють загрозу для життя й здоров'я людини, при цьому деякі небезпеки безпосередньо негативно впливають на життєдіяльність людей. Інші небезпеки є звичайними для об'єктів техносфери й природного середовища, а на життєдіяльність людей впливають опосередковано через погіршення якості життя. Оскільки спектр інтересів людини постійно розширюється, то в межах сфери задоволення потреб виникають все нові джерела небезпеки для його життєдіяльності.

Протилежним поняттям небезпеки є безпека. Це може бути безпека людини як об'єкта негативних факторів навколишнього середовища (відпочиваючий на березі ріки, у яку відбувається скидання відходів), аспект безпеки людини як суб'єкта негативних наслідків, здатних завдати шкоди іншим людям (наприклад, водій бензовоза, який допустив його зіткнення з іншим автомобілем, у результаті чого загинули люди й відбулося забруднення навколишнього середовища нафтопродуктами), безпека людини стосовно внутрішнього середовища організму (елементарна гігієна кожного члена колективу, який працює на небезпечному виробництві), безпека самої

людини, її організму (наприклад, жорсткі правила одягання спецодягу й засобів захисту органів дихання перед входом у небезпечну зону).

Одержуємо, що, з одного боку, ризик – це можливість настання небезпечної події, яка порушує життєдіяльність людини, а з іншого боку – надзвичайна ситуація – це подія, що порушує повсякденну життєдіяльність людини.

Отже, з позицій загальної теорії управління й теорії ризику можна допустити, що об'єкти ризику одночасно є об'єктами управління надзвичайною ситуацією, тоді рівень ризику можна застосовувати як оцінку управління надзвичайною ситуацією на кожному етапі її розвитку.

Варто відмітити, що залежно від можливості формалізації завдання й наявної вихідної інформації можуть бути використані кількісні показники ризику, наприклад, ймовірність настання катастрофічної події, або якісні, коли відсутня можливість кількісних оцінок, при цьому говорять, що рівень ризику знижується або збільшується.

По суті структури охорони, безпеки або фізичного захисту конкретного об'єкта повинні протистояти системі терористичного вторгнення на об'єкт. Від того наскільки ефективно ці структури здатні вчасно виявити підготовлену акцію й протистояти їй – залежить захищеність і цілісність об'єкта, що охороняється.

Складовою технічною частиною структур охорони, безпеки або фізичного захисту є комплексна система безпеки, яка являє собою організаційно-технічну систему, яка складається з алгоритмічно об'єднаних систем, що забезпечують захист об'єкта від загроз різної природи. До складу цієї системи входять сигналізаційні рубежі, фізичні бар'єри, персонал контролерів контрольно-пропускних пунктів, стаціонарних і мобільних постів відео й аудіо спостереження, оператори центрального пульта управління.

Головний принцип побудови будь-якої системи забезпечення безпеки – це превентивність. Стосовно до систем структур охорони, безпеки або

фізичного захисту об'єкта реалізація цього принципу означає, що чим раніше буде виявлена загроза вторгнення на об'єкт, і чим швидше вона буде усунута, тим ефективніше працює система. Інакше кажучи, своєчасність виявлення ознак підготовки терористичного акту при відео й аудіо контролі виробничих приміщень є ключовою характеристикою, яка і визначає ймовірність виявлення зловмисників.

При побудові й оцінці ефективності системи структур охорони, безпеки або фізичного захисту існує два полярних підходи. Перший передбачає введення в систему великого штату сил охорони й розробку організаційних заходів, при цьому основний натиск робиться на людський фактор. Другий підхід, навпаки, полягає в максимальному використанні технічних засобів, а сили охорони застосовуються, в основному, для припинення дій порушників або зловмисників. Безумовно, оптимальне рішення носить проміжний характер між цими двома підходами.

Крім того, на кожному об'єкті інженерних мереж життєзабезпечення міста розробляються сценарії можливих аварій, в яких враховуються майже всі існуючі (прогнозні) небезпеки. Це значення є стандартною ймовірністю виявлення ознак виникнення аварії $P_{ст}$ у контрольованому приміщенні, будівлі й на всьому об'єкті та характеризує ефективність роботи структур охорони, безпеки або фізичного захисту по запобіганню або управлінню надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста.

У реальній обстановці, залежно від часу доби (ранок, день, ніч, вечір), пори року (зима, весна, літо, осінь), організаційних тимчасових змін (відпустка, хвороба, сімейні обставини) і постійних (прихід нових керівників, зміна штатного розкладу), природних і штучних факторів (дощ, гроза, прорив водопроводу або каналізації, знеструмлення) частина пристроїв відео й аудіо спостереження можуть тимчасово не виконувати свої функції внаслідок виходу з ладу. Це може призвести до зміни (зменшення) ймовірності виявлення ознак настання аварії. Отримане нове значення ймовірності

виявлення ознак настання аварії позначимо $P_{\text{тек}}$. Зменшення цієї ймовірності в порівнянні зі стандартною буде свідчити про зменшення ефективності роботи структур охорони, безпеки або фізичного захисту по запобіганню або управлінню надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста.

Коли вжитими заходами будуть відновлені засоби відео й аудіо контролю, відповідно поточне значення ймовірності виявлення зростає. Це буде говорити про те, що ефективність роботи структур охорони, безпеки або фізичного захисту по запобіганню або управлінню надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, зростає. Внаслідок вище сказаного ефективність управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, може оцінюватися як різниця значень поточних і стандартних ймовірностей виявлення ознак виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, тобто

$$P_{\text{эф}} = P_{\text{тек}} - P_{\text{ст}}. \quad (3.10)$$

При цьому новим окремим критерієм оцінки ефективності управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста є ймовірність виявлення ознак аварії, в певних стандартних умовах, передбачених сценарієм розвитку, який дозволяє структурам охорони, безпеки або фізичного захисту вчасно реагувати й запобігати. Ефективність управління ситуацією в поточний момент часу визначається різницею значень поточних і стандартних ймовірностей виявлення ознак виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Величина цієї різниці буде вказувати на позитивний або негативний ефект управління.

Для визначення ефективності управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста необхідно охарактеризувати особливості виявлення ознак настання аварії за допомогою технічних засобів, розглянутих у розділі 2 роботи.

Раніше було визначено, що ефективність управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста може оцінюватися як різниця значень поточних і стандартних ймовірностей виявлення ознак настання аварії (3.10).

Ймовірність виявлення ознак настання надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, як безрозмірна величина, визначається відношенням площі, контрольованої моніторинговими системами S_{V-A} , до загальної площі об'єкту або території S_o : $\left(\frac{S_{V-A}}{S_o} \right)$. Тоді ймовірність виявлення ознак аварії, обумовлена планами управління або сценаріями розвитку надзвичайної ситуації, буде величиною $\left(\frac{S_{V-A}}{S_o} \right)_{CT}$, а поточне значення, обумовлене фактичною роботою моніторингових пристроїв, як $\left(\frac{S_{V-A}}{S_o} \right)_{TE}$. Виходячи з вище викладеного, значення поточних і стандартних ймовірностей виявлення ознак виникнення та розвитку надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, будуть відповідно рівні:

$$P_{\text{тек}} = \sum_N \left(\frac{S_{V-A}}{S_o} \right)_{TE}, \quad (3.11)$$

$$P_{\text{ст}} = \sum_N \left(\frac{S_{V-A}}{S_o} \right)_{CT}, \quad (3.12)$$

де N – загальне число потенційних вузлів небезпеки на території об'єкту інженерних мережах систем життєзабезпечення міста.

Ефективність управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, в цьому випадку буде дорівнювати:

$$P_{\text{эф}} = \sum_N \left(\frac{S_{V-A}}{S_O} \right)_{TE} - \left(\frac{S_{V-A}}{S_O} \right)_{CT}. \quad (3.13)$$

Таким чином, математична модель оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста є різницею двох значень ймовірностей. Перша – поточне значення ймовірності виявлення ознак виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Друга – стандартне значення ймовірності, отримане для типового сценарію розвитку подій.

Висновки за третім розділом

1. Швидке наростання потоку різномірної інформації і ступеня невизначеності середовища призводять до ускладнення внутрішніх взаємозв'язків системи управління мегаполісом, функціонування якого ускладнюється наявністю та високим рівнем концентрації потенційно небезпечних промислових об'єктів на відносно невеликій території та пов'язано із додатковими підвищеними ризиками.

2. Особливості управління техногенною безпекою мегаполісу дозволяють визначити основні етапи процесу попередження надзвичайної

ситуації техногенного характеру в загальній концепції управління техногенною безпекою, зокрема прогнозувати основні параметри небезпеки можливої техногенної надзвичайної ситуації.

3. Просторово-часовий ряд даних R_s формує результати спостережень за аваріями елементів інженерної мережі як складної технічної системи, що є просторово-розподіленою і подається скінченою дискретною множиною ланок.

4. Між процесом управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста й процесом управління ризиками можливості виникнення аварії на об'єкті інженерних мереж системи життєзабезпечення міста можна поставити знак рівності, тому що безпосереднє запобігання надзвичайній ситуації техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста покладається на ті самі структури. Це наочно демонструє наступна інформаційна модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

5. Математична модель оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, є різницею двох значень ймовірностей. Перша – поточне значення ймовірності виявлення ознак виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Друга – стандартне значення ймовірності, отримане для типового сценарію розвитку подій.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ

Вирішувати четверте завдання наукового дослідження щодо розробки методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що виникають внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, будемо наступним чином. Спочатку сформуємо інтегральну оціночну функцію важкості надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Далі розглянемо алгоритм практичної реалізації методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. На завершення надамо опис процедур реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст.

4.1 Формування інтегральної оціночної функції важкості надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення

У розділі 3 було розглянуто місце етапу попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру в загальній концепції управління

техногенною безпекою, зокрема прогнозування параметрів можливої ТНС, що передбачає управління процесами розвитку інженерної інфраструктури великих міст.

У свою чергу, функціями етапу прогнозування (планування) є:

- оцінка таких параметрів ТНС, як локація ТНС у межах мегаполіса, частота виникнення ТНС, тип ТНС;
- оцінка ступеню тяжкості можливої ТНС (рівень збитків, кількість постраждалих тощо);
- організація (координація) ресурсозабезпечення, що включає визначення необхідних обсягів ресурсів та організація процесу надходження ресурсів;
- контроль (моніторинг) перебігу ТНС, тобто функція зворотного зв'язку;
- регулювання ресурсів, тобто дії, що вживаються для корекції виявлених відхилень.

В подальшому основна увага приділятиметься першим двом функціям прогнозування.

При цьому необхідно враховувати невизначеність зовнішнього та внутрішнього середовища її функціонування, зокрема можливість виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на інфраструктурних об'єктах.

ТНС розглядається як заявка на обслуговування територіальною системою техногенної безпеки. Таким чином, територіальна система техногенної безпеки може виступати як система масового обслуговування [172, 173]. Причиною ТНС вважаються випадкові та поступові відмови обладнання інженерної інфраструктури мегаполіса.

В даному дослідженні в якості середовища виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру розглядається множина інженерних мереж систем життєзабезпечення, а саме систем водо-, теплопостачання та

водовідведення.

За таких вихідних положень інформація щодо параметрів можливої ТНС, що є кортежем I вигляду:

$$I = \langle v, \{\lambda(t), \beta(x,y)\}, \tau, \mathfrak{Z}, \mathfrak{R} \rangle, \quad (4.1)$$

перетворюється до кортежу

$$I = \langle v, \{\lambda(t), \beta(x,y)\}, \tau, \mathfrak{R} \rangle, \quad (4.2)$$

де вилучений параметр $\mathfrak{Z}$ – «тип можливої ТНС», оскільки цей параметр вже є заданим.

Відповідно, при прогнозуванні можливої ТНС, що розглядається, необхідно задавати:

- $\lambda(t)$, $\beta(x,y)$ – параметри законів розподілу моментів та локації виникнення ТНС відповідно;
- $v=(x,y)$ – вектор параметрів локації можливої ТНС у межах міської забудови;
- моменти τ виникнення ТНС;
- рівень $\mathfrak{R}$ тяжкості ТНС, що теж є випадковою величиною.

Таким чином, необхідно проводити формалізацію просторово-часового поля подій виникнення ТНС на інженерній інфраструктурі мегаполісу.

У розділі 3 було визначено основну парадигму моделювання, що застосовується в даній роботі, а саме дискретно-подієве моделювання.

Дискретно-подієве моделювання є різновидом імітаційного комп'ютерного моделювання.

Комп'ютерна імітація дозволяє досліджувати модель як в певні

моменти часу, так і протягом тривалих періодів часу. Для знаходження стійких рішень при чисельному статистичному моделюванні потрібно його багаторазове відтворення, при якому проводиться імітація впливу численних випадкових факторів на різні елементи моделі, з подальшою статистичною обробкою.

Кожний вплив на процес в моделі представляється у вигляді «розіграшу» випадкового явища за допомогою процедури, яка дає випадковий результат. Множина таких реалізацій в ході одного варіанту імітації дає одну реалізацію (історію) процесу. На завершальному етапі обчислюються середні статистичні показники по багатьом історіям [174, 175].

Основний об'єкт дискретно-подієвого моделювання – це заявка на обслуговування. «Переміщуючись» за моделлю, заявки стають в чергу до багатоканальних пристроїв, захоплюють і звільняють ці пристрої обслуговування тощо.

Аналітичні результати для великої кількості часних випадків таких моделей розглядаються в теорії масового обслуговування.

Для кожного з експериментів, які проводяться в рамках парадигми дискретно-подієвого моделювання протягом деякого періоду модельного часу та інтерпретуються як ітераційний процес, необхідно визначити інтегральну оціночну функцію результатів.

В даній дисертаційній роботі на кожній ітерації імітаційного моделювання підраховуються сумарні витрати, тобто визначається величина Z збитків (табл. 4.1).

Відповідно, в якості оцінок рівню складності аварії згідно Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру [176] в залежності від масштабів шкідливого впливу на довкілля (об'єктовий, місцевий, регіональний, державний), приймаються такі збитки:

Таблиця 4.1 – Основні (обов’язкові) види збитків, характерні для різних рівнів ТНС [128]

Типи ТНС	Рівень ТНС			
	об’єктовий	місцевий	регіональний	державний
Аварії на комунальних системах життєзабезпечення	$M_p, H_p, M_{п}, V_{\phi}$	$M_p, H_p, M_{п}, V_{\phi}, Z_{\phi}$	$M_p, H_p, M_{п}, V_{\phi}, Z_{\phi}, P_{p/г}, P_{рек}$	$M_p, H_p, M_{п}, V_{\phi}, Z_{\phi}, P_{p/г}, P_{рек}$
Аварії на об’єктах електроенергетики	$M_p, M_{п}$	$M_p, M_{п}$	M_p, H_p	M_p, H_p

• для водо-, теплопровідних мереж та мереж водовідведення оцінка Z збитків або вартості витрат має вигляд:

$$Z^W = H_p + M_p + M_{п} + V_{\phi} + Z_{\phi} + P_{рек}, \quad (4.3)$$

• тоді як для електричних мереж ця формула виглядає наступним чином:

$$Z^E = H_p + M_p + M_{п}, \quad (4.4)$$

де H_p – оцінка втрат життя та здоров’я населення; M_p – руйнування та пошкодження основних фондів, знищення майна та продукції; $M_{п}$ – невироблення продукції внаслідок припинення виробництва; V_{ϕ} – забруднення поверхневих і підземних вод та джерел; Z_{ϕ} – забруднення земель несільськогосподарського призначення; $P_{рек}$ – знищення або погіршення якості рекреаційних зон.

В залежності від рівню, типу та виду НС в Методиці [176] визначаються основні види збитків. Так, збитки, які необхідно обов’язково розраховувати, наведені в табл. 4.1 [177].

Кожна з оцінок $\{H_p, M_p, M_n, B_\phi, Z_\phi, P_{рек}\}$ за Методикою [176] має чітко визначений кількісний вигляд, у документі наведені кінцеві формули, що уможливають безпосереднє застосування математичного апарату Методики [176] в цілому.

Приймаючи до уваги, що основні розрахункові формули Методики [176] наведені в абсолютному вигляді і розглядаючи наявну просторово-розподілену статистику щодо аналогічних ТНС у прийнятному проміжку часу або застосовуючи експертні оцінки, можна виділити діапазон зміни значень критеріїв Z_W, Z_E :

$$Z^W \in [Z_{\min}^W, Z_{\max}^W], \quad Z^E \in [Z_{\min}^E, Z_{\max}^E], \quad (4.5)$$

або в нормованому вигляді:

$$\overline{Z^W} = \frac{Z^W - Z_{\min}^W}{Z_{\max}^W - Z_{\min}^W}, \quad \overline{Z^E} = \frac{Z^E - Z_{\min}^E}{Z_{\max}^E - Z_{\min}^E}, \quad (4.6)$$

$$\overline{Z^W} \in [0,1], \quad \overline{Z^E} \in [0,1],$$

що стане у пригоді при подальшому розгляді.

При цьому, проводячи аналіз алгоритму розрахунків Методики [176], необхідно зауважити, що основні формули наведені в абсолютному вигляді, не прив'язані до показників, що динамічно змінюються, та є основними для розрахунку інших видів виплат, а саме до розміру мінімальної заробітної плати, або до розміру неоподаткованого мінімуму доходів громадян або до інших.

Таким чином, виходячи з вищенаведеного, а також на основі результатів попередніх досліджень, проблема визначення збитків від

наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру є далекою до вирішення як в сенсі уніфікації методів та підходів до оцінки збитків (усереднюючий, синтетичний, прямого дослідження), врахування як прямих, так і непрямих збитків, так і в сенсі відсутності єдиної методології збирання світових даних про збитки від надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

4.2 Алгоритм практичної реалізації методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення

В рамках дисертаційного дослідження розвинуто кілька підходів до побудови моделі просторово-часового ряду R_S за складовими кортежу I , які можуть застосовуватися як незалежно один від одного, так і сумісно.

Аналіз математичної моделі (3.14) показує, що її розгляд необхідно розвивати у тривимірному просторі: (x, y, τ) .

Проведемо декомпозицію задачі за ендегенними змінними (x, y, τ) , тобто за змінними (x, y) , що визначають локацію аварії на інженерних мережах як джерела ТНС, і за змінною часу, та наведемо алгоритм визначення просторових параметрів математичної моделі (3.14).

Першим кроком алгоритму визначення просторових параметрів методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення є наступний:

Крок 1. Моделювання параметрів вектору $v=(x, y)$ локації можливої ТНС у межах міської забудови як складових просторово-часового ряду R_S . Цей етап містить:

Крок 1.1. Вирішення задачі просторового оцінювання.

Проведемо моделювання просторових параметрів – вектору $v=(x,y)$ – багатовимірною рядом R_s у певному часовому перерізі часового параметру τ :

$$\tau = \tau_{\text{const}}. \quad (4.7)$$

Перш за все розглянемо так звані проекційний та інтегральний підходи, які дозволяють застосувати дуальну методологію щодо визначення просторових параметрів просторово-часового ряду R_s .

Як проекційний, так і інтегральний підходи спираються на постановку та вирішення задачі просторового оцінювання, методику розв'язання якої запропоновано в роботах [178, 179].

Розглянемо ці підходи щодо моделювання місця, часу і рівня тяжкості НС послідовно.

У загальному вигляді постановка задачі просторового оцінювання передбачає наявність неперервної двовимірної області D , на якій проведений ряд вимірювань заданої величини Z . Ці вимірювання проводяться на скінченній множині точок $(x, y) \in D$, які є довільним чином розподіленими по області D .

За постановкою задачі необхідно враховувати дискретність області D , яка, власне, перетворюється у множину G (рис. 4.1).

Для моделювання просторової складової ряду, що розглядається, проводиться розбиття контрольованої території D (відповідно, мережі G) сіткою вимірів на осередки.

У геостатистиці застосовують різні засоби побудови сітки вимірів:

- триангуляція Делоне [179], що визначається системою трикутників з вершинами в точках вимірів, ребрами, що не перетинаються та мінімальною кількістю тупокутних трикутників;

- полігони Вороного або, як їх ще називають, розбиття Тиссена, комірки Діріхле у області впливу. Полігон Вороного P_i , побудований для точки вимірів x_i , характеризується тим, що містить лише ті та тільки ті точки, відстань від яких до точки x_i менша або дорівнює відстані до будь-якої іншої точки вимірів x_j діаграми Вороного;
- стандартна прямокутна (регулярна) сітка, яка використовується у подальшому етапі.

