



ТЮТЮНИК Вадим Володимирович
доктор технічних наук, професор
Професор кафедри кібербезпеки та
інформаційних технологій Харківського
національного економічного університету
імені Семена Кузнеця



ЛЄВТЄРОВ Олександр Антонович
доктор технічних наук, професор
Заступник начальника кафедри фізико-
математичних дисциплін Національного
університету цивільного захисту України



ТЮТЮНИК Ольга Олександрівна
кандидат технічних наук, доцент
Доцент кафедри інформатики та
комп'ютерної техніки Харківського
національного економічного університету
імені Семена Кузнеця



УСАЧОВ Дмитро Володимирович
доктор філософії
Доцент кафедри пожежно-рятувальної та
фізичної підготовки Національного
університету цивільного захисту України

ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
МОНІТОРИНГУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ МІСТА В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY»

**Тютюник В.В., Левтеров О.А.,
Тютюник О.О., Усачов Д.В.**

**ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАПОБІГАННЯ
НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
МОНІТОРИНГУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ МІСТА В
КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY»**

Монографія

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
Національний університет цивільного захисту України

В. В. Тютюник, О. А. Левтеров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

**ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАПОБІГАННЯ
НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
МОНІТОРИНГУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ МІСТА
В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY»**

Монографія

Рекомендовано до друку вченими радами
ХНЕУ імені Семена Кузнеця та НУЦЗ України

*Присвячується світлій пам'яті професора кафедри спеціальної хімії та хімічної
технології Національного університету цивільного захисту України
Володимира Дмитровича КАЛУГІНА*

Харків
2026

Авторський колектив:

В. В. Тютюник, доктор технічних наук, професор
О. А. Левтеров, доктор технічних наук, професор
О. О. Тютюник, кандидат технічних наук, доцент
Д. В. Усачов, доктор філософії

Рецензенти: член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор **О. О. Попов**, директор Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України;
доктор технічних наук, професор **Г. З. Халімов**, завідувач кафедри безпеки інформаційних технологій Харківського національного університету радіоелектроніки;
доктор технічних наук, професор **М. В. Кустов**, начальник науково-дослідної лабораторії РХБ захисту та аналізу загроз Національного університету цивільного захисту України

Рекомендовано до друку вченими радами Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця (протокол № 6 від 28.04.2026 р.) та Національного університету цивільного захисту України (протокол № 10 від 30.04.2026 р.)

Тютюник В. В., Левтеров О. А., Тютюник О. О., Усачов Д. В.

Інформаційно-технологічні засади запобігання надзвичайним ситуаціям за результатами моніторингу акустичного простору міста в контексті розвитку концепції «Smart City»: монографія / В. В. Тютюник, О. А. Левтеров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов. Харків: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, НУЦЗ України, 2026. 228 с.

Монографія об'єднала сучасні теоретичні та експериментальні дослідження в галузі інформаційних технологій для сфери цивільного захисту щодо підвищення ефективності концепції «Smart City» із підтримки прийняття рішень, спрямованих на запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня, шляхом впровадження системи акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст джерел небезпек.

В монографії проведено аналіз сучасного стану вирішення проблеми запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій на території міста. Розроблено структурно-функціональну модель системи безпеки міста як складової системи «Smart City». Досліджено можливості спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій на території міста. За результатами досліджень удосконалено концепцію «Smart City» щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня на основі спектрального аналізу акустичного простору.

Наукове видання призначене для фахівців з національної й цивільної безпеки та інформаційних технологій, які працюють за напрямками розвитку концепції «Smart City», безпеки критичної інфраструктури, ідентифікації джерел небезпек, прогнозування та оцінки рівня небезпек і розробки антикризових рішень, спрямованих на недопущення виникнення небезпечних подій, для науковців, науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти в галузі знань F «Інформаційні технології» та К «Безпека та оборона».

Іл. 92. Табл. 14. Бібліогр.: 219 назв.