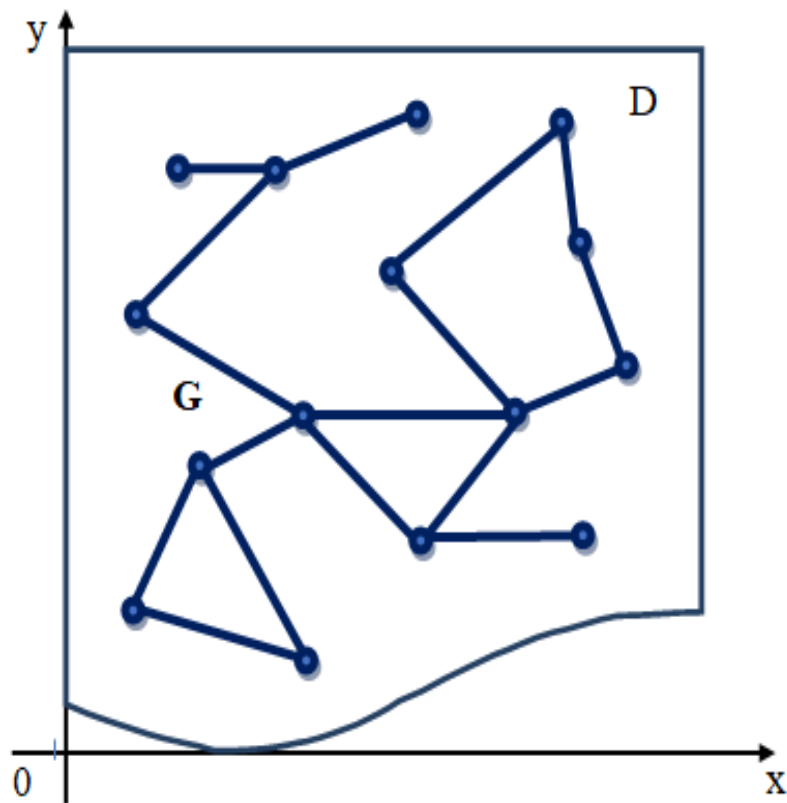


Рисунок 4.1 – Множина G – область визначення параметрів (x, y)

При цьому виникає ефект просторової роздільної здатності, тобто задача визначення адекватного розміру осередку $(\Delta x, \Delta y)$ (рис. 4.2).

При використанні стандартної прямокутної сітки просторова роздільна здатність характеризується розміром комірки $\{(a_s, b_w), (a_{s+1}, b_{w+1})\}$:

$$\Delta x = |a_{s+1} - a_s|, \Delta y = |b_{w+1} - b_w|, s = 1, 2, \dots, S, w = 1, 2, \dots, W. \quad (4.8)$$

В цілому область D є вписаною у прямокутник $\{(a_0, a_S), (b_0, b_W)\}$.

Геометричні параметри ланок мережі G визначаються таким чином: складова gI_j задає ланку мережі, що належить осередку регулярної сітки.

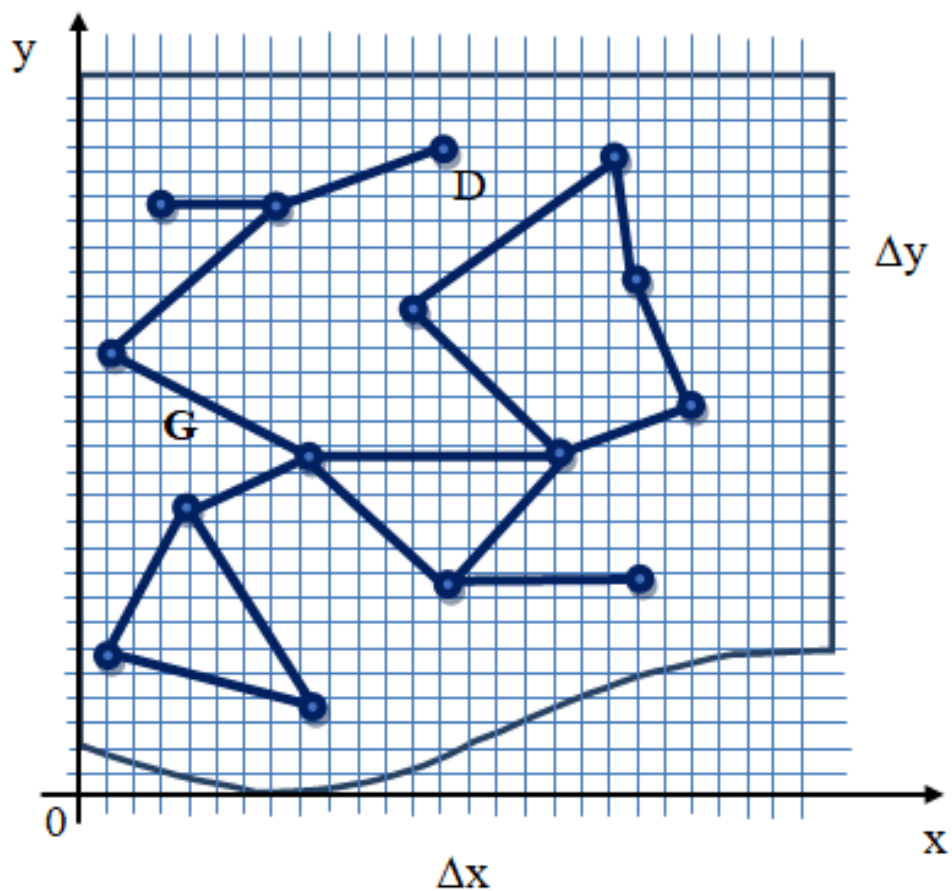


Рисунок 4.2 – Нанесення прямокутної сітки на область D

$$Ab_i = \{(a_s, b_w), (a_{s+1}, b_{w+1})\}, \quad (4.9)$$

так, що індекс i є функцією індексів $\{s, w\}$:

$$gI_i = G \cap ab_i. \quad i = f\{s, w\}, \quad v_i \leftrightarrow ab_i. \quad (4.10)$$

Тоді параметри розміщення (x_{i-1}, y_{i-1}) g_i -ї ланки множини G пов'язуються з лівою нижньою точкою ланки в межах обраного дискрету.

Відповідно, початкове подання мережі G уточнюється стосовно розбиття сіткою вимірів, і складова g_i кортежу (4.2) у загальному випадку є множиною, тобто є мультиланкою.

Однак цей спосіб визначення геометричних параметрів ланок множини G має певні недоліки, які необхідно враховувати при виборі кроку дискретизації.

Завеликий крок формує дискрет $(\Delta x, \Delta y)$, що містить кілька ланок множини G з принципово різними характеристиками, замалий крок може завдати невиправдано великих втрат часу опрацювання моделі.

На даній сітці вибудовується $S \times W$ – вимірна випадкова функція $Z(v)$ (2.3) з функцією розподілу

$$F(v_1, v_2, \dots, v_{S \times W}, z_1, z_2, \dots, z_{S \times W}) = P\{Z(v_1) \leq z_1, Z(v_2) \leq z_2, \dots, Z(v_{S \times W}) \leq z_{S \times W}\}, \quad (4.11)$$

у кожному часовому перерізі τ , яка характеризує просторову ймовірність реалізації елемента ряду та визначається як набір випадкових змінних $Z(v_i)$, по одній для кожної локації $v_i, i=1,2,\dots, S \times W$, області D .

На основі вирішення задачі просторового оцінювання розглянемо проекційний та інтегральний підходи до прогнозування параметрів просторово-часового ряду R_s .

Крок 2 реалізує проекційний підхід. Передбачає незалежне визначення випадкових параметрів (x, y) розміщення аварійних ланок інженерної інфраструктури як послідовності двох одновимірних рівномірних розподілів $\{x\}, \{y\}$.

Отже, маємо певну двовимірну область (територію) D , на якій проведений ряд вимірювань шуканої величини Z . Ці вимірювання проведені

на скінченій множині точок $(x, y) \in S$, які є довільним чином розподілені по області S . Множина точок (x, y) має назву мережі моніторингу.

Дані вимірювань за своєю суттю є дискретними та просторово неоднорідними.

Відповідно, при моделюванні сценарію розвитку ТНС, вважаючи просторові координати (x, y) умовно неперервними величинами, можна прийняти гіпотезу щодо рівномірного розподілу просторових координат локації ТНС на інтервалах $\{(a_0, a_S), (b_0, b_W)\}$ із функціями розподілу:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_0, \\ \frac{x-a_0}{a_S-a_0}, & a_0 < x \leq a_S; \\ 1, & x > a_S \end{cases} \quad (4.12)$$

$$F(y) = \begin{cases} 0, & y \leq b_0, \\ \frac{y-b_0}{b_W-b_0}, & b_0 < y \leq b_W; \\ 1, & y > b_W \end{cases} \quad (4.13)$$

відповідно. В результаті двократного застосування процедур генерації випадкових величин за розподілами (4.2) отримується пара просторових координат (x_v, y_v) .

Рівномірні розподіли $F(x)$, $F(y)$ (3.1) концептуально є розподілами неперервних випадкових величин $\{x\}$, $\{y\}$, тому в проекційному підході на першому етапі сітка оцінювання не є обов'язковою.

Якщо просторові координати (x_v, y_v) не є точкою певної ланки мережі життєзабезпечення, але належать певній комірці оціночної сітки, необхідно продовжити аналіз та знайти номер (ідентифікатор) і цієї ланки як розв'язок оптимізаційної задачі вигляду:

$$i = \arg \min_i \text{Pr}_i(x_v, y_v), \text{ де } (x_v, y_v) \in \{(a_k, b_m), (a_{k+1}, b_{m+1})\}. \quad (4.14)$$

Далі розглянемо теоретичні засади управляючого алгоритму формування часової складової методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення. Перш за все продовжимо дослідження проекційного підходу. Як показано в розділі 3, параметри значної частини інженерних мереж систем життєзабезпечення міста як складної технічної системи відповідають періоду старіння. На даному етапі життєвого циклу технічних систем особливе значення набувають систематичні відмови, обумовлені закономірними і неминучими явищами, що викликають поступове накопичення ушкоджень, втому, зношення обладнання.

Тому на першому кроці управляючого алгоритму формування часової складової імітаційної моделі надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення в якості розподілу моментів настання ТНС визначено нестационарний пуассонівський потік числа k випадкових відмов протягом періоду t вигляду:

$$P_{\theta}(t, t_H) = \frac{\eta(t, t_H)^{\theta}}{k!} e^{-\eta(t, t_H)} \quad (4.15)$$

Замінімо функцію інтенсивності систематичних відмов $\lambda_{\text{сист}}(t)$ на інтервалі $[t_H, t]$ кусково-постійною функцією, приймаючи в якості інтервалів розбиття термін 5 років.

З кожною ланкою інженерної мережі пов'язана інформація про термін та умови її експлуатації. Тому завдання номеру i ланки системи життєзабезпечення визначає значення параметру $\lambda(t)$ – нестационарного розподілу Пуассона моментів настання τ_k ТНС в залежності від вищезазначених параметрів та урахуванням.

Рівень $\mathfrak{R} \in \{Z^E, Z^W\}$ тяжкості ТНС є випадковою функцією, що в

нормованому вигляді приймає значення в інтервалі $[0, 1]$.

В термінах імітаційної моделі рівень $\mathfrak{R}$ збігається із величиною $Z(v, \tau)$, що є зваженою зростаючою функцією інтенсивності $\lambda(t)$.

На другому кроці управляючого алгоритму формування часової складової методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення реалізується інтегральний підхід.

Дана концепція містить побудову точок-генераторів, потужність яких (характеристика складності аварії) визначається на основі реалізації підходу порівнювальної статистики з так званим накопичувальним ефектом у межах певного часу.

Даний підхід оснований на використанні побудованої раніше регулярної сітки $\{(a_k, b_m), (a_{k+1}, b_{m+1})\}$, просторова роздільна здатність якої характеризується розміром комірки (рис. 4.3).

Введемо наступні визначення.

Назвемо точкою-генератором $\mathbf{v}_n$ – певну точку комірки $\{(a_k, b_m), (a_{k+1}, b_{m+1})\}$ регулярної сітки території S таку точку, яка інкапсулює в собі властивості цілої комірки.

Наприклад, це може бути точка перетину діагоналей комірки $\{(a_k, a_k), (b_k, b_k)\}$.

Назвемо потужністю $\mathfrak{G}_n$ точки-генератору $\mathbf{v}_n$ – інтегральну характеристику, що розглядається в певному часовому інтервалі (часовому вікні) $[T_0, T_F]$ та обчислюється за формулою:

$$\mathfrak{G}_n = \int_{T_0}^{T_F} \int_{b_m}^{b_{m+1}} \int_{a_k}^{a_{k+1}} \varpi(x, y, t) dx dy dt, \quad (4.16)$$

де функція $\varpi(x, y, t)$ приймає значення $(0,1)$, де $\varpi(x, y, t)=0$, якщо в момент

часу $t \in [T_0, T_F]$, в точці $(x, y) \in \{(a_k, a_k), (b_k, b_k)\}$ аварію на мережах життєзабезпечення не зареєстровано, та $\varpi(x, y, t) = 1$ в іншому випадку.

Потужність ϑ_n є характеристикою важкості можливої ТНС на інженерних мережах.

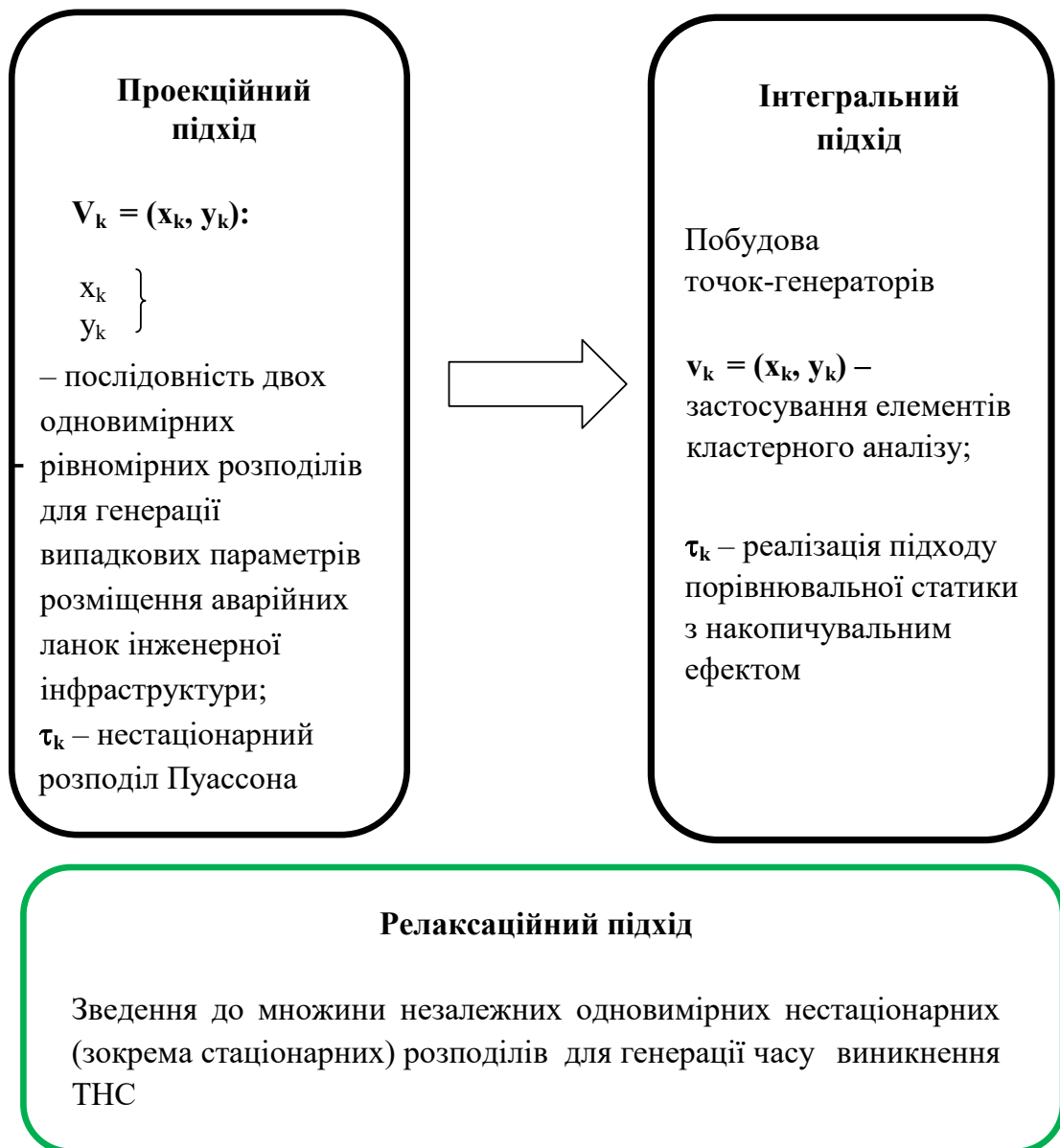


Рисунок 4.3 – Загальна схема управляючого алгоритму методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення

Визначення точок-генераторів проводиться із застосуванням кластерного аналізу із визначенням розміру кластеру з точністю проекційного підходу, а саме (2–5) % від максимального лінійного розміру контрольованого району.

Відповідно можна побудувати апроксимаційну поверхню вигляду:

$$u(x,y, \varepsilon) = f(x,y) + \varepsilon, \quad (4.17)$$

де $f(x,y) = \tilde{u}$ – трендова (невипадкова) складова функції координат; ε – випадкова змінна.

Відповідно головним завданням вивчення просторових закономірностей є опис невідповідної компоненти $f(x,y) = \tilde{u}$ на основі реалізації підходу порівнювальної статистики з так званим накопичувальним ефектом.

При цьому покладаємо, що всі точки відповідної комірки сітки вимірів мають потужність ϑ_n точки-генератору v_n .

Зауважимо, що потужність ϑ_n залежить від довжини часового вікна $[T_0, T_F]$.

При реалізації інтегрального підходу інтервал спостережень становив рік. В рамках даного дослідження інтенсивність ліквідації надзвичайної ситуації техногенного характеру покладалась однаковою для всіх точок-генераторів.

Таким чином, алгоритм практичної реалізації методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення складається з двох етапів, а саме – етапу визначення просторових параметрів та етапу формування часової складової методики, що у загальному сенсі дозволяє поєднати проекційний, інтегральний та релаксаційний підходи.

4.3 Опис процедур реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст

Методика попередження НС техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення призначений для попередження виникнення небезпечних станів, таких як забрудненого приземного шару атмосфери, землі та поверхневих вод, виникнення безпосередньої загрози життю людей уражальними чинниками джерела небезпечної ситуації (аварії), припинення експлуатації інженерних мереж систем життєзабезпечення.

Застосування методики попередження НС техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення передбачає виконання наступних шести процедур:

Процедура 1. Обґрунтування та визначення форматів вихідних (вхідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення;

Процедура 2. Інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення, засобів і сенсорів для визначення місць та характеру пошкоджень інженерних мереж (напірних трубопроводів водопостачання у випадку розгляду інженерних мереж водопостачання), дефектів експлуатаційного характеру, а також методичного та метрологічного забезпечення вимірів;

Процедура 4. Організаційно-технічна реалізація розробленої імітаційної моделі аварії на інженерній мережі як джерела можливої ТНС;

Процедура 5. Програмно-апаратна реалізація інформаційної моделі та методики на її основі, організаційно-технічне обґрунтування ймовірності виникнення аварії та ступеню її важкості;

Процедура 6. Обґрунтування відповідних управлінських рішень, спрямованих на попередження НС техногенного характеру внаслідок аварій

на інженерних мережах систем життєзабезпечення, шляхом зниження ймовірності або недопущення аварії, а також створення передумов мінімізації часу та необхідного ресурсного забезпечення етапів локалізації та ліквідації аварії на інженерних мережах.

Випадковий потік подій є розподіленим як у часі, так і у просторі. Необхідно також звернути увагу на необхідність урахування кількох джерел, які зумовлюють відмови обладнання, що в цілому порушує вимогу ординарності процесу.

В рамках реалізації 4-ї процедури методики попередження НС техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення розглянемо ще один перспективний підхід визначення локації виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій визначених типів в умовах мегаполісу, а саме релаксаційний підхід (рис.4.3), що базується на зведенні двовимірної імітаційної моделі визначення міста локації можливої ТНС до множини незалежних одновимірних нестационарних (зокрема стаціонарних) розподілів для генерації часу виникнення ТНС.

Узагальнено цей підхід складається з двох етапів.