УДК 004.9:351.861; 614.8

© Тютюник В. В., Левтеров О. А.,
Тютюник О. О., Усачов Д. В., 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИРШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА	14
1.1 Аналіз особливостей виникнення надзвичайних ситуацій місцевого рівня.....	14
1.1.1 Територіально-часові умови формування надзвичайних ситуацій на території міста	14
1.1.2 Аналіз масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами на територіях міст України	21
1.1.3 Аналіз виникнення на територіях міст надзвичайних ситуацій терористичного характеру, пов'язаних із застосуванням вогнепальної зброї.....	27
1.1.4 Аналіз виникнення на територіях міст надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів.....	33
1.2 Аналіз особливостей запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня	36
1.2.1 Умови реалізації заходів із запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня.....	36
1.2.2 Огляд нормативно-правової бази України у сфері запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня.....	40
1.3 Аналіз стану запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня у світі.....	45
1.3.1 Процес запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня у розвинутих країнах світу.....	45

1.3.2 Аналіз існуючих засобів та систем акустичного моніторингу небезпечних подій як джерел надзвичайних ситуацій.....	52
Висновки до розділу 1.....	61
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ МІСТА ЯК СКЛАДОВОЇ ПРОЦЕСУ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ МІСЦЕВОГО РІВНЯ В КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY».....	63
2.1 Особливості розвитку концепції «Smart City».....	63
2.2 Структурно-функціональне моделювання особливостей функціонування системи безпеки міста.....	70
2.3 Моделювання процесу застосування спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій місцевого рівня	78
Висновки до розділу 2.....	87
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА	90
3.1 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із масштабними пожежами	90
3.1.1 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із масштабними пожежами целюлозовмісних матеріалів.....	95
3.1.2 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із масштабними пожежами рідких органічних речовин.....	106
3.2 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї.....	122

3.3 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів	148
Висновки до розділу 3.....	164
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY» ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МІСЦЕВОГО РІВНЯ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ.....	168
4.1 Когнітивне моделювання особливостей функціонування критичної інфраструктури в умовах загроз та оцінка ефективності акустичного моніторингу для запобігання надзвичайним ситуаціям місцевого рівня.....	168
4.1.1 Аналіз причинно-наслідкових взаємозв'язків між елементами функціональної системи гіпотетичного об'єкта критичної інфраструктури....	168
4.1.2 Когнітивне моделювання ефективності прийняття рішень із запобігання виникненню надзвичайної ситуації на об'єкті критичної інфраструктури	175
4.1.3 Дослідження сценаріїв впливу загроз на рівень безпеки об'єкта критичної інфраструктури.....	181
4.1.4 Дослідження впливу впровадження системи акустичного моніторингу на рівень захисту об'єкта критичної інфраструктури.....	185
4.2 Розробка керуючого алгоритму реалізації концепції «Smart City» щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору	191
Висновки до розділу 4	197
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	200
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	203
ДЛЯ НОТАТОК.....	228

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕ – акустична емісія

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ГІС – геоінформаційні системи

ДБН – Державні будівельні норми України

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій

ЄДСЦЗ – єдина державна система цивільного захисту

ЄС – Європейський Союз

ЗСУ – Збройні Сили України

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології

ІТЗ ЦЗ – інженерно-технічні заходи цивільного захисту

КІ – критична інфраструктура

МН – машинне навчання

НКК – нечіткі когнітивні карти

НС – надзвичайна ситуація

ОКІ – об’єкт критичної інфраструктури

ООН – Організація Об’єднаних Націй

РОР – рідкі органічні речовини

СБУ – Служба безпеки України

США – Сполучені Штати Америки

ТТХ – тактико-технічні характеристики

ЦЗ – цивільний захист

ШІ – штучний інтелект

AGCCC – Australian Government Crisis Coordination Centre

(Австралійський урядовий координаційний центр у разі кризи)

AkSL – Akustisches Schützen-Lokalisationssystem

(Система локалізації акустичного захисту)

ASLS – Acoustic Shooter Locating System

(Акустична система визначення місцезнаходження стрільця)

AVS – Acoustic Vector Sensor

(Акустичний векторний датчик)

Big Data – Великі дані

BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

(Федеральне відомство з інформаційної безпеки)

CIIP – Critical Infrastructure Integration Programme

(Програма інтеграції критичної інфраструктури)

CISA – Cybersecurity and Infrastructure Security Agency

(Агентство з кібербезпеки та безпеки інфраструктури)

DHS – Department of Homeland Security

(Департамент внутрішньої безпеки)

DMC – Disaster Management Centre

(Центр боротьби зі стихійними лихами)

Edge Computing – Хмарні обчислення та периферійна обробка даних

e-Government – Система електронного урядування

GAN – Generative adversarial network

(Генеративно-змагальна нейронна мережа)

GCHQ – Government Communications Headquarters

(Агентство урядового зв'язку)

IoT – Internet of Things

(Інтернет речей)

ISACs – Information Sharing and Analysis Centers

(Центр обміну інформацією та аналізу)

MonET – Monitoring und Evaluation Tool

(Інструмент моніторингу та оцінки)

NCCC – National Crisis Coordination Centre

(Національний кризовий координаційний центр)

NCSC – National Cybersecurity Centre

(Центр національної кібербезпеки)

NIPP – National Infrastructure Protection Plan

(Національний план захисту інфраструктури)

NRCC – National Response Coordination Center

(Національний координаційний центр реагування)

PDCue – Projectile Detection and Cueing

(Виявлення снарядів і сигналізація)

RNN – Recurrent neural networks

(Рекурентна нейронна мережа)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

(Диспетчерське управління і збір даних)

ВСТУП

Присвячується світлій пам'яті професора кафедри спеціальної хімії та хімічної технології Національного університету цивільного захисту України, доктора хімічних наук, професора Володимира Дмитровича КАЛУГІНА

У сучасних умовах глобалізації та інтенсивного розвитку суспільства однією з ключових тенденцій є стрімке зростання рівня урбанізації, що зумовлює появу широкого спектра соціально-економічних, техногенних та екологічних проблем. Активне розширення міської інфраструктури, будівництво транспортних мереж і систем комунікацій істотно впливають на просторову організацію та динаміку розвитку міських агломерацій. За прогнозами експертів Організації Об'єднаних Націй, упродовж найближчих п'ятнадцяти років частка міського населення у світі може перевищити 60 % від загальної чисельності населення планети. Така тенденція, з одного боку, відкриває нові можливості для соціально-економічного зростання, а з іншого – формує комплекс нових викликів, пов'язаних із забезпеченням сталого та безпечного функціонування урбанізованих систем. Сучасні міста виступають центрами економічної, соціальної та культурної активності, проте водночас перетворюються на простір підвищеної концентрації ризиків. Серед них – екологічні катастрофи, масштабні пожежі, транспортні перевантаження, техногенні аварії, зростання рівня криміногенної активності та інші загрози безпеці життєдіяльності населення.

В умовах глобальної конкуренції за людський капітал, інвестиції та ресурси сучасні урбанізовані території мають забезпечувати не лише високий рівень комфортності проживання, але й гарантований рівень безпеки населення. Це стосується як організації повсякденного життя громадян, так і ефективного реагування на надзвичайні ситуації (НС) природного, техногенного чи соціального характеру. Традиційні системи міського управління дедалі частіше демонструють обмежену ефективність: інформація про події надходить із затримками, взаємодія між службами є недостатньо узгодженою, а прийняття рішень у критичних ситуаціях – несвоєчасним. У зв'язку з цим концепція

«Розумне місто» (Smart City) розглядається не лише як інноваційна модель підвищення якості життя населення, а й як стратегічний підхід до формування безпечного, адаптивного та стійкого міського середовища.

В умовах загострення безпекової ситуації в державі особливого значення набуває правове регулювання діяльності органів управління та служб реагування. В Україні запровадження правового режиму воєнного стану забезпечує посилений контроль за безпекою, координацію дій екстрених служб та оперативне реагування на НС, що виникають у містах і на об'єктах критичної інфраструктури (ОКІ).

У межах реалізації концепції «Smart City» особливого значення набуває розвиток інтелектуальних систем моніторингу міського середовища, здатних у реальному часі фіксувати, обробляти та аналізувати великі обсяги інформації про стан урбанізованого простору. Одним із перспективних напрямів такого моніторингу є аналіз акустичного простору міста, який дає змогу виявляти потенційно небезпечні події, техногенні аномалії чи НС на ранніх стадіях їх розвитку. Акустичні сигнали відображають широкий спектр процесів – від транспортних потоків і промислових шумів до звуків, що супроводжують аварії, вибухи чи порушення громадського порядку. Систематичний аналіз акустичного середовища відкриває можливості для формування інформаційно-технологічних засад запобігання надзвичайним ситуаціям, інтегрованих у загальну архітектуру «Smart City», що забезпечує підвищення рівня безпеки міста та розвиток превентивного управління ризиками.