На першому етапі розглядається мережа водогонів мегаполіса, що представляє собою множину ланок $G = \{g_1, g_2, \dots, g_l\}$. На множині G формуються кластери множини ділянок мереж водопостачання за терміном введення в експлуатацію. Крок h розбиття обирається у 5 років. В результаті одержуємо множину $K = \{K_1, \dots, K_M\}$ кластерів ділянок мережі, кожен з яких – K_m – в загальному випадку геометрично є незв'язною множиною. Елементи k_m^n певного кластеру $K_m = \{k_m^1, \dots, k_m^n, \dots, k_m^{N_m}\}$ у подальшому вважаються джерелами (генераторами) ТНС однакової тяжкості.

Більш того, для елементів кластеру K_m фіксується параметр розподілу Пуассона $\eta(t, t_H)$, тобто потік моментів настання ТНС на ланках мережі певного кластеру приймається стаціонарним.

На рис. 4.4 наведений приклад кластеризації мережі водопостачання району м. Харкова, де елементи кластерів мережі водопостачання виділені різними кольорами.



Рисунок 4.4 – Кластеризація множини ланок мережі водопостачання

Другий етап підходу реалізації імітаційної моделі на базі релаксаційного підходу містить кроки створення так званого імітаційного симулятора, що генерує певну кількість випробувань – тобто реалізацій ТНС.

Вважаємо, що результат випробування є складною подією: можуть виникнути ТНС на різних кластерах мережі одночасно (наприклад, протягом тижня – одиницю виміру часу обирає особа, що приймає рішення).

Таке припущення щодо урахування кількох джерел настання подій в цілому, як зазначалось, порушує вимогу ординарності процесу, тому для подальшого моделювання застосовується наступний підхід.

Позначимо через A_m – подію настання ТНС на кластері K_m у одиницю часу, відповідно $\bar{A}_m$ – подію ненастання ТНС на кластері K_m .

На цій основі визначимо повну дискретну множину Q несумісних подій вигляду

$$Q = \left\{ \prod_{m=1}^M A_m, \bar{A}_1 \prod_{m=2}^M A_m, \dots, \bar{A}_M \prod_{m=1}^{M-1} A_m, \right. \\ \left. \bar{A}_1 \bar{A}_2 \prod_{m=3}^M A_m, \dots, A_M \prod_{m=1}^{M-1} \bar{A}_m, \prod_{m=1}^M \bar{A}_m \right\}. \quad (4.18)$$

При цьому кількість елементів множини Q – $\text{card } Q = \Theta$.

Для кожного елементу множини (4.18) визначимо ймовірність p_θ реалізації відповідної складної події q_θ , $q_\theta \in Q$, $\theta = 1, 2, \dots, \Theta$. Наприклад,

$$q_1 = \prod_{m=1}^M A_m, \quad q_2 = \bar{A}_1 \prod_{m=2}^M A_m \text{ і так далі.}$$

Під час практичної реалізації ймовірності p_θ реалізації несумісних подій q_θ (4.18) відкладаються на одиничному відрізку. Генерується рівномірно розподілене на $[0, 1]$ випадкове число ξ і перевіряється умова:

$$\sum_{\mu=1}^{\theta-1} p_\mu \leq \xi \leq \sum_{\mu=1}^{\theta} p_\mu. \quad (4.19)$$

За виконання умови (4.19) вважають, що в процесі випробування настала подія q_θ з множини (4.18). За умови нормування за часом обсягу збитків, що генеруються при реалізації ТНС на інженерних мережах, визначається загальний обсяг збитків в даному випробуванні.

Після виконання заданої кількості випробувань визначаються середні (сумарні) характеристики експерименту, що є підґрунтям для прогнозної оцінки

готовності територіальної системи техногенної безпеки до обслуговування прогнозованої множини ТНС на заданому горизонті планування.

Практична реалізація 5-ї процедури методики попередження НС техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення передбачає створення відповідного програмно-апаратного комплексу. Основні складові такого комплексу показані на рис. 4.5.

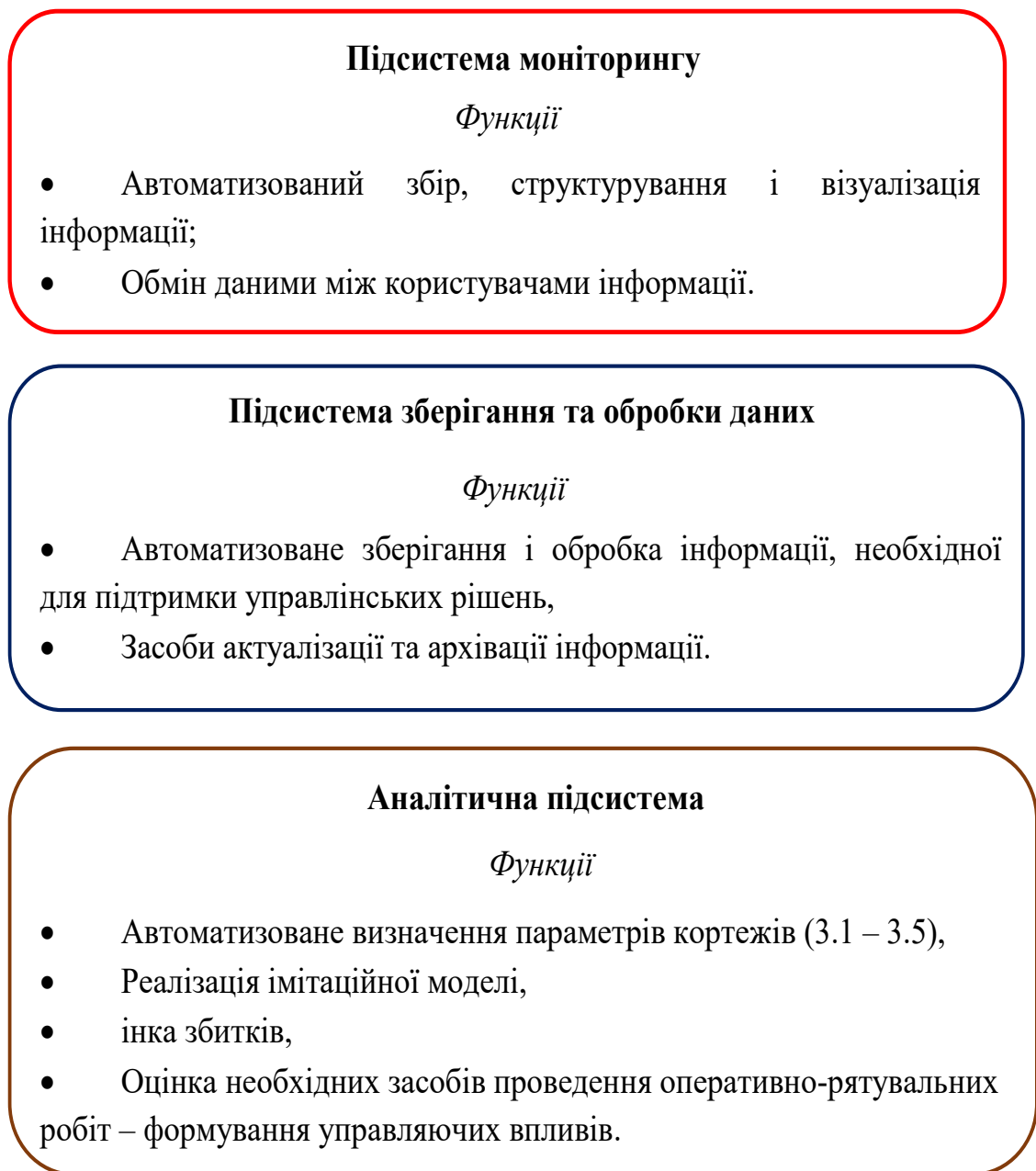


Рисунок 4.5 – Функціональна схема програмно-апаратного комплексу

Інформація в підсистемі зберігання та обробки даних організується як реляційна база даних, що підтримує властивість розподіленої обробки даних. В якості базового інструментарію реалізації функцій аналітичної підсистеми служить методичне забезпечення (математичні моделі, методи імітаційного та оптимізаційного програмування, засоби обробки експертної інформації з метою отримання знань) задач побудови прогнозу виникнення надзвичайної ситуації.

У підсистемі моніторингу виконується збирання та первинна обробка інформації про параметри, що характеризують стан техногенної безпеки на інженерних мережах систем життєзабезпечення, а також збір інформації про характеристики зовнішнього впливу на інженерні мережі типів, що розглядаються.

Розроблення та застосування такої моделі має сприяти всебічному забезпеченню надання необхідними даними і розрахунками органи управління цивільного захисту, місцеві органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування, а також підлеглі їм сили і засоби до виконання дій, спрямованих на ефективне попередження і реагування на НС техногенного характеру з метою мінімізації їх наслідків [180].

Таким чином, методика попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, у складі керуючого алгоритму та його процедурного наповнення, а саме процедур: обґрунтування та визначення форматів вихідних (вхідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення; інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення; організаційно-технічної реалізації розробленої математичної моделі аварії на інженерній мережі як джерела можливої надзвичайної ситуації; програмно-апаратна реалізація інформаційної

моделі та методики на її основі; обґрунтування відповідних управлінських рішень, дозволяє у подальшому мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення, шляхом зниження ймовірності або недопущення останніх.

Висновки за четвертим розділом

1. Виходячи з вищенаведеного, а також на основі результатів попередніх досліджень проблема визначення збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру є далекою до вирішення як в сенсі уніфікації методів та підходів до оцінки збитків (усереднюючий, синтетичний, прямого дослідження), врахування як прямих, так і непрямих збитків, так і в сенсі відсутності єдиної методології збирання світових даних про збитки від надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

2. Алгоритм практичної реалізації методики попередження надзвичайної ситуації техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення складається з двох етапів, а саме етапу визначення просторових параметрів та етапу формування часової складової методики, що у загальному сенсі дозволяє поєднати проекційний, інтегральний та релаксаційний підходи.

3. Методика попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, у складі керуючого алгоритму та його процедурного наповнення, а саме процедур: обґрунтування та визначення форматів вихідних (вхідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення; інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення; організаційно-технічної

реалізації розробленої математичної моделі аварії на інженерній мережі як джерела можливої надзвичайної ситуації; програмно-апаратна реалізація інформаційної моделі та методики на її основі; обґрунтування відповідних управлінських рішень, дозволяє у подальшому мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення, шляхом зниження ймовірності або недопущення останніх.

РОЗДІЛ 5

ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДИКИ

П'яте завдання наукового дослідження з перевірки достовірності розроблених моделей та методики будемо виконувати наступним чином. Спочатку розглянемо протокол інформаційного забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Далі надамо опис інтерактивного апаратно-програмного комплексу. Після чого проаналізуємо результати експериментів, які отримані за допомогою розробленого інтерактивного апаратно-програмного комплексу, що реалізує раніше розроблену математичну модель та відповідну методику, і зробимо висновок про їх достовірність.

5.1 Протокол інформаційного забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру

Інформаційне забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення має проектуватися та розвиватися з урахуванням принципів побудови і стратегії розвитку інформаційного середовища ДСНС України в цілому, що наразі формується Урядовою інформаційно-аналітичною системою з надзвичайних ситуацій (УІАС НС), яка підтримується та експлуатується в ДСНС України.

Призначенням УІАС НС [181] є забезпечення міжвідомчої

інформаційної взаємодії та аналітичної підтримки прийняття рішень на основі сучасних методів просторового аналізу, комплексного вирішення задач управління ризиками надзвичайних ситуацій, моделювання розвитку НС та прогнозування їх наслідків.

Структура УІАС НС має відбивати структуру ДСНС України і на рівні регіону реалізовуватися в якості корпоративної інформаційної системи (KIC), що забезпечує своєчасний і актуальний обмін інформацією.

При цьому необхідно враховувати методологію побудови та експлуатації наявних засобів обробки та передачі інформації, доступні сертифіковані формати та протоколи передачі даних, організацію комунікаційних процесів між зацікавленими споживачами інформації, технологію захисту даних та інші особливості KIC СТСБ як складової УІАС НС.

Практична реалізація методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення має ґрунтуватися на інформації щодо НС, яка зазвичай накопичується, зберігається та опрацьовується в автоматизованому режимі в рамках відповідного програмно-апаратного комплексу.

Інформація щодо параметрів аварії, яка є джерелом можливої НС на інженерних мережах систем життєзабезпечення, зокрема на мережах водопостачання, задається кортежем I вигляду:

$$I = \langle v, \{\lambda(t), \beta(x,y)\}, \tau, \mathfrak{R} \rangle. \quad (5.1)$$

Структура інформації про ланки $G = \{g_1, g_2, \dots, g_J\}$ передавальної мережі визначається кортежем V вигляду:

$$V = \{gI, EI, T\} = \{gI_1, gI_2, \dots, gI_J; T_1, T_2, \dots, T_J; EI_1, EI_2, \dots, EI_J\}, \quad (5.2)$$

де gI_i – інформаційний кортеж характеристик g_i ланки мережі; T – упорядкована за часом інформація щодо аварій на ланках мережі G ; EI – упорядкована інформація щодо характеристик середовища функціонування, тобто опис компонент природного середовища.

Кортеж EI містить інформацію щодо характеристик середовища залягання ланки мережі, а саме: типи та характеристики ґрунту, водойми, приземного шару атмосфери.

Розглянемо елементи кортежу V більш детально.

Отже, інформаційний кортеж gI_i має вигляд:

$$gI_i = \{ [(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i)], D_i, H_i, P_i, B_i \}, \quad (5.3)$$

де (x_{i-1}, y_{i-1}) – координати початку ланки g_i мережі G , (x_i, y_i) – координати кінцевої точки ланки g_i мережі G ; D_i – діаметр ланки g_i мережі G ; H_i – глибина залягання ланки g_i мережі G ; P_i – конструктивні характеристики ланки g_i мережі: матеріал виготовлення (металоконструкції, пластик, бетон та його варіації), технології виготовлення тощо; B_i – показник: $B_i = 1$ – «магістральний», $B_i = 0$ – «внутрішньо кварталний».

Загалом геометрична інформація, що подається кортежем (5.2), відіграє значну роль в моделюванні. При цьому опис ланок мережі G в практиці господарювання може здійснюватися кількома способами.

Так, наприклад, розташування аварійних ланок мережі достатньо часто описують прив'язкою до адреси будинку, біля якого проходить ця ланка.

В четвертому розділі дисертаційної роботи з метою моделювання параметрів розміщення елементів множини G проведено умовну дискретизацію території, що розглядається, з певними кроками дискретизації $(\Delta x, \Delta y)$. Тоді геометричні параметри ланок мережі G визначаються таким чином: як дискретний елемент gI_i є ланка мережі, що належить дискрету $(\Delta x_k, \Delta y_m)$, де $k=1,2,\dots,K$; $m=1,2,\dots,M$, так, що індекс $\{i\}$ є функцією індексів $\{k, m\}$.

Тоді параметри розміщення (x_{i-1}, y_{i-1}) g_i ланки інженерної мережі пов'язуються з лівою нижньою точкою ланки в межах обраного дискрету.

Кортеж T_i інформації про часові характеристики щодо аварій на g_i ланці інженерної мережі задається як:

$$T_i = \{ T_{i0}, t_{ic}, In_i \}, \quad (5.4)$$

де T_{i0} – дата (рік) введення в експлуатацію g_i ланки, t_{ic} – дата (рік) попереднього капітального ремонту, In_i – кортеж характеристик зафіксованих надзвичайних ситуацій (аварій) на об'єкті: $In_i(q,1)$ – дата настання події, $In_i(q,2)$ – тривалість аварії, $In_i(q,3)$ – оцінка матеріальних збитків, $In_i(q,4)$ – людські жертви.

При цьому оцінка збитків $In_i(q,3)$ – у свою чергу є багатофакторною величиною, що містить, зокрема, дані про населення району НС, що сталася (табл. 5.1).

На основі інформації (5.1–5.4) створюється множина цифрових електронних карт, які упорядковані за типами можливих негативних впливів на довкілля і населення мегаполісу.

Таблиця 5.1 – Структура даних про населення району можливої НС на інженерних мережах

Характеристика	Одиниця виміру
Щільність населення	осіб/км ²
Площа всього житлового району	км ²
Населення району	тис. осіб
Частина площі району в зоні НС	%
Теоретична кількість населення в зоні НС	тис. осіб

Таким чином, розглянутий протокол інформаційного забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру дозволяє у подальшому визначити основні параметри та комунікаційні зв'язки інформаційного забезпечення процесу прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах міста та визначити основні вимоги до інтерактивного апаратно-програмного комплексу.

5.2 Розробка інтерактивного апаратно-програмного комплексу

Як зазначалося раніше (підрозділ 5.1), практична реалізація методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення мегаполіса передбачає створення відповідного програмно-апаратного комплексу. Основні складові такого комплексу показані в розділі 4.

На цій основі розроблено структурну схему апаратно-програмного комплексу (рис. 5.1), що є інтерактивним та включає, як складову, особу, що приймає рішення (ОПР).

Для уніфікованої обробки інформації за прогнозом і ліквідації наслідків НС в даний час виникає необхідність у розробці спеціалізованих регіональних баз даних, методичного та алгоритмічного забезпечення, а також нормативно-правової інформації на основі застосування телекомунікаційних технологій.

Територіальна інформаційна система має включати наступні компоненти:

- цифрову картографічну основу під управлінням ГІС-оболонки;
- прикладне програмне забезпечення для прогнозу наслідків НС, яке запускається з середовища ГІС-оболонки;
- бази даних.

Інформаційно-управляюча підсистема (ІУС) включає аналітичний блок і блок підтримки керуючих рішень.

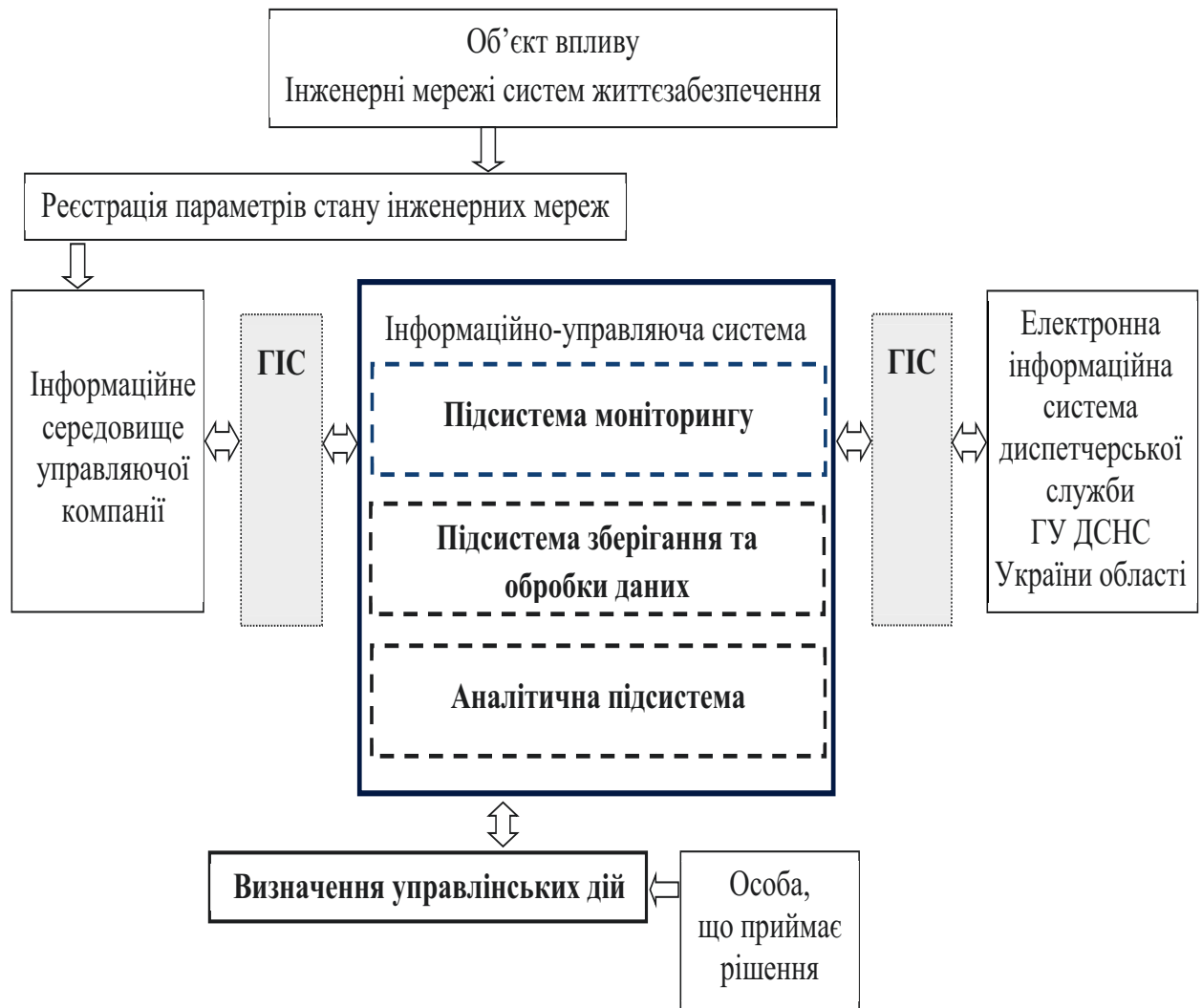


Рисунок 5.1 – Структурна схема інтерактивного апаратно-програмного комплексу

Аналітичний блок забезпечує аналіз вихідних даних та отримання якісно нової результуючої інформації у формі, оптимальної для підготовки управлінських рішень. Це зумовлює наявність в ньому двох підблоків прогнозу НС, які можуть бути просторово та організаційно розподілені між організаціями, що здійснюють аналіз та обробку даних:

- підблок методів і алгоритмів обробки даних, пов'язаних з нормативно-правовим і методичним забезпеченням прогнозу та ліквідації наслідків НС;

- підблок моделюючих систем, що здійснюють обробку даних на основі спеціалізованих програмно-технічних комплексів.