Однією з ключових складових концепції розумного міста є впровадження інтегрованих систем, спрямованих на підвищення рівня безпеки населення. Вони поєднують інформаційно-комунікаційні технології, сенсорні мережі, алгоритми штучного інтелекту та аналіз великих даних для моніторингу та управління міськими процесами у реальному часі. Наприклад, інтелектуальні системи відеоспостереження забезпечують не лише фіксацію правопорушень, а й прогнозування потенційно небезпечних подій. Інтелектуальні транспортні системи сприяють зниженню ризику дорожньо-транспортних пригод, а сенсорні

мережі для контролю якості повітря чи рівня води дають можливість оперативно виявляти та попереджати надзвичайні екологічні ситуації.

Особливу роль у забезпеченні безпеки розумних міст відіграє інтеграція екстрених служб – поліції, пожежно-рятувальних підрозділів, медичних бригад та комунальних служб. В разі виникнення НС оперативність реагування та скоординованість їх дій визначають рівень втрат і масштаби наслідків. Впровадження інноваційних технологій дає змогу скоротити час прибуття на місце події, забезпечити точне визначення локації інциденту, оптимізувати маршрути руху та координувати діяльність різних відомств у режимі реального часу.

Цифрові платформи управління НС інтегрують дані з камер відеоспостереження, сенсорів дорожнього руху, GPS-трекерів службових автомобілів, а також інформацію від громадян, які повідомляють про потенційні загрози через мобільні додатки. Це формує єдиний інформаційний простір, у якому диспетчери отримують комплексну картину події та можуть ухвалювати обґрунтовані рішення. Інтелектуальні алгоритми дають можливість не лише автоматично направляти найближчі оперативно-рятувальні підрозділи та бригаду швидкої допомоги, а й оцінювати масштаби інциденту, прогнозувати необхідні ресурси та попереджати суміжні служби.

Не менш важливим аспектом є активізація залученості громадян до системи управління безпекою. Мешканці стають активними учасниками процесів моніторингу та реагування, а сучасні мобільні додатки дають змогу оперативно повідомляти про пожежі, аварії, дорожньо-транспортні пригоди та інші потенційні загрози. Водночас система надає користувачам інформацію про шляхи евакуації, місця укриттів та рівень загрози у конкретному районі. Така двостороння взаємодія сприяє підвищенню ефективності реагування та формує культуру безпеки серед населення.

Перспективним напрямом підвищення безпеки міських територій є створення ефективною системи моніторингу, що забезпечує оперативне отримання повної та достовірної інформації про джерела потенційних загроз для

розроблення та реалізації превентивних заходів щодо запобігання НС місцевого рівня, особливо в умовах введення в державі правового режиму воєнного стану. Водночас у сучасних містах держави існуючі системи моніторингу здебільшого базуються виключно на камерах зовнішнього спостереження, що є недостатньо інформативним для обґрунтованого прийняття рішень щодо запобігання НС та оперативного реагування на небезпечні події. Ці обставини свідчать про необхідність розробки та впровадження нових фізико-технічних методів моніторингу, спрямованих на контроль хвильових характеристик джерел потенційно небезпечних подій. Такий підхід є перспективним для раннього виявлення джерел загроз та підвищення ефективності систем превентивного реагування.

Водночас не всі сучасні методи раннього виявлення джерел потенційних загроз відповідають умовам, у яких вони можуть бути ефективно застосовані для моніторингу міських територій. Разом із тим, відомі експериментальні результати свідчать про перспективність подальших наукових досліджень, спрямованих на використання методу акустичної емісії як одного з ефективних засобів контролю хвильових характеристик джерел небезпечних подій. Такий підхід дає можливість заздалегідь виявляти просторово та тимчасово рознесені небезпечні події, що можуть стати джерелами НС місцевого рівня.

Таким чином, сучасний стан розвитку урбанізованих територій та обмеження існуючих систем моніторингу створює наукову проблему: необхідність розробки інтегрованих інформаційно-технологічних підходів до раннього виявлення та запобігання НС місцевого рівня на основі акустичного моніторингу міського середовища. Унікальність та наукова новизна цієї монографії полягає у формуванні концепції використання акустичних сигналів для превентивного управління безпекою міста, що дає змогу підвищити ефективність систем реагування та забезпечити більш надійний контроль джерел потенційних загроз.

Виходячи з вищезазначених позицій, авторами у монографії розроблено структурно-функціональну модель стратегічного розвитку системи безпеки

міста, що враховує нормативно-правову базу України та наявність відповідних державних механізмів і ресурсів. Крім того, створено когнітивну модель функціонування критичної інфраструктури (КІ) міста в умовах загроз, яка дає можливість оцінити ефективність застосування акустичного моніторингу для запобігання НС місцевого рівня. Проведено експериментальні дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації джерел НС на території міста. На основі отриманих результатів удосконалено методика запобігання виникненню НС місцевого рівня, що підвищує ефективність систем превентивного реагування та забезпечує більш надійний контроль джерел потенційних загроз.

Автори сподіваються, що подані у монографії результати отримають широке визнання та подалі будуть використовуватися як у наукових дослідженнях, так і в інженерно-конструкторських розробках, пов'язаних із розв'язанням науково-технічних проблем, розглянутих у цьому виданні.

Вважаємо своїм приємним обов'язком висловити щиру вдячність рецензентам – члену-кореспонденту Національної академії наук України, проф. О.О. Попову, проф. І.В. Рубану, проф. С.М. Домбровській, проф. М.В. Кустову, проф. Р.Г. Мелещенко, проф. О.М. Землянському, проф. Г.З. Халімову та проф. С.Г. Удовенку – за багатосторонню підтримку, цінні поради та професійну допомогу. Ми також будемо вдячні читачам за зауваження та відгуки, спрямовані на вдосконалення науково-технічної складової монографії, які будуть враховані у подальших дослідженнях і виданнях.

З повагою

Автори

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА

1.1 Аналіз особливостей виникнення надзвичайних ситуацій місцевого рівня

1.1.1 Територіально-часові умови формування надзвичайних ситуацій на території міста

Сучасні міста є складними та розгалуженими системами з розподілом у просторі та часі параметрів життєдіяльності, які за чисельністю населення поділяються на невеликі, малі, середні, великі тощо, а також, за характером спеціальних функцій, на промислові, транспортні, наукові, історичні, багатогалузеві [1–6].

Крім того, містом є не просто скупчення матеріальних об'єктів (житлових і виробничих будівель, комунікацій та ін.), а цілісна, складна, динамічна система, в якій взаємодіють люди, природа, економіка і суспільство.

Елементами міста є: територія з її ландшафтом, природними ресурсами і забудовою, що формують міське середовище; населення, яке може бути поділене на працездатне (трудові ресурси) і непрацездатне; сфера утворення міста (підприємства промисловості, транспорту, будівництва тощо, незалежно від розмірів і форми власності); сфера обслуговування або міське господарство, від якого залежить життєзабезпечення міста (житло, транспорт, водопостачання, торгівля тощо); соціальна сфера, що забезпечує здоров'я, допомога соціально незахищеним, духовні та інші нематеріальні потреби людей (освіта, наука, культура, охорона здоров'я, соціальна допомога, фізична культура, спорт, відпочинок, розваги тощо).

Підприємства сфери обслуговування, які і складають в сукупності міське господарство, забезпечують комунальні, побутові та інші потреби населення міста, а також частково забезпечують інфраструктурну потребу підприємств сфери утворення міста.