Блок підтримки управлінських рішень забезпечує вибір оптимального рішення з кількох конкуруючих варіантів, підготовлених і візуалізованих в аналітичному блоці. Критерії оптимізації (пріоритет тактичного або стратегічного аспектів, орієнтація на максимальний економічний або соціальний ефект, вибір найбільш адекватних поставлених меті результатів тощо) в даний час практично не формалізовані. Їх вибір поки визначений або досвідом ОПР, або корпоративними інтересами. Такі елементи технології експертних систем, як бази знань і бази метаданих, ще не набули широкого розвитку в Україні.

Значну роль відіграє геометрична інформація про топологію інженерної інфраструктури міста та характеристики зовнішнього середовища.

Тому в силу просторової розподіленості інженерної мережі системи життєзабезпечення міста на території виникає необхідність обробки, зберігання та аналізу геоінформації, що передбачає створення відповідного організаційно-технічного блоку як інструментального засобу підтримки комунікацій (рис. 5.1). Складовими даного блоку є геоінформаційна система (ГІС), що має бути розвиненою в корпоративній інформаційній системі (КІС) ТСТБ, а також апаратне і організаційне забезпечення.

У блоці ГІС виконується аналіз і візуалізація графічної інформації у вигляді набору електронних карт і прив'язаних до них даних про параметри інженерної інфраструктури та природних середовищ регіону. Арсенал засобів ГІС включає базові електронні карти місцевості і цифрові моделі рельєфу, засоби створення тематичних карт, що характеризують стан навколишнього середовища; карт розміщення мереж моніторингу; схем розподілу сил і засобів реагування на НС з орієнтацією на НС, які відбулися. Необхідною умовою для створення блоку є наявність системи обробки, що інтегрує просторову інформацію розподілених джерел на платформі ГІС. При

цьому джерела даних можуть передавати інформацію в доступному для них вигляді – таблиці, бази даних, цифрові карти тощо, але відповідно до загальних вимог розробників центральної ГІС до організації просторової інформації.

Відповідно подальший розвиток КІС ТСТБ означає також і можливу зміну організаційної структури ТСТБ через створення відповідного геоінформаційного підрозділу і введення до складу ТСТБ технічних засобів створення геоданих.

Практика показує, що необхідна інформація існує у міських та державних службах у різних, часто неузгоджених, форматах, здебільшого фрагментарно, дещо у паперовому вигляді. Більш того, не існує єдиного регламенту актуалізації ключової для життєзабезпечення території інформації. Це суттєво зменшує продуктивність і достовірність побудови відповідних прогнозів.

За таких передумов важливими істотними вимогами до налаштування архітектури програмного та апаратного забезпечення є забезпечення блочної структури програмного забезпечення для підтримки властивості відкритості системи.

Чисельне моделювання та апробація процедур методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення мегаполісу проводилась на множині чисельних даних щодо аварій на інженерних мережах систем водопостачання та водовідведення м. Харкова. Отже, проведенню чисельного моделювання передувало дослідження організації інформаційного середовища КП «Харківводоканал» як елемента системи безпеки, прогнозування та визначення відповідних протоколів передачі інформації.

Визначальними властивостями інформаційного простору КП «Харківводоканал» є широке провадження електронного документообігу та хмарних технологій зберігання даних.

З метою забезпечення підвищення якості ведення діловодства та виконавчої дисципліни за рахунок автоматизації відповідних процесів у КП «Харківводоканал» впроваджено електронний документообіг, затверджено порядок його здійснення, заходи щодо виконання, дотримання вимог, забезпечення інформаційного супроводу, а також адаптування існуючих електронних систем до потреб впроваджуваного програмного забезпечення (рис. 5.2).

Система електронного документообігу забезпечує проведення обліку, зберігання, розгляд і відпрацювання різних типів і видів документів між користувачами без використання паперового документообігу, що уможливорює роботу з наказами, протоколами, службовими записками з одночасною постановкою завдань і контролем їх виконання.

Складність процесів збору, обробки, актуалізації даних і передачі агрегованої інформації особі, що приймає рішення, а також різнорозмірність і багатовимірність задач інформаційної підтримки задач, що розглядаються, вимагають залучення сучасних інформаційних технологій. У зв'язку з цим є перспективним застосування інноваційної технології хмарних обчислень.

Система «Document.Online» – це програмно-апаратний комплекс, призначений для оброблення, відправлення, передачі, одержання існуючими каналами зв'язку (зокрема мережі Інтернет) електронних документів, а також їх зберігання та використання, що здійснюється із застосуванням перевірки цілісності. Система містить у своєму складі засоби накладення та перевірки кваліфікованого електронного підпису, що використовується для взаємодії з кваліфікованими надавачами електронних довірчих послуг.

Користувачами системи є будь-які юридичні та фізичні особи, що зареєструвалися належним чином та отримали можливість використовувати систему за її функціональним призначенням.

Документи в системі зберігаються на множині серверів Microsoft Azure з

автоматичною підтримкою зв'язку між серверами та політики багаторазового копіювання даних. Забезпечується інтеграція з обліковими системами «1С Клієнт» для взаємодії, «Document.Online» з файловою системою та інші рішення.

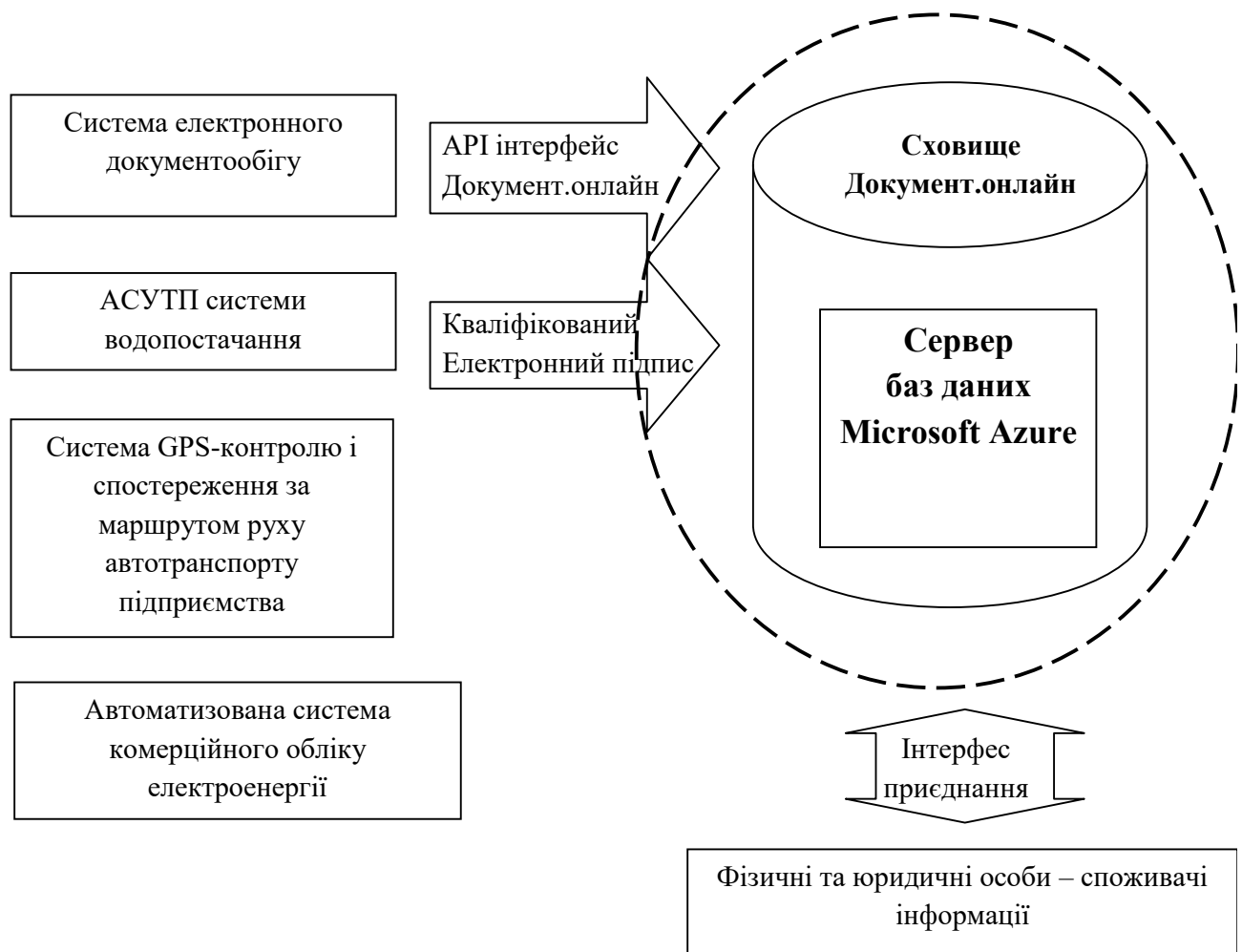


Рисунок 5.2 – Комплекс заходів з автоматизації та використання екосистеми КП «Харківводоканал»

Таким чином, інтерактивний апаратно-програмний комплекс попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст базується на функціоналі територіальної інформаційної системи в складі цифрової

картографічної основи під управлінням ГІС-оболонки; прикладного програмного забезпечення для прогнозу наслідків НС та відповідної бази даних НС.

5.3 Результати експериментів з перевірки достовірності розробленої математичної моделі та методики на її основі

Чисельна реалізація методики прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру як складової системи безпеки з попередження ТНС внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення проведена на статистичних рядах мережі водопостачання та водовідведення м. Харкова, на яких виконано просторово-часове моделювання подій виникнення та рівня складності ТНС.

Інтерпретація задачі просторового оцінювання стосовно множини локацій виникнення ТНС на інженерних мережах систем життєзабезпечення мегаполісу була здійснена на вихідному ряді значень локацій і складності аварій, що формувався за даними офіційного сайту КП «Харківводоканал» в якості практичної ілюстрації.

Моделювання проводилось за районами мегаполісу, зокрема, розглядався Шевченківський район (рис. 5.3), площа якого складає 62 км^2 , тобто 17,7% площі всього міста.

До уваги приймалися аварії на трубопроводах першого і другого класу за діаметром:

I-й клас – діаметр від 1000 до 1200 мм;

II-й клас – діаметр від 500 до 1000 мм.

Зважаючи на те, що однією з ключових властивостей просторово-розподілених даних є їх просторова роздільна здатність, яка є адекватним поданням просторового явища, що вивчається. Звичайно просторова роздільна

здатність – це найменший розмір властивості, яку відбивають дані та просторові оцінки.

Визначення просторової роздільної здатності засновано на розбитті контрольованої території S сіткою вимірів на осередки.

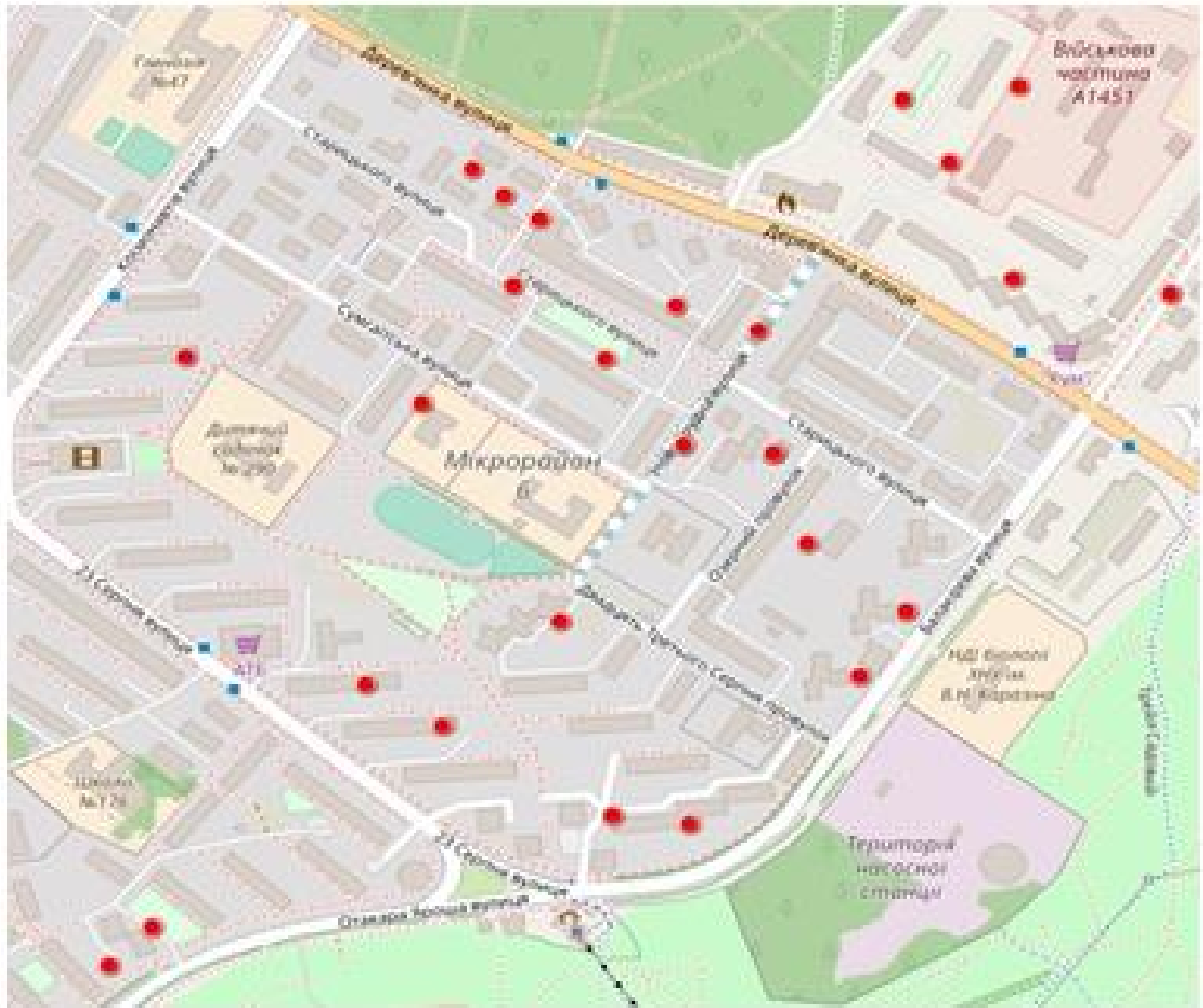


Рисунок 5.3 – Мапа Шевченківського району, м. Харків (червоні точки – місця аварій)

Визначення просторової роздільної здатності засновано на розбитті контрольованої території S сіткою вимірів на осередки.

При використанні стандартної прямокутної сітки просторова роздільна здатність просторової оцінки характеризується розміром комірки: $\{(a_k, b_m), (a_{k+1}, b_{m+1})\}$, що ілюструється рис. 5.4.

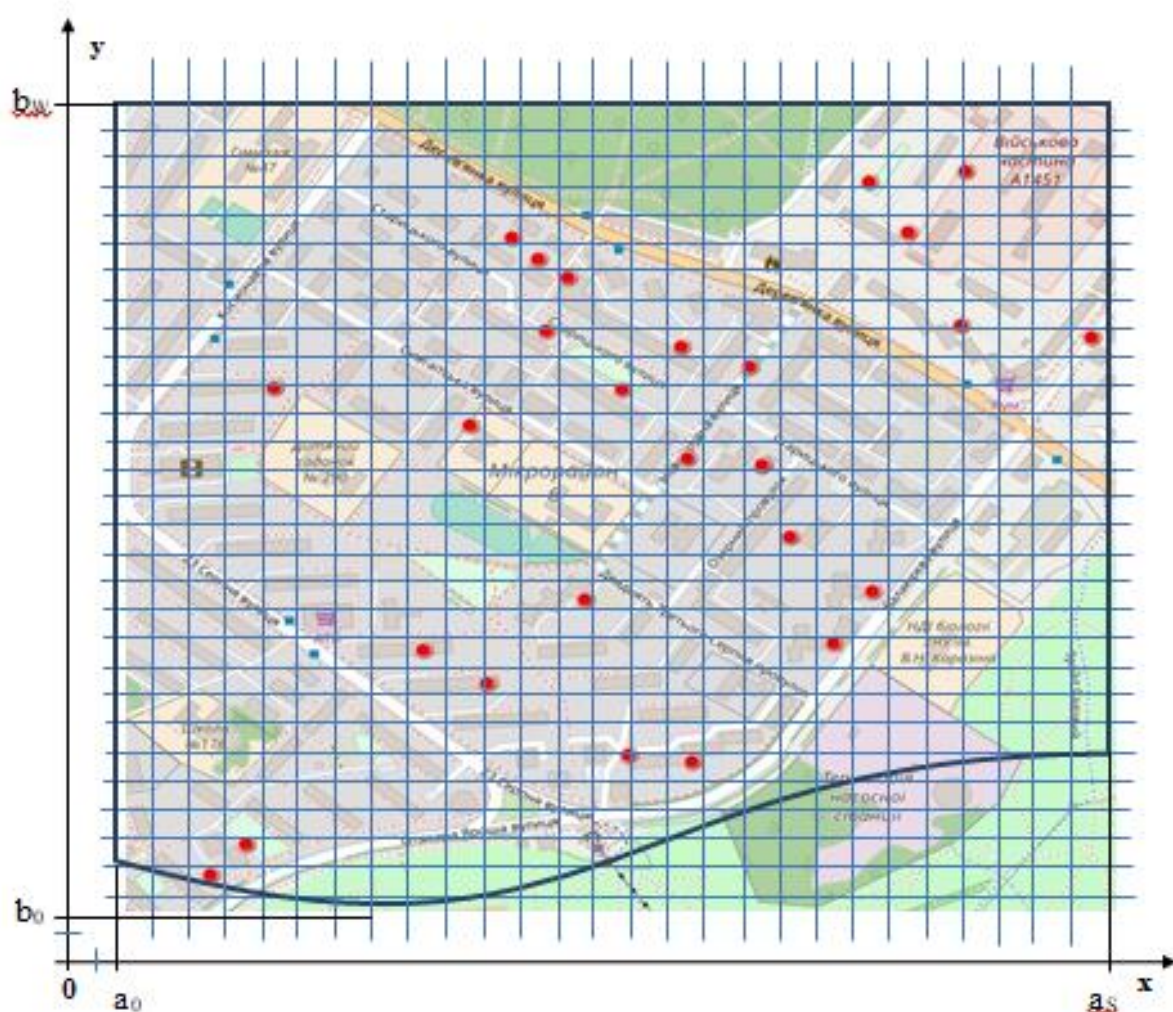


Рисунок 5.4 – Мапа Шевченківського району, м. Харків, з побудованою сіткою

Якщо сітка оцінювання є нерегулярною, то просторову роздільну здатність можна охарактеризувати розподілом відстаней між вузлами сітки (рис. 5.4).

Також вводиться у розгляд прямокутник $\{(a_0, a_s), (b_0, b_w)\}$, в який є вписаною двовимірною областю (територією) S .

В статичних задачах просторового картування, до яких належить задача, що розглядається, просторова роздільна здатність сітки має велике значення. Побудовані характеристики, що пов'язують просторову роздільну здатність сітки з картографічним масштабом.

Таблиця 5.2 – Приклад обчислення потужностей ϑ_n точок-генераторів v_n мереж водопостачання території Шевченківського району м. Харкова

		Координата у								
		2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5
Координата х	-2,5	3	2	2	1	1	1	3		
	-7,5	4	2	2	2					
	-12,5				3	2	1	2		
	-17,5		3		2	2	3	2	1	
	-22,5	3		1	2	1				
	-27,5	3	1			2	2	1		
	-32,5			1	1	1	2	2	1	
	-37,5	1	4	1		2	1	2		
	-42,5	1								

В комірках табл. 5.2 наведено кількість аварій на ланках мереж водопостачання, що належать визначеним коміркам регулярної сітки.

За даними табл. 5.2 побудовано поверхню $\tilde{y}(x, y)$, наведену на рис. 5.6. На рис. 5.6 показана сітка вимірів, яка є корельованою зі значеннями рис. 5.5. Фіолетовим кольором забарвлені комірки з найвищим рівнем небезпеки, блакитним кольором – з найнижчим рівнем. Побудоване скалярне поле спостережень є підґрунтям для генерації вхідного потоку замовлень на обслуговування для регіональної системи безпеки.

Вибір напрямку координатних осей на рис. 5.7 узгоджений із розташування Шевченківського району відносно географічного центру м. Харкова.

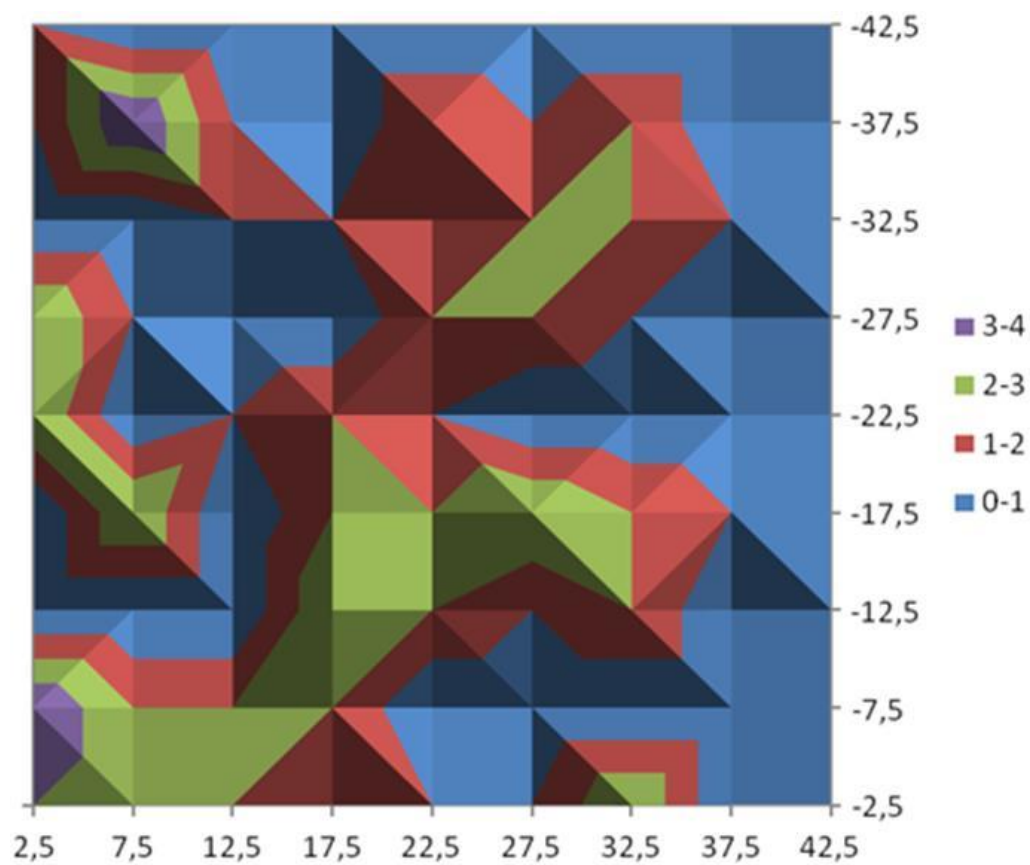


Рисунок 5.6 – Скалярне поле небезпеки за спостереженнями

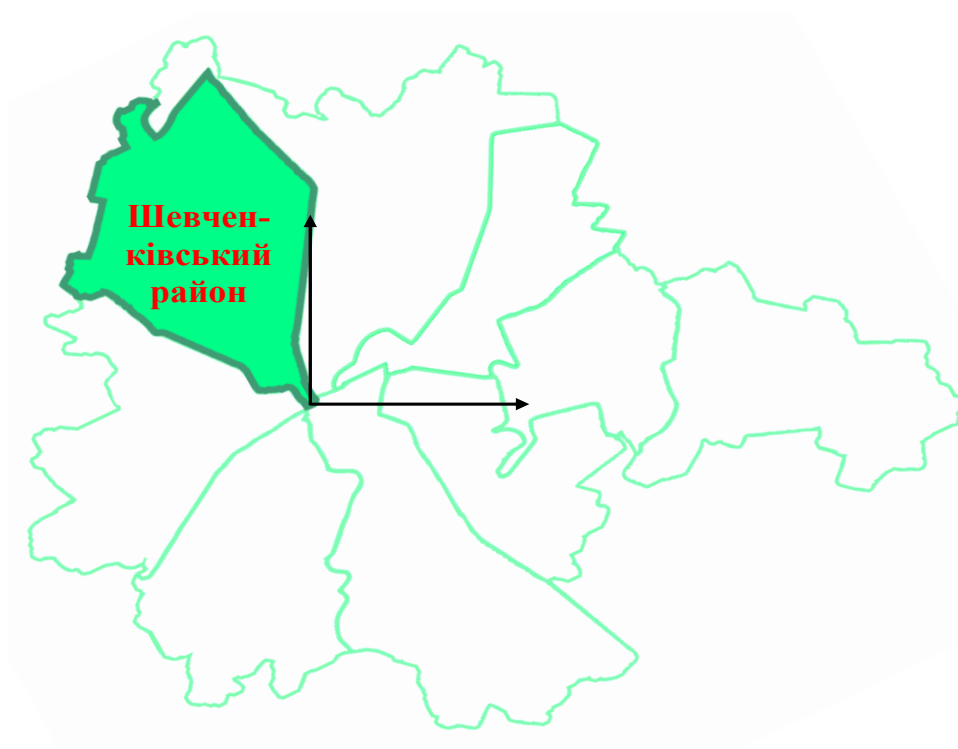


Рисунок 5.7 – Шевченківський район на карті м. Харкова

Вихідними даними чисельної реалізації методики прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на прикладі мережі водопостачання м. Харкова є такі:

Геометрична інформація:

- Площа м. Харкова – 350 км²;
- Площа Шевченківського району – 62 км²;
- Шевченківський район – 17,7% площі міста;
- Масштаб – 1,5 см = 20 м;
- Початок відліку (0,0) – будинок за адресою: площа Конституції, 1

(рис. 5.7).

Інформація про аварійні ситуації:

- Аварійні роботи є щодня;
- Середня кількість аварійних робіт – 5,2;
- трубопроводи першого і другого класу за діаметром:

I-й клас – діаметр від 1000 до 1200 мм;

II-й клас – діаметр від 500 до 1000 мм;

- Максимальна кількість аварійних робіт на день – 11;
- Мінімальна кількість аварійних робіт на день – 1;
- Крок решітки – 23 м.

В даному дослідженні зосередимось на двох основних характеристиках – визначенні оптимальної довжини статистичного ряду та визначенні ступеню прийнятності теоретичних розподілів, що застосовуються.

Етап 1 – підготовчий.

Крок 1.1. Підготовка вхідних даних. Визначення елементів кортежів стосовно території, що розглядається.

Крок 1.2. Визначення довжини статистичних рядів даних щодо характеристик ланок мережі за формулою:

$$T = (T_1 - T_0), \quad (5.1)$$

де T_0, T_1 – початковий та останній роки початку експлуатації ланок мережі.

На цьому етапі важливою є оцінка довжини статистичного ряду, за яким проводиться подальше прогнозування [182]. Під довжиною часового ряду розуміють час, що минув від першого до останнього моменту спостереження. Часто довжиною ряду називають кількість рівнів (елементів, спостережень) N , які утворюють часовий ряд.

Так, наприклад, рекомендації, що містяться у роботі [183] визначають, що довжина ряду має бути не менша за 50 елементів – спостережень.

Відповідно, якщо обирати в якості горизонту прогнозу місяць, то довжина статистичного ряду має складати приблизно 4 роки. При цьому необхідно приймати до уваги той факт, що збільшення довжини статистичного ряду понад певного оптимального значення не призводить до підвищення точності прогнозу.

Крок 1.3. Визначення кроку h розбиття (зазвичай покладається 5–10 років) інтервалу $[0, T]$, що застосовується у зворотному порядку.

Крок 1.4. Кластеризація множини ланок мережі G за терміном введення в експлуатацію. Як зазначалось, кластери $K_m, m=1,2, \dots, M$, в загальному випадку є геометрично незв'язними множинами.

Крок 1.5. Перевірка гіпотези щодо розподілу Пуассона числа k випадкових відмов протягом періоду t на кластерах K_m вигляду:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda_m^{\text{вип}} t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (5.2)$$

де $\lambda_m^{\text{вип}}$ – параметр розподілу Пуассона, тобто інтенсивність виникнення НС на мережах водопостачання на кластерах $g_j, j=1,2,\dots,J$.

На кожному з кластерів $g_j, j=1,2,\dots,J$, вважаємо параметр λ_j гіпотетичного розподілу Пуассона постійною величиною, тобто на кожному з кластерів розглядається стаціонарний пуассоновський потік моментів виникнення НС.

Критерієм справедливості гіпотези про розподіл Пуассона моментів настання НС на мережах водопостачання на кластерах $g_j, j=1,2,\dots,J$, є виконання умови:

$$MX=\lambda_j, DX=\lambda_j, \quad (5.3)$$

де MX – математичне сподівання розподілу Пуассона, DX – дисперсія розподілу Пуассона.

У першому наближенні елементи k_m^n певного кластеру $K_m = \{k_m^1, \dots, k_m^n, \dots, k_m^{N_m}\}$ у подальшому вважаються джерелами (генераторами) надзвичайної ситуації однакової тяжкості.

Більш точний аналіз передбачає оперування середніми та найгіршими оцінками важкості можливої НС.

Етап 2 – основний. Побудова та запуск імітаційного стимулятора, тобто генерація певної кількості випробувань – реалізацій НС.

Крок 2.1. Визначення ймовірностей події A_m настання НС на кластері K_m у одиницю часу, та, відповідно, події $\bar{A}_m$ ненастання НС на кластері K_m .

Крок 2.2. Визначення повної дискретної множини $Q = \{q_\theta\}, \theta=1,2,\dots,\Theta$ несумісних подій вигляду:

$$Q = \left\{ \prod_{m=1}^M A_m, \bar{A}_1 \prod_{m=2}^M A_m, \bar{A}_M \prod_{m=1}^{M-1} A_m, \bar{A}_1 \bar{A}_2 \prod_{m=3}^M A_m, \dots, A_M \prod_{m=1}^{M-1} \bar{A}_m, \prod_{m=1}^M \bar{A}_m \right\}. \quad (5.4)$$

та для кожного елементу множини Q визначення ймовірності p_θ реалізації відповідної складної події $q_\theta, q_\theta \in Q, \theta=1,2,\dots,\Theta$.

Крок 2.3. Визначення індексу θ події q_θ з множини, що реалізується на даній ітерації, за допомогою генерації рівномірно розподіленого на $[0, 1]$ випадкового числа ξ і перевірки умови (4.6)

$$\sum_{\mu=1}^{\theta-1} p_\mu \leq \xi \leq \sum_{\mu=1}^{\theta} p_\mu. \quad (5.5)$$

Крок 2.4. Визначення часу локалізації та ліквідації аварії, котрий можна інтерпретувати як час обслуговування W_j аварійного елемента g_j (дні). Ця задача є дуже суттєвою з двох основних причин. По-перше, на цей час відвернені ресурси ТСТБ, величина яких визначається тяжкістю аварії. По-друге, режим функціонування g_j може впливати на параметри обслуговування ТСТБ подальших вимог.

Визначимо, що час відновлення W_j задовольняє нормальному розподілу з заданим середнім μ та стандартним відхиленням σ залежно від рівня r_i тяжкості аварії:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln t - \mu}{2\sigma}\right)^2}, \quad t \geq 0, \quad (5.6)$$

де параметри μ та σ є функціями від рівня r_i важкості НС: $\mu=f(r_i)$. $\sigma=f(r_i)$.

Узгоджуючи цей розгляд з Методикою для подальшого застосування для оцінки складності аварії в вартісному визначенні, необхідно визначити оцінки $\mu=f(r_i)$. $\sigma=f(r_i)$. для кожного кластеру, визначеного на кроці 1.4., окремо.

Крок 2.5. Визначення загального обсягу збитків в даному випробуванні за умови нормування за часом обсягу збитків, що генеруються при реалізації ТНС на інженерних мережах.

Крок 2.6. Заключний. Визначення середніх (сумарних) характеристик експерименту, що є підґрунтям для прогнозної оцінки готовності

територіальної системи техногенної безпеки до обслуговування прогнозованої множини НС на заданому горизонті планування.

Реалізацію запропонованого алгоритму в рамках аналітичної підсистеми, функціональної схеми яка наведена на рис. 5.1, проведено із застосуванням системи Scilab – кросплатформенної системи комп'ютерної алгебри, що включає також і вбудовану мову програмування. Розробка системи Scilab ведеться фахівцями французького Національного інституту інформатики і автоматизації (INRIA – Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) [184, 185].

На рис. 5.8 представлено порівняння візуальної інтерпретації гістограми, побудованої за допомогою MS Excel 2003 та гістограми, згенерованої в системі Scilab.

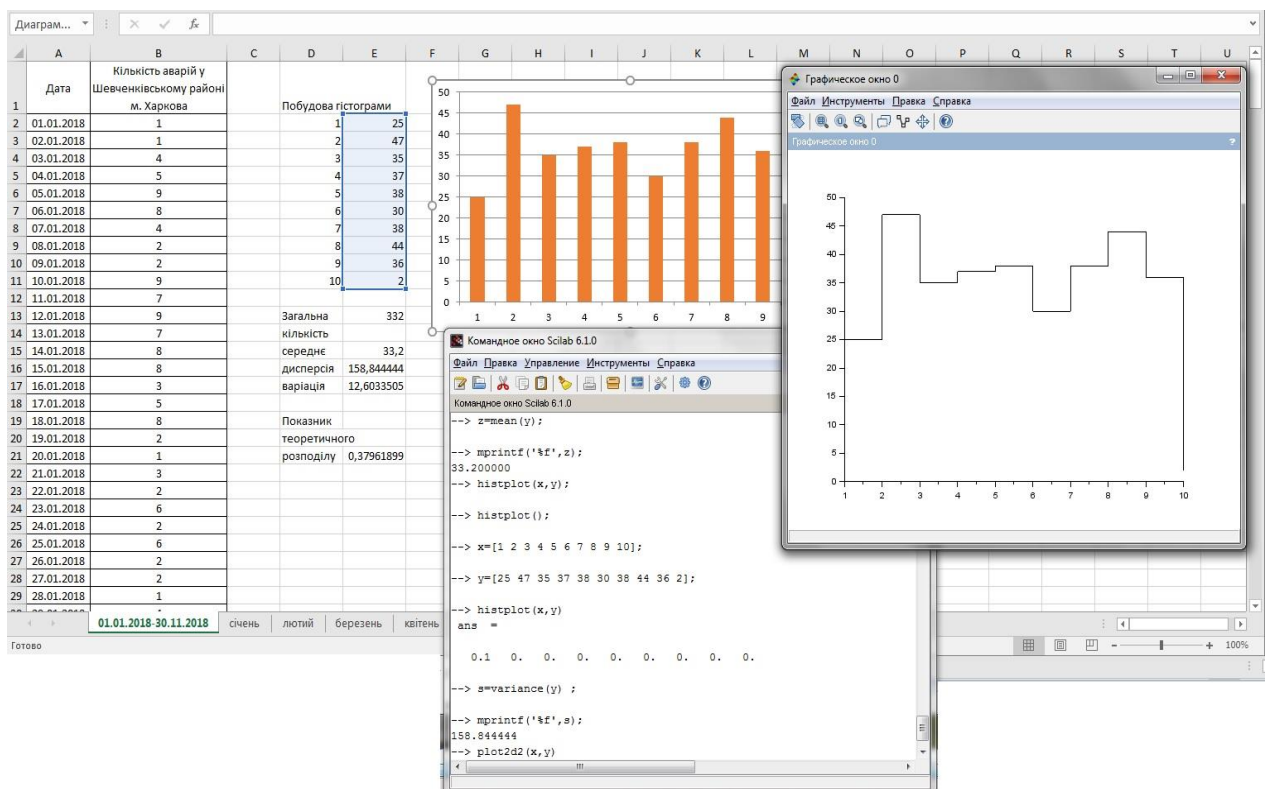


Рисунок 5.8 – Візуалізація інтерфейсу програмних середовищ MS Excel і Scilab 6.1.0

Із теорії ймовірності відомо, що якщо число заявок на обслуговування за певний проміжок часу задовольняє розподіл Пуассона, то розподіл інтервалів часу між послідовними надходженнями заявок відповідає експоненціальному розподілу. Зокрема, якщо $\lambda_m^{\text{вип}}$ – є швидкість (інтенсивність) появи подій в розподілі Пуассона, то розподіл часу x між послідовними надходженнями заявок визначається щільністю ймовірності:

$$f(x) = \lambda_m^{\text{вип}} e^{-\lambda_m^{\text{вип}} x}. \quad (5.7)$$

Відповідно з урахуванням застосування оцінки тривалості НС на певних кластерах, уможлиблюється моделювання настання моментів НС на часовій осі.

За алгоритмами Методики складові матеріальних втрат [176] в кінцевому рахунку залежать від кількості уражених осіб та стану основних фондів виробничого та невиробничого призначення.

У випадку інженерних мереж до категорії основних фондів невиробничого призначення включаються передавальні мережі та інше обладнання.

Вважатимемо стан основних фондів виробничого та невиробничого призначення в рамках кластера (коефіцієнт амортизації, ліквідаційна вартість тощо) однаковими.

Відповідно оцінка Z обсягу втрат внаслідок аварії на мережах водопостачання є функцією терміну експлуатації, тривалості локалізації та ліквідації аварії й діаметру труби аварійної ділянки водопровідної мережі.

Відмітимо, що в рамках чисельного експерименту зручно розглядати не абсолютні, а відносні оцінки обсягів втрат.

Подія, яка може трапитись на мережах водопостачання в разі дії несприятливих чинників техногенного походження, буде кваліфікуватись як надзвичайна ситуація, якщо припинено водопостачання більше 30 відсотків

розрахункового обсягу водопостачання населеного пункту (міста) через аварії на об'єктах водопостачання або пошкодження мереж водопостачання.

Містом в Україні вважається населений пункт з населенням більше 10000 осіб.

Виходячи з того, що населення Шевченківського району складає 15 відсотків населення м. Харкова, тобто приблизно 230000 осіб, будемо вважати, що аварії на ділянках мережі водопостачання з діаметром труби І-го класу – від 1000 до 1200 мм, тобто на магістральних водогонах, що тривають 2 або більше діб, задовольняють умовам визначення надзвичайної ситуації.

Від так, вихідними даними для моделювання є такі:

- масив ймовірностей події A_m настання НС на кластері K_m у одиницю часу $P_1(t) = (\lambda_m^{\text{вип}} t) e^{-\lambda_m^{\text{вип}} t}$, та, відповідно, ймовірностей $(1 - P_1(t))$ події $\bar{A}_m$ ненастання НС на кластері K_m ;

- ймовірності ρ_m^I настання аварії на ділянках мережі водопостачання з діаметром труби І-го класу – від 1000 до 1200 мм, та ймовірності ρ_m^{II} настання аварії на ділянках мережі водопостачання з діаметром труби І-го класу – від 500 до 1000 мм, $\rho_m^I + \rho_m^{II} = 1$;

- Параметри $\mu=f(r_i)$, $\sigma=f(r_i)$ нормального розподілу часу обслуговування.

В якості історичних статистичних рядів даних в роботі обрано ряди характеристик аварій на мережах водопостачання Шевченківського району м. Харкова за п'ять останніх роки.