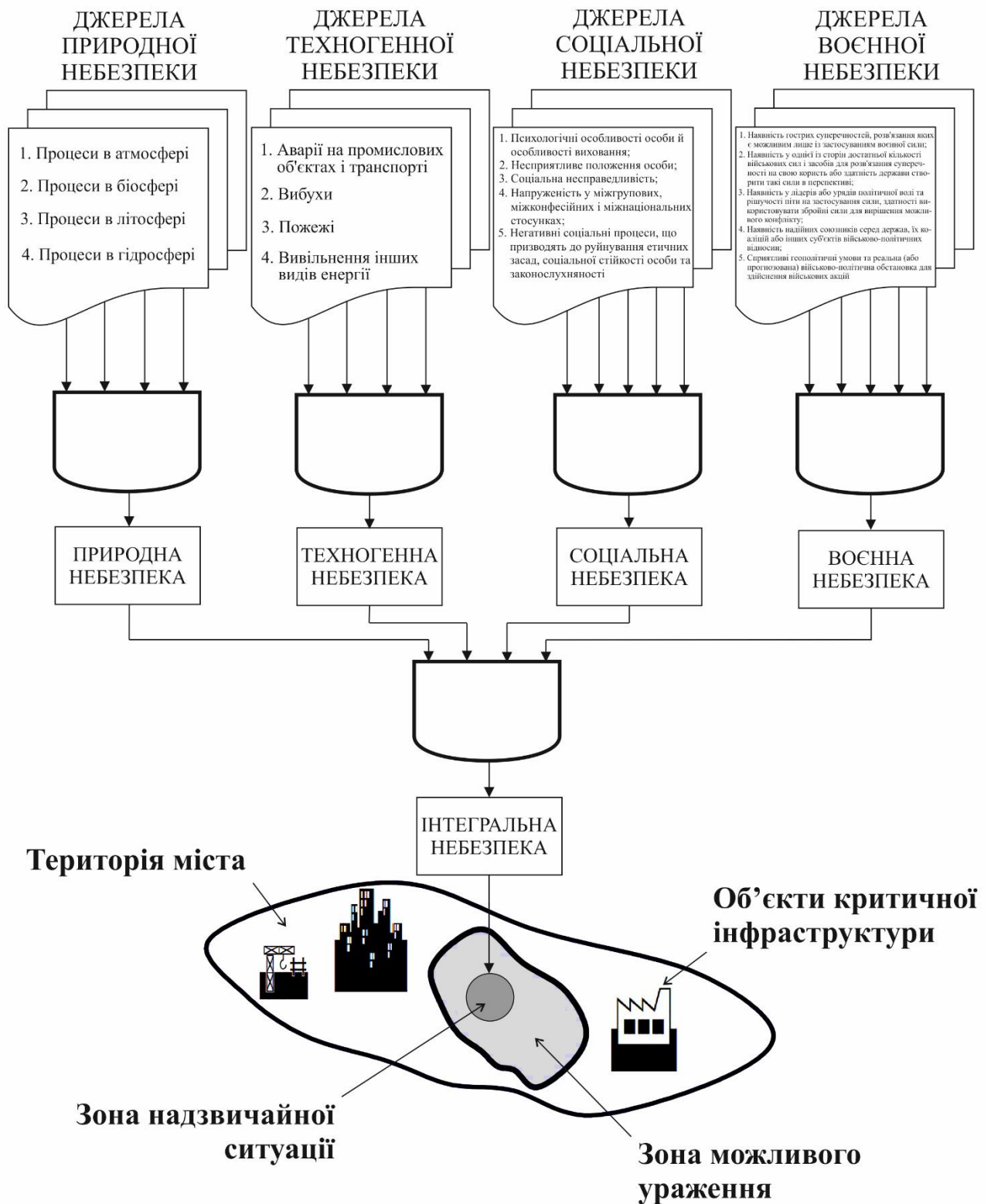


Рисунок 1.1 – Подання процесів формування на території міста небезпечних подій як джерел НС місцевого рівня

Населення міста поставляє трудові ресурси для всіх галузей і є споживачем послуг міського господарства і соціальної сфери. Розміри міського господарства залежать від території міста, чисельності населення і складу сфери утворення

міста. Підприємства сфери утворювання міста залежно від свого профілю можуть забезпечувати міське господарство технікою, матеріалами, паливом та іншими ресурсами. Підприємства сфери обслуговування обслуговують потреби населення.

Все, що є в місті, розміщується на відносно невеликій території. Зовнішній кордон міста, що відокремлює територію міста від інших земель, називається міською межею. Міські землі за своїм цільовим призначенню підрозділяються на територіальні зони: житлові, суспільно-ділові, виробничі, землі інженерних і транспортних інфраструктур, рекреаційні та ін. Для кожної зони встановлюється свій порядок використання території.

Зворотним боком зазначеного процесу є те, що міста у процесі свого функціонування та розвитку створюють (згідно даних рис. 1.1) передумови для виникнення небезпечних подій, які негативно впливають на стан природно-екологічного, економіко-технічного та соціально-політичного балансу на території міста та можуть призвести до виникнення НС місцевого рівня [7–13].

Показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій ($R_{A(x,y,z)}^{Imm.HPI}(t)$), як подій, які за своїми наслідками становлять загрозу життю або здоров'ю населення міста чи призводять до завдання матеріальних збитків, є результатом взаємозв'язку в часі (t) природної, техногенної, соціальної та воєнної небезпек:

$$R_{A(x,y,z)}^{Imm.HPI}(t) = \varphi\left(R_{A(x,y,z)}^{Прир.HPI}(t), R_{A(x,y,z)}^{Техн.HPI}(t), R_{A(x,y,z)}^{Соц.HPI}(t), R_{A(x,y,z)}^{Воєн.HPI}(t)\right), \quad (1.1)$$

де $R_{A(x,y,z)}^{Прир.HPI}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій природного характеру; $R_{A(x,y,z)}^{Техн.HPI}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій техногенного характеру; $R_{A(x,y,z)}^{Соц.HPI}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території

міста небезпечних подій соціального характеру; $R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x,y,z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру. Ці показники, у свою чергу, є результатом взаємозв’язку відповідних джерел небезпек.

Джерела природної безпеки включають процеси, що відбуваються в різних сферах навколишнього середовища, таких як атмосфера, біосфера, літосфера та гідросфера. Атмосферні явища, зокрема урагани, буревії та смерчі, можуть спричиняти значні руйнування. У біосфері безпека може виникати через епідемії, поширення небезпечних організмів або природні зміни екосистем. Літосферні процеси, такі як землетруси, зсуви та вулканічна активність, також становлять загрозу. Гідросфера може бути джерелом безпеки у вигляді повеней, цунамі та забруднення водних ресурсів. Усі ці фактори формують природну безпеку, яка може призводити до значних негативних наслідків для суспільства. Так, показник ризику виникнення у точці $A(x,y,z)$ території міста небезпечних подій природного характеру є результатом об’єднання природних джерел небезпек, які виникають у літосфері, гідросфері, біосфері та атмосфері:

$$R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП}(t) = \phi\left(R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_1}(t), R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_2}(t), R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_3}(t), R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_4}(t)\right), \quad (1.2)$$

де $R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_1}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x,y,z)$ території міста небезпечної події природного характеру атмосферного походження; $R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_2}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x,y,z)$ території міста небезпечної події природного характеру літосферного походження; $R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_3}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x,y,z)$ території міста небезпечної події природного характеру гідросферного походження; $R_{A(x,y,z)}^{Прир.НП_4}(t)$ – показник ризику

виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечної події природного характеру біосферного походження.

Джерела техногенної безпеки пов'язані з діяльністю людини та розвитком промисловості, транспорту й енергетики. Одним із головних ризиків є аварії на промислових підприємствах та транспорті, які можуть супроводжуватися викидами небезпечних речовин, пожежами та вибухами. Пожежі можуть виникати як у виробничих, так і в житлових зонах, загрожуючи життю та майну людей. Додаткову небезпеку становлять ситуації, пов'язані з вивільненням енергії у неконтрольованих умовах, наприклад, у випадку виникнення ядерних чи електротехнічних аварій. Так, показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій техногенного характеру має вигляд:

$$R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП}(t) = \zeta \left(R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_1}(t), R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_2}(t), R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_3}(t), R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_4}(t) \right), \quad (1.3)$$

де $R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_1}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій техногенного характеру, пов'язаних з аваріями на промислових об'єктах і транспорті; $R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_2}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій техногенного характеру, пов'язаних з вибухами; $R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_3}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій техногенного характеру, пов'язаних з пожежами; $R_{A(x,y,z)}^{Техн.НП_4}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій техногенного характеру, пов'язаних з вивільненням інших видів енергії.