При цьому визначимо, що початковий рік експлуатації ланок мережі, що розгадається – це 1940 рік, а останній рік початку експлуатації – 1989 рік.

Визначено крок h розбиття, $h=7$. Тому було визначено 7 кластерів: $[\leq 1940 - 1950]$, $[1951 - 1957]$, $[1958 - 1965]$, $[1966 - 1973]$, $[1974 - 1981]$, $[1982 - 1989]$, $[1990 - \text{по теперішній час}]$.

За цими часовими інтервалами проведено кластерізацію множини ланок

мережі G за терміном введення в експлуатацію. Як зазначалось, кластери K_m , де $m=1,2, \dots, 7$, в загальному випадку є геометрично незв'язаними множинами.

На рис. 5.9 представлені результати розбиття множини спостережень на кластери.

Крок 1.5. Перевірка гіпотези щодо розподілу Пуассона числа k випадкових відмов протягом періоду t на кластерах K_m вигляду:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda_m^{\text{вип}} t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (5.8)$$

де $\lambda_m^{\text{вип}}$ – параметр розподілу Пуассона, тобто інтенсивність виникнення НС на мережах водопостачання на кластерах g_j , $j=1,2,\dots,J$.

На кожному з кластерів g_j , де $j=1,2,\dots,J$, вважаємо параметр λ_j гіпотетичного розподілу Пуассона постійною величиною, тобто на кожному з кластерів розглядається стаціонарний пуассоновський потік моментів виникнення НС (рис. 5.9).

Командное окно Scilab 6.1.0

	"I"	"II"	"III"	"IV"	"V"	"VI"	"VII"
"січень"	"26"	"25"	"33"	"20"	"15"	"7"	"13"
"лютий"	"19"	"24"	"23"	"20"	"17"	"9"	"7"
"березень"	"28"	"22"	"33"	"21"	"22"	"4"	"6"
"квітень"	"20"	"22"	"22"	"21"	"19"	"4"	"10"
"травень"	"20"	"36"	"28"	"23"	"13"	"8"	"6"
"червень"	"39"	"27"	"21"	"20"	"22"	"15"	"8"
"липень"	"21"	"28"	"24"	"14"	"16"	"2"	"4"
"серпень"	"34"	"31"	"30"	"18"	"26"	"6"	"4"
"вересень"	"20"	"28"	"27"	"13"	"11"	"12"	"7"
"жовтень"	"28"	"32"	"29"	"21"	"15"	"5"	"8"
"листопад"	"25"	"26"	"23"	"22"	"16"	"5"	"9"
"грудень"	"29"	"23"	"25"	"23"	"14"	"6"	"8"
"січень"	"29"	"31"	"33"	"15"	"14"	"11"	"5"
"лютий"	"31"	"42"	"19"	"18"	"15"	"5"	"8"
"березень"	"31"	"25"	"21"	"21"	"9"	"9"	"8"
"квітень"	"33"	"24"	"24"	"26"	"21"	"9"	"5"
"травень"	"28"	"38"	"20"	"18"	"20"	"11"	"6"
"червень"	"34"	"26"	"20"	"15"	"22"	"7"	"11"
"липень"	"34"	"23"	"18"	"22"	"18"	"7"	"7"
"серпень"	"33"	"30"	"33"	"17"	"17"	"5"	"4"
"вересень"	"28"	"21"	"19"	"13"	"15"	"14"	"6"
"жовтень"	"29"	"36"	"21"	"20"	"15"	"10"	"1"
"листопад"	"26"	"22"	"30"	"18"	"8"	"13"	"10"
"грудень"	"29"	"17"	"16"	"14"	"17"	"5"	"8"
"січень"	"22"	"28"	"22"	"23"	"19"	"9"	"8"
"лютий"	"22"	"22"	"18"	"15"	"17"	"7"	"3"
"березень"	"32"	"23"	"22"	"21"	"15"	"10"	"5"
"квітень"	"28"	"28"	"23"	"34"	"19"	"10"	"4"
"травень"	"19"	"27"	"20"	"15"	"15"	"6"	"7"

Рисунок 5.9 – Розбиття значень за кластерами

Критерієм справедливості гіпотези про розподіл Пуассона моментів настання НС на мережах водопостачання на кластерах g_j , де $j=1,2,\dots,J$, є виконання умови:

$$MX=\lambda_j, DX=\lambda_j, \quad (5.9)$$

де MX – математичне сподівання розподілу Пуассона, DX – дисперсія розподілу Пуассона.

Узагальнена інформація щодо характеристик розподілів та емпіричних значень параметрів λ (інтенсивність настання аварій у місяць) наведена в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Характеристики розподілів та емпіричних значень параметрів λ

Характеристики статистичного ряду	Кластери						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Усього значень	988	950	862	704	579	293	249
Середнє (за місяць)	27,44	26,39	23,94	19,55	16,08	8,14	6,91
Дисперсія (місяць)	25,11	29,21	21,43	18,14	16,36	9,55	7,22
λ_m	27,44	26,39	23,94	19,55	16,08	8,14	6,91

У першому наближенні елементи k_m^n певного кластеру $K_m = \{k_m^1, \dots, k_m^n, \dots, k_m^{N_m}\}$ у подальшому вважаються джерелами (генераторами) надзвичайної ситуації однакової тяжкості.

Відмітимо, що в табл. 5.3 враховані всі аварії на мережах водопостачання, в тому числі ті, що не можуть бути класифіковані як НС, наприклад, тривалістю аварії менше 18 годин.

Аналіз наявної статистичної інформації надає можливість зробити

висновок, що аварії на мережах водопостачання з тривалістю локалізації та ліквідації аварії більше за 18 годин складають приблизно 11–15 % (10–21 аварій в місяць, 0–4 аварії в день) від загальної кількості аварій за всіма кластерами.

Однак, статистичний ряд таких аварій теж добре апроксимується розподілом Пуассона.

Для запуску імітаційного симулятора (кроки 2.2 – 2.4 реалізації релаксаційного підходу в рамках інтерактивного апаратно-програмного комплексу) необхідно задати:

- рік прогнозування, що впливає на розподіл ланок інженерних мереж території, що розглядається, за кластерами;
- одиницю часу моделювання, наприклад, 1 день;
- точку відліку на часовій осі, наприклад, 1 січня року, що розглядається;
- горизонт планування, наприклад, 1 місяць.

На кроці 2.2. визначаються ймовірності настання всіх можливих подій (повної групи подій). При цьому загальна формула має бути розвинена з урахуванням кратності можливих аварій.

Фрагмент визначення необхідних ймовірностей на множині аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби наведений в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Розподіл ймовірностей настання аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби

Кластер	λ (доба)	Максимально можлива кількість подій	Ймовірність настання події			
			Жодної події – A_{m0}	Одна подія – A_{m1}	Дві події – A_{m2}	Три події – A_{m3}
I	0,68	3	0,512	0,343	0,115	0,026
II	0,51	3	0,601	0,306	0,078	0,013
III	0,47	3	0,625	0,294	0,069	0,011
...	...	...	...	...	...	...

Реалізація подальших кроків 2.3 – 2.6 на заданому горизонті прогнозу з урахуванням розподілу часу x між послідовними моментами настання аварії, що визначається щільністю ймовірності, надає можливість побудувати послідовно профіль (переріз за роком) аварій на мережах водопостачання та оцінити (в абсолютному або відносному вимірі) загальний обсяг збитків, що генеруються при реалізації НС.

В якості середньої (сумарної) характеристики експерименту можна вважати інтенсивність λ .

Аналіз ряду інтенсивності λ за тестом Дікі-Фулера показав, що цей ряд є нестационарним. Рівняння відповідного авторегресійного процесу має вигляд:

$$\lambda_m = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_{m-1}, \quad (5.10)$$

де $\alpha_0 = 0,019$, $\alpha_1 = 1,144$.

Результати моделювання та побудови прогнозу значень λ_m наведені на рис. 5.10.

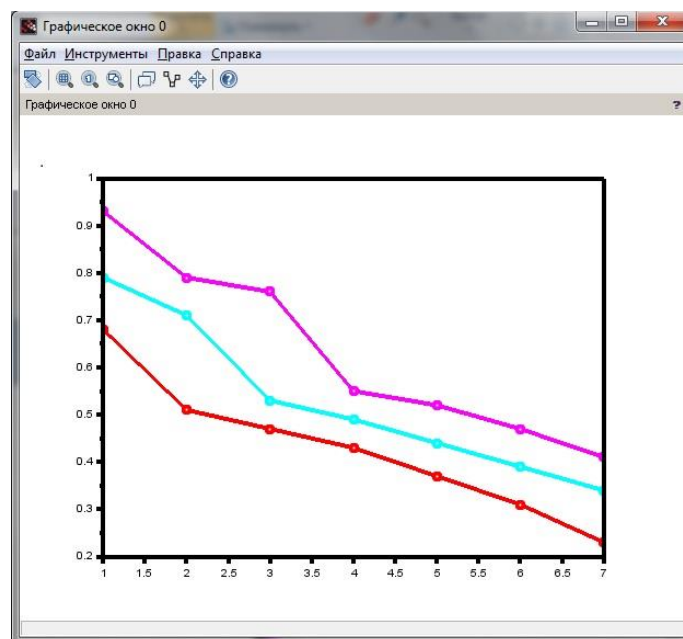


Рисунок 5.10 – Графічна інтерпретація результатів моделювання настання аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби

Базові значення λ_m наведені на графіку червоною лінією. Блакитна та лілова лінії – значення λ_m на період та на два періоди вперед, відповідно.

Визначення середніх (сумарних) характеристик експерименту є підґрунтям для прогнозної оцінки готовності територіальної системи техногенної безпеки до обслуговування прогнозованої множини НС на заданому горизонті планування.

Таким чином, результати натурного дослідження процесу настання аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби на водомережах Шевченківського району м. Харкова входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомогою розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі та методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення, яка була створена на її основі.

Висновки за п'ятим розділом

1. Розглянутий протокол інформаційного забезпечення реалізації методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру дозволяє у подальшому визначити основні параметри та комунікаційні зв'язки інформаційного забезпечення процесу прогнозування параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на інженерних мережах міста та визначити основні вимоги до інтерактивного апаратно-програмного комплексу.

2. Інтерактивний апаратно-програмний комплекс попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст базується на функціоналі територіальної інформаційної системи в складі цифрової картографічної основи під управлінням ГІС-оболонки; прикладного програмного забезпечення для

прогнозу наслідків НС та відповідної бази даних НС.

3. Результати натурного дослідження процесу настання аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби на водомережах Шевченківського району м. Харкова входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомогою розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі та методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення, яка була створена на основі інформаційної та математичної моделей.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача у сфері цивільного захисту, а саме задача підвищення ефективності процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерній інфраструктурі міста за рахунок формування дієвого механізму з прогнозу виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій.

1. Попередження аварій у системах життєзабезпечення в умовах воєнного стану пов'язане зі складністю оперативного реагування та необхідністю безперервного постачання ресурсів. Високий ризик втрат, характерний для об'єктів критичної інфраструктури, що потребує аналізу вразливостей, оцінки ризиків та використання експертних і статистичних методів. Методи забезпечення стійкості включають резервні потужності, диверсифікацію джерел та автономні системи постачання води, електро- і теплопостачання. Моніторинг за допомогою супутникових знімків і дронів прискорює оцінку пошкоджень, а мобільні ремонтні бригади сприяють швидкому відновленню. Стратегії захисту критичної інфраструктури включають розміщення інженерних комунікацій у підземних або укріплених спорудах. Міжнародна допомога та цифрові платформи покращують логістику й координацію постачання ресурсів, що сприяє оперативному відновленню інфраструктури.

2. Розроблено інформаційну модель підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, яка складається з дев'яти функціональних блоків поєднаних прямими та зворотними зв'язками, що у сукупності забезпечує комплексне вирішення задачі (моніторинг, антикризове управління та управління обмеженими ресурсами) маючи за мету створення дієвої системи протидії надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на системах життєзабезпечення міст.

3. Розроблено математичну модель оцінки ефективності управління надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста, яка є різницею двох значень ймовірностей. Перша – поточне значення ймовірності виявлення ознак виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на інженерних мережах систем життєзабезпечення міста. Друга – стандартне значення ймовірності, отримане для типового сценарію розвитку подій.

4. Розроблено методику попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст у складі керуючого алгоритму та його процедурного наповнення, а саме процедур: обґрунтування та визначення форматів вихідних (вхідних) даних про стан інженерних мереж систем життєзабезпечення; інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу стану інженерних мереж систем життєзабезпечення; організаційно-технічної реалізації розробленої математичної моделі аварії на інженерній мережі як джерела можливої надзвичайної ситуації; програмно-апаратна реалізація інформаційної моделі та методики на її основі; обґрунтування відповідних управлінських рішень, дозволяє у подальшому мінімізувати наслідки надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення шляхом зниження ймовірності або недопущення останніх.

5. Розроблено інтерактивний апаратно-програмний комплекс попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення міст, який базується на функціоналі територіальної інформаційної системи в складі цифрової картографічної основи під управлінням ГІС-оболонки; прикладного програмного забезпечення для прогнозу наслідків НС та відповідної бази даних НС. Застосування останньої дозволило провести оцінку процесу настання аварій з тривалістю локалізації та ліквідації більше однієї доби на водомережах Шевченківського району м. Харкова та довести, що отриманні

експериментальні результати входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомогою розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі та методики попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок аварій на інженерних мережах систем життєзабезпечення, яка була створена на основі інформаційної та математичної моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Graham S. Cities as battlespace: The new military urbanism. *City*. 2009. 13(4). P. 383–402.
2. Іванюта С. П., Панов Є. М., Іваненко О. І., Гапон С. В. Оцінка ризиків критичній інфраструктурі України в умовах російської військової агресії. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. (2). С. 47–61. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307360
3. Casey J. A., Fukurai M., Hernández D., Balsari S., Kiang M. V. Power outages and community health: a narrative review. *Current environmental health reports*. 2020. 7 (4). P. 371–383. DOI: 10.1007/s40572-020-00295-0
4. EU-NATO Task Force on the Resilience of Critical Infrastructure. Final Assessment Report. NATO, 2023. 10 p. URL: https://commission.europa.eu/system/files/2023-06/EU-NATO_Final%20Assessment%20Report%20Digital.pdf
5. Title: War and Energy Security: Lessons for The Future. Jermalavičius Tomas (editor); Tynkkynen Veli-Pekka; Prokip Andrian; Egenhofer Christian; Righetti Edoardo; Molis Arūnas; Mändmaa Priit; Lawrence Tony; Sukhodolia Oleksandr, 2023. P. 42–60. URL: https://www.researchgate.net/profile/Oleksandr-Sukhodolia/publication/370630939_Ukrainian_Energy_Sector_under_Military_Attack_Lessons_for_Resilience/links/645a880c6090c43d0f5be8ea/Ukrainian-Energy-Sector-under-Military-Attack-Lessons-for-Resilience.pdf
6. Popik T. S. Preserving Ukraine's Electric Grid During the Russian Invasion. *Journal of Critical Infrastructure Policy*. 2022. 3 (1). P 19. DOI: 10.18278/jcip.3.1.3.
7. Matthews J. C. Disaster resilience of critical water infrastructure systems. *Journal of Structural Engineering*. 2016. № 142(8). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001341
8. Gleick P. H. Water as a weapon and casualty of armed conflict: A review of recent water-related violence in Iraq, Syria, and Yemen. *Wiley Interdisciplinary*

Reviews: Water. 2019. 6(4). P. 1351. DOI: 10.1002/wat2.1351

9. Schillinger J., Özerol G., Güven-Griemert Ş., Heldeweg M. Water in war: Understanding the impacts of armed conflict on water resources and their management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2020. 7(6). P. 1480. DOI: 10.1002/wat2.1480

10. Urlainis A., Shohet I. M., Levy R., Ornai D., Vilnay O. Damage in critical infrastructures due to natural and man-made extreme Events—A critical review. *Procedia Engineering*. 2014. 85. P. 529–535.

11. Tondo L., Sauer P. «Russia bombs five railway stations in central and western Ukraine». *The Guardian*. URL: <https://www.theguardian.com/world/2022/apr/25/russia-bombs-five-rail-stations-in-central-and-western-ukraine>

12. Звіт про збитки та втрати інфраструктури від руйнувань, спричинених військовою агресією Росії проти України станом на початок 2024 року», 2024, 39 с. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf

13. Brown C., Milke M., Seville E. Disaster waste management: A review article. *Waste management*. 2011. 31(6). P. 1085–1098.

14. Junga P., Trávníček P., Suchý P., Kotek L., Vítěz T. Analysis of emergency situations at municipal solid waste landfills. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2023. 25(1). P. 288–301.

15. Tan Y., Zhou L., Xue X., Duan B. Exploration of Key Technologies for Equipment Operation and Maintenance Based on New Power Systems. *International Journal of Thermofluids*. 2023. Vol. 20. P. 100482. DOI: 10.1016/j.ijft. 2023.100482

16. International Energy Charter. «Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – II». International Energy Charter, 2022. P. 12. URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2022_09_30_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_II.pdf

17. Szott M., Wermiński S., Jarnut M., Kaniewski J., Benysek G. Battery energy storage system for emergency supply and improved reliability of power networks. *Energies*. 2021. 14(3). 720 p.

18. Subudhi C. S., Sen S. K., Chauhan V., Halpati V., Verghese C., Vaidya U. W. Post-accident monitoring of electrical systems. *BARC Newslett.* 2020. 367. P. 5–10. URL: https://www.researchgate.net/publication/343721651_Post-Accident_Monitoring_of_Electrical_Systems
19. Ige A. B., Kupa E., Ilori O. Analyzing defense strategies against cyber risks in the energy sector: Enhancing the security of renewable energy sources. *International Journal of Science and Research Archive.* 2024. 12(1). P. 2978–2995.
20. Stip C., Mao Z., Bonzanigo L., Browder G., Tracy J. Water infrastructure resilience. World Bank: Washington, DC, USA, 2019. 39 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/859f04c9-9c48-552c-a7ef-4c019b829a6b/content>
21. Sridhar D., Parimalarenganayaki S. A comprehensive review on groundwater contamination due to sewer leakage: sources, detection techniques, health impacts, mitigation methods. *Water, Air, & Soil Pollution.* 2024. 235(1). P. 56. DOI: 10.1007/s11270-023-06852-1
22. Qasim S. R. Wastewater treatment plants: planning, design, and operation. Routledge, 2017. P. 23–28.
23. Faith K. Stormwater Management: The Necessary Advancements for an Outdated Infrastructure. *J. Animal & Envntl. L.* 2017. 9. P. 122.
24. Hamouda M. A., Anderson W. B., Huck P. M. Decision support systems in water and wastewater treatment process selection and design: a review. *Water Science and Technology.* 2009. 60(7). P. 1757–1770.
25. Kong L., Li Y., Tang H., Yuan S., Yang Q., Ji Q., Chen R. Predictive control for the operation of cascade pumping stations in water supply canal systems considering energy consumption and costs. *Applied Energy.* 2023. 341. P. 121103. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121103
26. Van Leuven L. J. Water/wastewater infrastructure security : Threats and vulnerabilities. In Handbook of water and wastewater systems protection. New York, NY: Springer New York, 2011. P. 27–46.

27. Lee E. J., Schwab K. J. Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of water and health*. 2005. 3(2). P. 109–127.
28. Shah R., Sharma Y., Mathew B., Kateshiya V., Parmar J. Review paper on overloading effect. *International Journal of Advanced Scientific Research and Management*. 2016. 1(4). P. 131–134.
29. Botha A. Prevention of terrorist attacks on critical infrastructure. Handbook of terrorism prevention and preparedness, 2021. P. 867–896.
30. Transport infrastructure trends and regional development. *Transport Bridging Divides*. Paris: OECD Publishing, 2020. URL: https://www.oecd.org/en/publications/transport-bridging-divides_55ae1fd8-en/full-report/component-4.html#chapter-d1e159
31. Cats O., Koppenol G., Warnier M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks : Application for public transport systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. 167. P. 544–553.
32. Praticò F., Astolfi A., Fedele R. Analysis and modelling of the main causes of unsatisfactory quality of transportation infrastructures. *In Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. (November 2021). P. 325–334.
33. Музикін М. І., Лисогоря М. С., Струсевич Ю. В., Нечаєв М. С. Сучасні шляхи забезпечення стійкості роботи об'єктів транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану. *Інтелектуальні транспортні технології: IV міжнар. наук.-техн. конф. (27-28 листопада 2023 р.): тези доповідей*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 92–94.
34. Cayumil R., Khanna R., Konyukhov Y., Burmistrov I., Kargin J. B., Mukherjee P. S. An overview on solid waste generation and management: current status in Chile. *Sustainability*. 2021. 13(21). P. 11644.
35. O'Connell E. J. Increasing public participation in municipal solid waste reduction. *The Geographical Bulletin*. 2011. 52(2). P. 11.
36. Bucoń R. Model supporting decisions on renovation and modernization of

public utility buildings. *Open Engineering*. 2019. № 9 (1). P. 178–185.

37. Rao M. N., Sultana R., Kota S. H. Solid and hazardous waste management: science and engineering. *Butterworth-Heinemann*. 2016. URL: https://books.google.pl/books/about/Solid_and_Hazardous_Waste_Management.html?id=t9_FDAAAQBAJ&redir_esc=y

38. Гаврилюк Н., Стручок В. Дослідження значення операційності в управлінні відходами. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 2024. Р. 381–382.

39. Шешина Н. В., Дюдяєва О. А. Сучасний екологічний стан полігону твердих побутових відходів м. Херсона. Публічне управління та адміністрування у процесах економічних реформ: збірник тез доповідей III Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 19 листопада 2019 р. Херсон: ДВНЗ «ХДАУ», 2019. 260 с.

40. Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Михайленко В. І. Особливості управління та поводження з відходами від руйнувань в регіонах України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2024. № 33. С. 88–98.

41. Токарчук Д. М. Особливості утворення і поводження з відходами під час воєнних дій: досвід України. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2022. 2 (60). С. 109–122. DOI: 10.37128/2411-4413-2022-2-8

42. Chen C., Reniers G., Khakzad N. Integrating safety and security resources to protect chemical industrial parks from man-made domino effects: a dynamic graph approach. *Reliability engineering & system safety*. 2019. № 191. P. 106470.

43. Чумаченко С. М., Мурасов Р. К., Мельник Я. В. Теоретико-методологічні основи інформаційного аналізу еколого-техногенних загроз для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в умовах збройного конфлікту на Сході України. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. 1 (40). С. 117–122.

44. Rinaldi Steven M., Terrence J. P., Kelly K. Identifying, understanding,

and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*. 2001. 21 (6). P. 11–25.

45. Кічата Н. М., Третьяков О. В. Шляхи підвищення ефективності реалізації державної політики у сфері захисту критичної інфраструктури. *Вісник НУЦЗ України. Серія: Державне управління*. 2024. 1(20). С. 387–402.

46. Canton L.G. Emergency management: Concepts and strategies for effective programs. *John Wiley & Sons*. 2019. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Emergency+Management%3A+Concepts+and+Strategies+for+Effective+Programs%2C+2nd+Edition-p-9781119560470>

47. Lindell M. K., Murray-Tuite P., Wolshon B., Baker E. J. Large-scale evacuation: The analysis, modeling, and management of emergency relocation from hazardous areas. CRC Press, 2018. 346 p.

48. Лахно В. А., Гусєв Б. С., Блозва А. І., Сагун А. В., Осипова Т. Ю., Порохня І. М. Розробка системи підтримки прийняття рішень для аналізу надзвичайних ситуацій на міському транспорті. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2021. 4(12). С. 6–18.

49. Кунанець Н., Пасічник В., Химич Г. Досвід реалізації проєктів класу Розумне місто на основі інформаційних і телекомунікаційних технологій. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2016. № 14. С. 17–37.

50. Lee J. H., Phaal R., Lee S.-H. An integrated service-device-technology roadmap for smart city development. *Technological Forecasting & Social Change*. 2013. 80(2). P. 286–306.

51. Batty M., Axhausen K. W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G. and Portugali Y. Smart cities of the future. *European Physical Journal*. 2012. № 214. P. 481–518.

52. Momynkulov Z., Dosbayev Z., Suliman A., Abduraimova B., Smailov N., Zhekambayeva M., Zhamangarin D. Fast Detection and Classification of Dangerous Urban Sounds Using Deep Learning. *Computers, Materials & Continua*. 2023. 75. P. 2191–2208. DOI: 10.32604/cmc.2023.036205

53. Dosbayev Z., Abdrakhmanov R., Akhmetova O., Nurtas M., Iztayev Z., Zhaidakbaeva L., Shaimerdenova L. Audio surveillance: detection of audio-based emergency situations. *In International Conference on Computational Collective Intelligence*, (September, 2021). Cham: Springer International Publishing. P. 413–424.
54. Fan H., Tariq S., Zayed T. Acoustic leak detection approaches for water pipelines. *Automation in construction*. 2022. 138. P. 104226. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522000991>
55. Zeng F., Pang C., Tang H. Sensors on the internet of things systems for urban disaster management: a systematic literature review. *Sensors*. 2023. 23(17). P. 7475. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7475>
56. Yasin H. M., Zeebaree S. R., Sadeeq M. A., Ameen S. Y., Ibrahim I. M., Zebari R. R., Sallow A. B. IoT and ICT based smart water management, monitoring and controlling system: A review. *Asian Journal of Research in Computer Science*. 2021. 8(2). P. 42–56.
57. Asha P., Natrayan L., Geetha B. T., Beulah J. R., Sumathy R., Varalakshmi G., Neelakandan S. IoT enabled environmental toxicology for air pollution monitoring using AI techniques. *Environmental research*. 2022. 205. P. 112574. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112574
58. Singh R., Sharma R., Akram S. V., Gehlot A., Buddhi D., Malik P. K., Arya R. Highway 4.0: Digitalization of highways for vulnerable road safety development with intelligent IoT sensors and machine learning. *Safety science*. 2021. 143. P. 105–407.
59. Yugank H. K., Sharma R., Gupta S. H. An approach to analyse energy consumption of an IoT system. *International Journal of Information Technology*. 2022. 14(5). P. 2549–2558.
60. Peng T., Ke W. Urban fire emergency management based on big data intelligent processing system and Internet of Things. *Optik*. 2023. 273. P. 170433.
61. Raghunandan K. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). *In Introduction to Wireless Communications and Networks: A Practical Perspective*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 321–337.

62. Olsen T., Chen H. Y., Gehman S., Hosack T. H., & Smith W. Securing the City: Essential Practices for SCADA System Management. (2024). 12 p. URL: <https://hdl.handle.net/2092/2284>

63. Aifadopoulou G., Chaniotakis E., Stamos I., Mamarikas S., Mitsakis E. An intelligent decision support system for managing natural and man-made disasters. *International Journal of Decision Support Systems*. 2018. 3(1/2). P. 91–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/327094192_An_intelligent_decision_support_system_for_managing_natural_and_man-made_disasters

64. Hildmann H., Kovacs E. Using unmanned aerial vehicles (UAVs) as mobile sensing platforms (MSPs) for disaster response, civil security and public safety. *Drones*. 2019. 3(3). P. 59. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/3/59>

65. Bae J., Moon B. Time synchronization in wireless sensor networks. InTech, 2010. P. 253–280. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/12455>

66. Paul A. K., Sato T. Localization in wireless sensor networks: A survey on algorithms, measurement techniques, applications and challenges. *Journal of sensor and actuator networks*. 2017. 6(4). P. 24. URL: <https://waseda.elsevierpure.com/en/publications/localization-in-wireless-sensor-networks-a-survey-on-algorithms-m>

67. Skorobohatko S., Fesenko H. Перспективи використання літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень компонентами системи моніторингу потенційно небезпечних об'єктів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. 4(70). С. 145–152.

68. Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city. *Future Generation Computer Systems*. 2020. 112. P. 630–640.

69. Андрушко М. В., Кузьміч О. Є., Аркушенко П. Л., Андрушко А. М. Особливості використання програмних засобів SCADA та Catman в інформаційно-вимірювальній системі для проведення випробувань ОБТ. *Збірник наукових праць ДНДІ СВС ОБТ*. 2023. (15) 1. С. 8–14. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/243/235>

70. Chan A.C.F., Zhou J. Toward safe integration of legacy SCADA systems in

the smart grid. *In International Conference on Applied Cryptography and Network Security*, (June 2022). Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 338–357.

71. Fenais A., Ariaratnam S. T., Ayer S. K., Smilovsky N. Integrating geographic information systems and augmented reality for mapping underground utilities. *Infrastructures*. 2019. 4(4). P. 60.

72. Векерик О., Стринадко М. Оптичні сенсорні мережі для моніторингу в реальному часі в умовах міських комунікацій. *Молодий вчений*. 2024. 7 (131). С. 23–29. DOI: 10.32839/2304-5809/2024-7-131-8.

73. Підгорний М. В., Смоляр Р. А. Комп'ютерне моделювання систем централізованого теплопостачання на основі ГІС. Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» ІТОНТ-2024, / м. Черкаси, 23–24 травня 2024 р. С. 41–43.

74. Вересюк А. А. Об'єктно-просторове планування територій та цифровізація міського середовища на основі інтеграції сучасних інформаційних технологій. Відповідальний за випуск: д. е. н., проф. Згалат-Лозинська Л. О., 2024. 384 с.

75. Liu H. Design of Water Supply, Drainage and Fire Water System for Construction Projects in the Context of Energy Conservation and Emission Reduction. In *Smart Infrastructures in the IoT Era*. Springer Nature Switzerland, 2025. P. 109–121.

76. Chen F., Burgos R., Boroyevich D., Vasquez J. C., Guerrero J. M. Investigation of nonlinear droop control in DC power distribution systems: Load sharing, voltage regulation, efficiency, and stability. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. 34(10). P. 9404–9421.

77. Fontaine P., Minner S., Schiffer M. Smart and sustainable city logistics: Design, consolidation, and regulation. *European Journal of Operational Research*. 2023. 307(3). P. 1071–1084. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.09.022

78. Zorpas A. A. Strategy development in the framework of waste management. *Science of the total environment*. 2020. 716. P. 137088. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137088

79. Brunner P. H., Rechberger H. Waste to energy—key element for sustainable waste management. *Waste management*. 2015. 37. P. 3–12. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X14000543>

80. Sanderson D. Urban disaster resilience: New dimensions from international practice in the built environment. In *Urban disaster resilience*, April 2016. P. 3–15. URL: https://www.researchgate.net/publication/308026466_Urban_disaster_resilience_New_dimensions_from_international_practice

81. Shadabfar M., Mahsuli M., Zhang Y., Xue Y., Ayyub B. M., Huang H., Medina R. A. Resilience-based design of infrastructure: Review of models, methodologies, and computational tools. ASCE-ASME. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2022. 8(1). P. 03121004.

82. Wang J., Zuo W., Rhode-Barbarigos L., Lu X., Wang J., Lin Y. Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. 183. P. 360–373.

83. Asghari F., Piadeh F., Egyir D., Yousefi H., Rizzuto J. P., Campos L. C., Behzadian K. Resilience assessment in urban water infrastructure: a critical review of approaches, strategies and applications. *Sustainability*. 2023. 15(14). P. 11151. DOI: 10.3390/su151411151

84. Barnes B., Dunn S., Pearson C., Wilkinson S. Improving human behaviour in macroscale city evacuation agent-based simulation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. 60. P. 102289.

85. Туровська Г. І., Богданенко О. В. Моделювання сценаріїв аварійних ситуацій за допомогою реляційної моделі таблиць рішень. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2021. 1(6)-2(7). С. 131–140.

86. Невольніченко А. І., Чумаченко С. М., Михайлова А. В., Пиріков О. В., Мурасов Р. К. Моделювання загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури з використанням методу системної динаміки. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. (3). С. 88–99.

87. Pell A., Meingast A., Schauer O. Trends in real-time traffic

simulation. *Transportation research procedia*. 2017. 25. P. 1477–1484.

88. Mustapha A., Abdul-Rani A. M., Saad N., Mustapha M. Advancements in Traffic Simulation for Enhanced Road Safety: A Review. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2024. 91. P. 103017. URL: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4kzyQOG7/>

89. Зацерковний В. І., Демидов В. К., Цюпа І. В., Малік Т. М. Моделювання в ГІС. 2024. 420 с.

90. Shahverdi B., Miller-Hooks E., Isaac S. Integrating human infrastructure in post-disaster critical lifeline restoration scheduling. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2024. 108. P. 104544.

91. Ganji A., & Miles S. Toward Human-Centered Simulation Modeling for Critical Infrastructure Disaster Recovery Planning. In *2018 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, (October 2018). IEEE, 2018. P. 1–8.

92. Oster M. R., Amburg I., Chatterjee S., Eisenberg D. A., Thomas D. G., Pan F., Ganguly A. R. A tri-level optimization model for interdependent infrastructure network resilience against compound hazard events. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2024. 47. P. 100723.

93. Alcaraz C., Zeadally S. Critical infrastructure protection: Requirements and challenges for the 21st century. *International journal of critical infrastructure protection*. 2015. 8. P. 53–66.

94. Wiseman E., Defence R. Critical infrastructure protection and resilience literature survey: modeling and simulation. Defence Research and Development Canada. Roach, 2014. 64 p. URL: https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc379/p814026_A1b.pdf

95. Al-Saidi M. Rethinking infrastructure rehabilitation: Conflict resilience of urban water and energy supply in the Middle East and South Sudan. *Energy Research & Social Science*. 2021. 76. P. 102052.

96. Ashhar M. Z. M., Haw L. C. Development of amphibious mobile solar power generator with ultra water filtration system for disaster relief. *Jurnal Kejuruteraan*. 2023. 35(2). P. 399–410.

97. Krishna K. S., Kumar K. S. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 52. P. 907–916.
98. Fedak W., Anweiler S., Ulbrich R., Jarosz B. The concept of autonomous power supply system fed with renewable energy sources. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2017. 5(4). P. 579–589.
99. Weitemeyer S., Kleinhans D., Vogt T., Agert C. Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage. *Renewable Energy*. 2015. 75. P. 14–20.
100. Iweh C. D., Gyamfi S., Tanyi E., Effah-Donyina E. Distributed generation and renewable energy integration into the grid: Prerequisites, push factors, practical options, issues and merits. *Energies*. 2021. 14(17). P. 53–75.
101. Alqahtani A., Abhishek R., Tipper D., Medhi D. Disaster recovery power and communications for smart critical infrastructures. *In 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, (May 2018). IEEE, 2018. P. 1–6.
102. Кіндрачук М. В., Куцова В. З., Ковзель М. А., Тісов О. В. Сучасні функціональні матеріали з бейнітною наноструктурною матрицею та підвищеними трибологічними властивостями. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. (1). С. 112–130.
103. Богомол Ю. І. Фізико-хімічні основи керування структурою та властивостями армованих керамічних матеріалів для роботи в екстремальних умовах експлуатації: автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали. Київ, 2019. 45 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/bb35feaf-f001-49d1-9c93-101305674d5a>
104. Hu K., Kulkarni D. D., Choi I., Tsukruk V. V. Graphene-polymer nanocomposites for structural and functional applications. *Progress in polymer science*. 2014. 39(11). P. 1934–1972.
105. Kumar A., Sharma K., Dixit A. R. A review of the mechanical and thermal properties of graphene and its hybrid polymer nanocomposites for structural applications. *Journal of materials science*. 2019. 54(8). P. 5992–6026.

106. Tsuji N., Gholizadeh R., Ueji R., Kamikawa N., Zhao, L., Tian Y., Shibata A. Formation mechanism of ultrafine grained microstructures: various possibilities for fabricating bulk nanostructured metals and alloys. *Materials transactions*. 2019. 60(8). P. 1518–1532.
107. Whang S. H. Nanostructured metals and alloys: processing, microstructure, mechanical properties and applications. Elsevier, 2011. 840 p.
108. Silvestre J., Silvestre N., De Brito J. An overview on the improvement of mechanical properties of ceramics nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*. 2015. 2015(1). P. 106–494.
109. Gibson R. F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite structures*. 2010. 92(12). P. 2793–2810.
110. Rahman S., Khan S. B. Development, Characterization and Testing of Nickel Titanium Based High Temperature Shape Memory Alloys: Doctoral dissertation, SMME. 2016, 138 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/345740836_Titanium_Based_Shape_Memory_Alloys
111. Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K., Galiotis C. Carbon nanotube–polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in polymer science*. 2010. 35(3). P. 357–401.
112. Khan F.S.A., Mubarak N. M., Khalid M., Khan M. M., Tan Y. H., Walvekar R., Rahman M. E. Comprehensive review on carbon nanotubes embedded in different metal and polymer matrix: fabrications and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2022. 47(6). P. 837–864.
113. Shi Z. Y., Cui P., Li X. A review on research progress of machining technologies of carbon fiber-reinforced polymer and aramid fiber-reinforced polymer. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. 233(13). P. 4508–4520.
114. Mamo G., Mattiasson B. Alkaliphiles: the emerging biological tools enhancing concrete durability. *Alkaliphiles in Biotechnology*. 2020. 172. P. 293–342.

URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31041481/>

115. Hassan H., Rodriguez-Ubinas E., Al Tamimi A., Trepici E., Mansouri A., Almehairbi K. Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction. *Automation in Construction*. 2024. 163. P. 105–417.

116. Góra M., Bańkosz M., Tyliczszak B. Use of innovative methods to produce highly insulating walls using 3D-printing technology. *Materials*. 2024. 17(16). P. 3990. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/16/3990>

117. Nosonovsky M., Bhushan B. Superhydrophobic surfaces and emerging applications: Non-adhesion, energy, green engineering. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2009. 14(4). P. 270–280.

118. Cheng Y., Ma B., Hu P., Zhang J., Hu D., Wang J. Flexible and transformable ceramic aerogels via a fire-reborn strategy for thermal superinsulation in extreme conditions. *Advanced Functional Materials*. 2023. 33(52). P. 2309148.

119. Скоробагатько Т., Пруський А., Маловик І., Прокоф'єв М., Якіменко М., Середа Д. Особливості діяльності газодимозахисників в умовах можливого бойового ураження. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. №1(17). С. 15–28.

120. Murphy P., Greenhalgh K. (Eds.). Fire and rescue services: Leadership and management perspectives. Springer, 2017. 240 p. DOI: 10.1007/978-3-319-62155-5

121. Qi Y., Zhao X., El-Sayed H., Wu B. Emergency supply control from the perspectives of peacetime and wartime: A system dynamics simulation. *Complex System Modeling and Simulation*. 2021. 1(4). P. 322–334.

122. Chauhan V., Secor-Jones, S., Paladino L., Sardesai I., Ratnayake A., Stawicki S. P., Galwankar S. C. Emergency departments: preparing for a new war. *Journal of Emergencies, Trauma, and Shock*. 2022. 15(4). P. 157–161.

123. Іванюта С. П., Панов Є. М., Іваненко О. І., Гапон С. В. Оцінка ризиків критичній інфраструктурі України в умовах російської військової

агресії. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. (2). С. 47–61. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307360

124. Andrew L. The vulnerability of vital systems: how 'critical infrastructure' became a security problem. In *Securing 'the Homeland'* Routledge. 2020. P. 17–39. URL: https://stephenjcollier.com/wp-content/uploads/2012/07/collier_lakoff_vulnerability_2008.pdf

125. Aebi S., Hauri A., Kamberaj J. Critical infrastructure resilience in Ukraine: Energy, transportation, and communication. CSS Risk and Resilience Reports. 2024. 42 p. URL: <https://css.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/RR-Report-2024-Critical-Infrastructure-Resilience.pdf>

126. Giannopoulos G., Filippini R., Schimmer M. Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection. *JRC Technical Notes*. 2012. Part 1. P. 1–53.

127. Мурасов Р., Мельник Я., Марко В. Порівняння існуючих методик оцінювання загроз і ризиків для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в зоні ведення бойових дій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2022. 45(3). С. 32–36. DOI: 10.33099/2311-7249/2022-45-3-32-36

128. Kaplia I., Tertyshnyy B. Методика оцінювання загроз об'єктам критичної інфраструктури під час вогневого впливу противника. *Social Development and Security*. 2024. 14(5). P. 215–221.

129. Kurtseitov T., Murasov R., Melnyk Y. Calculating the reliability of a critical infrastructure system by decomposing it as a complex system. *Social Development and Security*. 2022. 12(5). P. 84–92. DOI: 10.33445/sds.2022.12.5.8

130. Уряднікова І. В., Чумаченко С. М., Кармазін С. В., Тесленко О. М. Застосування експертно-аналітичних методів для оцінювання ризиків надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури. *Науковий вісник Академії муніципального управління*. Серія: Техніка. 1. 2015. С. 206–218.

131. Murasov R. The method of risk assessment for critical infrastructure in the conditions of hostilities, taking into account their destructive and cumulative potential. *Social Development and Security*. 2023. 13(1). P. 152–160. DOI: 10.33445/sds.2023.13.1.13.

132. Мурасов Р., Нікітін А., Мещеряков І., Підгородецький М., Поплавець С. Методика оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. 48(3). С. 35–43. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-48-3-35-43

133. Bondarenko S., Korotchenko O. Стійкість як новітній концепт енергетичної безпеки. *Social Development and Security*. 2023. 13(6). P. 215–240.

134. Good Governance for Critical Infrastructure Resilience. URL: https://www.oecd.org/en/publications/good-governance-for-critical-infrastructure-resilience_02f0e5a0-en.html

135. Endicott N. Preparing an Emergency Water Supply Program. *Journal: American Water Works Association*. 2023. 115(5). 3. 74–77. DOI: 10.1002/awwa.2111

136. Steele A. Factors Impacting on the Appropriateness of Water Treatment and Supply Processes for Post-emergency Water Supply Systems. University of Surrey (United Kingdom), 2010. 24 p.

137. Weber J. A., Gao W., KouX., Zhai J. Z. Small scale mobile hybrid integrated renewable energy system (HI-RES) for rapid recovery and emergency response. In 2015 Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference (April 2015). IEEE, 2015. P. 50–57.

138. Borodinecs A., Zajecs D., Lebedeva K., Bogdanovics R. Mobile off-grid energy generation unit for temporary energy supply. *Applied Sciences*. 2022. 12(2). 673 p.

139. Trypolska G., Gradziuk P., Semeniuk A., Podolets R., Diachuk O. Advancing Heat Pump Adoption in Ukraine's Low-Carbon Energy Transition. *Energies*. 2024. 17(23). P. 61–72.

140. Kholoshyn I. V., Syvyj M. J., Mantulenko S. V., Shevchenko O. L., Sherick D., Mantulenko K. M. Assessment of military destruction in Ukraine and its consequences using remote sensing. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2023, October). Vol. 1254, No. 1. IOP Publishing, 2023. P. 012132
141. Duncan E. C., Skakun S., Kariryaa A., Prishchepov A. V. Detection and mapping of artillery craters with very high spatial resolution satellite imagery and deep learning. *Science of Remote Sensing*. 2023. 7. P. 100092.
142. Phillips B. D., Mincin J. Disaster recovery. Routledge. Becker C. Disaster recovery: a local government responsibility. *Public Management*. 2009. 91(2). P. 6–12.
143. Amatya B., Lee S. Y., Galea M. P., Khan F. Disaster rehabilitation response plan: now or never. *American journal of physical medicine & rehabilitation*. 2020. 99(2). P. 170–177.
144. Kulikov P., Aziukovskyi O., Vahonova O., Bondar O., Akimova L., Akimov O. Post-war economy of Ukraine: Innovation and investment development project. *Economic Affairs*. 2022. Vol. 67. No. 05. P. 943–959. DOI: 10.46852/0424-2513.5.2022.30
145. Becker T., Eichengreen B. J., Gorodnichenko Y., Guriev S., Johnson S., Mylovanov T., Weder di Mauro B. A. Blueprint for the Reconstruction of Ukraine. 2022. 40 p. URL: https://cepr.org/system/files/publication-files/147614-a_blueprint_for_the_reconstruction_of_ukraine.pdf
146. Liu S. C., Peng F. L., Qiao Y. K., Zhang J. B. Evaluating disaster prevention benefits of underground space from the perspective of urban resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. 58.P. 102–206.
147. Canto-Perello J., Curiel-Esparza J., & Calvo V. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space. *Expert Systems with Applications*. 2013. 40(11).P. 4707–4714.
148. Tudor C. Geospatial Information Systems (GIS) in Military Operations. In International scientific conference strategies XXI. The Complex and Dynamic

Nature of the Security Environment-Volume Carol I National Defence University Publishing House 2, 2018. P. 254–261.

149. Read R., Taithe B., Mac Ginty R. Data hubris? Humanitarian information systems and the mirage of technology. *Third World Quarterly*. 2016. 37(8). P. 1314–1331.

150. Pospelov B., Rybka E., Meleschenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. Issue 10 (97). P. 29–35.

151. Комарницький І. М., Бублик М. І. Оцінка техногенних збитків та аналіз підходів до їхнього розрахунку у глобальному та регіональному аспектах. URL: vlp.com.ua/files/21_31.pdf

152. Altay N., Green W. G. OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*. 2006. № 175. P. 475–493.

153. Cities At Risk – Making Cities Safer Before Disaster Strikes URL: <https://www.alnap.org/system/files/content/resource/files/main/IDNDR%201996.pdf>

154. Pan American Health Organization. Emergencies and Disasters in Drinking Water Supply and Sewerage Systems: Guidelines for Effective Response Washington, D.C.: PAHO, 2002. 104 p.

155. Dudin A. N., Nishimura S. Optimal hysteresis control for a BMAP/SM/1/N queue with two operation modes. *Mathematical Problems in the Engineering*. 2000. № 5. P. 397–420.

156. Schller J. C. H. Brinkman L., Van Gestel P. J., van Otterloo R. W. Methods for determining and processing probabilities «Red Book». The Netherlands: Committee for Prevention of Disasters, 1997. 604 p.

157. Іщенко Г. Г. Аналіз та прогноз природно-техногенної безпеки великих міст із застосуванням нелінійних методів. *Економіка і держава*. 2009. № 8. С. 48–53.

158. Kapucu Naim. Disaster and emergency management systems in urban areas. *Cities*. 2012. 29. P. 41–49.

159. Duffuaa S. O., Khan M. An optimal repeat inspection plan with several classifications. *Journal of the Operational Research Society*. 2002. № 53(9). P. 1016–1026.
160. Dudin A., Semenova O. A stable algorithm for stationary distribution calculation for a BMAP/SM/1 queueing system with *Markovian arrival input of disasters*. *Journal of Applied Probability*. 2004. № 41 (2). P. 547–556.
161. Yaqin He, Shengpin Du. Classification of Urban Emergency Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Procedia Engineering*. 2016. 137. P. 630–638
162. JIANG Xuepeng, Zhisheng XU, Research on Grading of Highway Tunnel Accidents and the Emergency Response. *Journal of Catastrophology*. 2008. 23(4). P. 91–95.
163. Xuewei J. I., Weng Wenguo, Shunjiang N. I. Warning classification model for public emergencies. *Journal of Tsinghua University*. 2008. 48(8). P. 1252–1255.
164. Bronger D., Metropolen, Megastädte, Global Cities. Die Metropolisierung der Erde. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. 2004. 244 p.
165. Internation Federation of Red Cross and Red Crescent Societes. URL: <https://media.ifrc.org/ifrc/>
166. Терент'єва А. В. Управління надзвичайними ситуаціями з елементами кризового менеджменту. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2015. № 9. С. 23–28.
167. Барило О. Г., Потеряйко С. П., Тищенко В. О. Удосконалення процесу управління у надзвичайних ситуаціях. *Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Управління*. 2013. 2(13). С. 119–124.
168. Kyriakidis P., Journel A. Geostatistical space-time models: a review. *Mathematical Geology*. 1999. Vol. 31. P. 651–684.
169. Долинський І. П., Лобасов О. П., Огарков В. М. Лінійна інтерполяція на триангульованій області як метод побудови 2D моделей параметрів за відсутності апіорної інформації *Теоретичні та прикладні*

аспекти геоінформатики. 2015. Вип. 12. С. 95–102.

170. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.

171. Новожилова М. В., Чуб О. І., Мележик Р. С. Концепція сіті-логістики в управління мегаполісом. *Комунальне господарство міст*. 2018. Т. 7. №146. С. 193–197.

172. Коломієць С. В. Теорія випадкових процесів. Суми: ДВНЗ «УАБС НБУ», 2013. Ч. II. 103 с.

173. Томашевський В. М. Моделювання систем. Київ, Видавнича група BHV. 2005. 351 с.

174. Мележик Р. С. Особливості техногенних надзвичайних ситуацій на інженерних мережах мегаполісу. *Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків: НУЦЗУ, 20 травня 2020 р., Харків, 2020*. С. 112–113.

175. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17.02.11 № 3038-VI. Редакція від 01.08.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>

176. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Методики оцінки збитків та наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру» від 15.02.2002 № 175. Редакція від 04.06.2003. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-%D0%BF#Text>

177. Постанова Кабінету Міністрів України «Про перелік видів діяльності та об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку» від 28.08.2013 № 808. Редакція від 28.02.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/808-2013-%D0%BF#Text>

178. Новожилова М. В., Чуб О. І., Михайловська Ю. В., Гудак Р. В., Мележик Р. С. Розробка ієрархічної стратегії підвищення рівня техногенної безпеки території. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 30. С. 164–177.

179. Чуб І. А., Мележик Р. С., Новожилова М. В. Оцінювання просторово

розподілених статистичних даних щодо стану виробничої бази мегаполісу як джерела надзвичайних ситуацій техногенного характеру. *Профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій*: збірник матеріалів наук.-практ. семінару, м. Харків: НУЦЗУ, 19 квітня 2017 р. Харків, 2017. С. 61–63.

180. Комплексна модель прогнозування та забезпечення ліквідації надзвичайних ситуацій у системі моніторингу небезпечних подій. URL: https://www.researchgate.net/publication/336317884_Kompleksna_model_prognozuvannya_ta_zabezpecnna_likvidacii_nadzvicajnih_situacij_u_sistemi_monitoringu_nebezpecnih_podij

181. Про створення Урядової інформаційно-аналітичної системи з питань надзвичайних ситуацій: Постанова КМУ № 2303 від 16.12.1999. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2303-99-%D0%BF>

182. Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control, 2015. 712 p.

183. Hanke J. E., Wichern D. W. Business forecasting. Harlow: Pearson Educated Limited, 2014. 505 p.

184. Офіційний сайт системи Scilab. URL: <http://www.scilab.org>

185. Офіційний сайт Національного дослідницького інституту інформатики і автоматизації INRIA. URL: <https://www.inria.fr/en>

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

A1. Рогозін А. С., **Мележик Р. С.** Моделювання оперативної діяльності підрозділів оперативно-рятувальної служби. Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 3(47). С. 96–99.

Здобувачу особисто належить аналіз інструментальних засобів прогнозування надзвичайних ситуацій техногенного характеру в умовах мегаполісу

A2. Новожилова М. В., Чуб О. І. **Мележик Р. С.** Прогнозування параметрів надзвичайної ситуації техногенного характеру мегаполіса в умовах мегаполісу. Колективна монографія «Інформаційні системи і технології в міському просторі». Харків: ХНУМГ імені О.М. Бекетова, 2019. С. 150–166.

Здобувачу особисто належить побудова просторово-часової імітаційної моделі виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації із застосуванням нестационарного розподілу Пуассона як аналітичного опису випадкових моментів реалізації надзвичайної ситуації

A3. Новожилова М. В., Чуб І. А., **Мележик Р. С.** Імітаційне моделювання міської інженерної інфраструктури як джерела техногенної надзвичайної ситуації. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. Вип. 27. С. 169–174.

Здобувачу особисто належить формування імітаційної моделі виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури міста

A4. Новожилова М. В., Чуб О. І., Мележик Р. С. Концепція city-логістики в управлінні мегаполісом. Комунальне господарство міст. 2018. № 139. С. 115–119.

Здобувачу особисто належить аналіз шляхів використання концепції сіті-логістики при формуванні програми розвитку житлово-комунального господарства мегаполісу з точки зору підвищення рівня техногенної безпеки

A5. Чуб О. І., Новожилова М. В., Мележик Р. С. Модель функціонування логістичної інфраструктури мегаполіса в умовах надзвичайної ситуації техногенного характеру. Радіоелектроніка і інформатика. 2018. № 4. С. 26–31.

Здобувачу особисто належить формулювання моделювання параметрів можливої надзвичайної ситуації техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури як заявки на обслуговування логістичною підсистемою системи техногенної безпеки мегаполісу

A6. Novozhylova M. V., Andronov V. A., **Melezhik R. S.** Computer modeling parameters of technogenic emergency situations on engineering infrastructure of the megapolis. Radio Electronics, Computer Science. Control. 2021. № 1. P. 66–77.

Видання включене до наукометричної бази Web of Science.

Здобувачу особисто належить формулювання узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів територіальної системи техногенної безпеки в режимі техногенної надзвичайної ситуації

A7. Miasoiedova A., Minska N., Shevchenko R., Azarenko O., Lukashenko V., Kyrychenko O., Zemlianskyi O., Trefilova L., Kamyshentsev G., **Melezhyk R.** Improving the manufacturing technology of sensing gas sensors based on zinc oxide by using the method of magnetron sputtering on direct current. Esteem-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. 2023. Vol. 2. № 5(122). P. 31–37.

Видання включене до наукометричної бази Web of Science.

Здобувачу особисто належать аналіз літературних та інформаційних джерел та формування логічних зав'язків інформаційної моделі управління надзвичайною ситуацією техногенного характеру

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

А8. Чуб І. А., Мележик Р. С., Новожилова М. В. Оцінювання просторово розподілених статистичних даних щодо стану виробничої бази мегаполісу як джерела надзвичайних ситуацій техногенного характеру. *Профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій* : збірник матеріалів наук.-практ. сем., м. Харків, 19 квітня 2017 р. / Харків НУЦЗУ. 2017. С. 61–63. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить побудова аналітичної ймовірнісної прогнозної моделі просторово-часових рядів відмов з урахуванням можливого ступеню важкості наслідків техногенної надзвичайної ситуації

А9. Чуб І. А., Попов В. М., Мележик Р. С. Формалізація задачі прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій. *Інформаційні системи та технології ICT-2017* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. м. Коблево, 11–16 вересня 2017 р. / Харків, 2017. С. 61–63. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить побудова просторово-часової імітаційної моделі виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації із застосуванням нестационарного розподілу Пуассона як аналітичного опису випадкових моментів реалізації надзвичайної ситуації

А10. Чуб І. А., Михайловська Ю. В., Мележик Р. С. Прогнозування ресурсного забезпечення ліквідації техногенної надзвичайної ситуації. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку* : матеріали XIX Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, м. Київ. ІДУЦЗ, 10–11 жовтня 2017 р. / Київ, 2017. С. 358–360. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить формулювання узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів територіальної системи техногенної безпеки в режимі техногенної надзвичайної ситуації

A11. Чуб І. А., Новожилова М. В., Мележик Р. С. Розподіл надзвичайних ситуацій на інженерній інфраструктурі мегаполісу. *Інформаційні системи та технології ICT-2018* : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Коблево, 10–15 вересня 2018 р. / Харків, 2018. С. 247–249. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить побудова карт ймовірності, які дозволяють визначити локальну функцію розподілу в точці оцінювання, а також отримати набір рівноймовірних стохастичних просторових реалізацій розподілу змінної, що спостерігається, при реалізації імітаційної моделі виробничої системи мегаполісу

A12. Мележик Р. С. Прогнозування виникнення і розвитку надзвичайних ситуацій техногенного характеру на елементах інженерної інфраструктури мегаполісу. *Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах* : Матеріали 21 Всеук. наук.-практ. конф., 15–16 жовтня 2019 р. / Київ. тез. доп. Київ, ІДУЦЗ. 2019. С. 184–186. (Форма участі – заочна).

A13. Чуб І. А., Мележик Р. С. Імітаційне моделювання міської інженерної інфраструктури як джерела техногенної надзвичайної ситуації в мегаполісі. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням* : матеріали круг. столу, м. Харків, 24 жовтня 2019 р. / Харків, НУЦЗУ. 2019. С. 129–131. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить параметрична та структурна ідентифікація імітаційної моделі прогнозу виникнення та розвитку техногенної надзвичайної ситуації в умовах міського середовища

A14. Мележик Р. С. Особливості техногенних надзвичайних ситуацій на інженерних мережах мегаполісу. *Проблеми надзвичайних ситуацій* :

матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 20 травня 2020 р. / Харків, НУЦЗУ. 2020. С. 112–113. (Форма участі – заочна).

A15. Мележик Р. С., Михайловська Ю. М. Проектування системи підтримки прийняття рішень з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру Інформаційні технології. *Теорія і практика* : тези доповідей III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. здобув. вищої освіти і молодих учених, м. Харків, ХНУМГ імені О. М. Бекетова 3–5 червня 2020 р. / Харків, 2020. С. 72–73. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить математична процедура врахування ієрархії управління та інтеграції моделей рішень, що відповідають певним етапам управління процесом ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру

A16 Мележик Р. С. Імітаційне моделювання міської інженерної інфраструктури. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 02 квітня 2022 р. / Харків, НУЦЗУ. 2022. С. 62–63. (Форма участі – заочна).

A17. Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Мележик Р. С., Щолоков Е. Е. Спосіб протипожежного захисту нормально відкритих отворів в перекриттях. XII International Scientific And Practical Conference «*Development Trends And Improvement Of Old Methods*». Warsaw, Poland, December 12–15. 2023. P. 418–421.

Здобувачу особисто належить математична процедура врахування ієрархії управління та інтеграції моделей рішень, що відповідають певним етапам управління процесом ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора з
експлуатації водопровідного
господарства-директор Комплексу
«Харківводопостачання»

Владлен ВОЛКОВ

« 17 » 12 20 24 р.

АКТ

про впровадження матеріалів дисертаційної роботи
ад'юнкта Національного університету цивільного захисту України
Мележика Романа Сергійовича

Комісія в складі:

Крижановський Дмитро Володимирович, заступник директора з
експлуатації Комплексу «Харківводопостачання»

Целогородцев Андрій Володимирович, начальник служби
водопровідних мереж Шевченківського району Комплексу
«Харківводопостачання»

склав даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень
Мележика Романа Сергійовича, а саме:

- комп'ютерна імітаційна модель виникнення і розвитку надзвичайної ситуації техногенного характеру на водопровідних мережах міста Харкова;
- складові апаратно-програмного комплексу щодо оптимізації процесу ресурсного забезпечення ліквідації надзвичайної ситуації техногенного характеру та мінімізації її наслідків

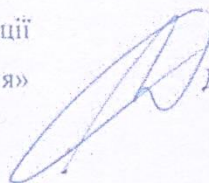
були впроваджені в практичну діяльність комунальне підприємство «Харківводоканал» комплекс «Харківводопостачання».

Акт не є підставою для отримання Мележиком Романом Сергійовичем винагороди з фондів комунальне підприємство «Харківводоканал» комплекс «Харківводопостачання» за використання результатів його дисертаційних досліджень.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом Мележиком Романом Сергійовичем дисертації на здобуття освітньо-наукового ступеня доктор філософії.

Заступник директора з експлуатації
Комплекс «Харківводопостачання»

« 17 » грудня 20 24 р.



Дмитро КРИЖАНОВСЬКИЙ

Начальник служби водопровідних мереж
Шевченківського району Комплекс
«Харківводопостачання»

« 17 » грудня 20 24 р.



Андрій ЦЕЛОГОРОДЦЕВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Олександрійського МРВ
Управління ДСНС України
у Кіровоградській області



Дмитро КОЛІСНИК

« 19 » 12 20 24 р.

АКТ

про впровадження матеріалів дисертаційної роботи
ад'юнкта Національного університету цивільного захисту України
Мележика Романа Сергійовича

Комісія в складі:

Пальонний Олександр Миколайович, начальник 2 державного пожежно-рятувального загону Управління ДСНС України у Кіровоградській області

Королько Олександр Володимирович, начальник сектору цивільного захисту Олександрійського МРВ Управління ДСНС України у Кіровоградській області

склав даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень Мележика Романа Сергійовича, а саме:

- комп'ютерної імітаційної моделі виникнення і розвитку надзвичайної ситуації техногенного характеру на водопровідних мережах міста Олександрія;
- складові апаратно-програмного комплексу щодо оптимізації процесу ресурсного забезпечення ліквідації надзвичайної ситуації техногенного характеру та мінімізації її наслідків.

були впроваджені в практичну діяльність Олександрійського МРВ Управління ДСНС України в Кіровоградській області.

Акт не є підставою для отримання Мележиком Романом Сергійовичем винагороди з фондів Олександрійського МРВ Управління ДСНС України в Кіровоградській області за використання результатів його дисертаційних досліджень.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом Мележиком Романом Сергійовичем дисертації на здобуття освітньо-наукового ступеня доктор філософії.

Начальник 2 ДПРЗ Управління ДСНС
України у Кіровоградській області

« 19 » 12 20 24 р



Олександр ПАЛЬОННИЙ

Начальник сектору цивільного захисту
Олександрійського МРВ Управління ДСНС
України у Кіровоградській області

« 19 » 12 20 24 р.



Олександр КОРОЛЬКО