Джерела соціальної безпеки впливають із особливостей суспільного життя та взаємодії людей. Психологічні особливості особистості, вплив виховання та негативне соціальне середовище можуть спричинити девіантну

поведінку та злочинність. Важливим фактором є соціальна нерівність, що призводить до напруженості між різними групами населення. Також небезпечним є зростання міжнаціональних та міжособистісних конфліктів, що можуть перерости у протистояння або соціальні заворушення. Негативні соціальні процеси, такі як зниження рівня зайнятості, руйнування моральних цінностей та поширення соціальної нестабільності, можуть призводити до глибоких кризових явищ у суспільстві. Так, показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій соціального характеру має вигляд:

$$R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП}(t) = \xi \left(R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП_1}(t), R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП_2}(t), R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП_3}(t), R_{A(x,y,z)}^{Coц.Н_4}(t), R_{A(x,y,z)}^{Coц.НСП_5}(t) \right) \quad (1.4)$$

де $R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП_1}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язаних із психологічними особливостями особи й особливостями виховання; $R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП_2}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язаних із несприятливим положенням особи; $R_{A(x,y,z)}^{Coц.НП_3}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язаних із соціальною несправедливістю; $R_{A(x,y,z)}^{Coц.Н_4}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язаних із напруженістю в міжгрупових, міжконфесійних і міжнаціональних стосунках; $R_{A(x,y,z)}^{Coц.НСП_5}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язаних із негативними соціальними процесами, що призводять до руйнування етичних засад і соціальної стійкості особи, законопослушності.

У зв’язку з тим, що міста являють собою елементи державної системи управління, до яких є характерними джерела воєнної безпеки, які притаманні

державі. Тому джерела воєнної небезпеки на території також пов'язані з можливістю виникнення збройних конфліктів, терористичних актів та застосування новітніх видів зброї. Сучасні військові технології можуть становити загрозу як на рівні держав, так і на локальному рівні, впливаючи на мирне населення. Нестабільність у сфері державної політики безпеки та зростання військових загроз можуть сприяти дестабілізації внутрішньої ситуації в країні. Окремим ризиком виступає ймовірність застосування зброї масового ураження, яка може мати катастрофічні наслідки. Крім того, небезпека може виникати через зовнішній вплив, що сприяє дестабілізації суспільства, руйнуванню інфраструктури та втраті керованості державними процесами. Так, показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру має вигляд:

$$R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП}(t) = \zeta \left(R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_1}(t), R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_2}(t), R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_3}(t), R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_4}(t), R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_5}(t) \right), \quad (1.5)$$

де $R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_1}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру, пов'язаних із наявністю гострих суперечностей, розв'язання яких є можливим лише із застосуванням воєнної сили; $R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_2}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру, пов'язаних із наявністю в однієї зі сторін достатньої кількості військових сил і засобів для розв'язання суперечності на свою користь або здатністю держави створити такі сили в перспективі; $R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_3}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру, пов'язаних із наявністю у лідерів або урядів політичної волі та рішучості піти на застосування сили, здатності використовувати збройні сили для вирішення можливого конфлікту; $R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_4}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру, пов'язаних із наявністю надійних

союзників серед держав, їх коаліцій або інших суб'єктів військово-політичних відносин; $R_{A(x,y,z)}^{Восн.НП5}(t)$ – показник ризику виникнення у точці $A(x, y, z)$ території міста небезпечних подій воєнного характеру, пов'язаних із наявністю сприятливих геополітичних умов та реальної (або прогнозованої) військово-політичної обстановки для здійснення військових акцій.

Всі ці небезпеки мають значний вплив на КІ міста, порушуючи її стабільність, унеможливаючи належне функціонування транспорту, енергетичних мереж, водопостачання та зв'язку. Це, у свою чергу, призводить до серйозних економічних втрат через зупинку виробництва, скорочення робочих місць та зменшення надходжень до бюджету. Одночасно з цим посилюється соціальна напруга через зростання рівня безробіття, злочинності та міграційних процесів. Значними є й екологічні наслідки, адже забруднення води, повітря та ґрунтів завдає шкоди не лише природі, а й здоров'ю мешканців.

Таким чином, показано, що джерелами НС місцевого рівня є небезпечні події природного, техногенного, соціального та воєнного характеру, які виникають на території міста та за своїми наслідками становлять загрозу життю або здоров'ю населення міста чи призводять до завдання матеріальних збитків.

1.1.2 Аналіз масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами на територіях міст України

На сьогодні до небезпек з великим рівнем соціальних та матеріальних збитків можна віднести масштабні пожежі з легкозаймистими речовинами, до яких відносяться рідкі органічні речовини (РОР). Більший відсоток цих пожеж стався в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану та унаслідок ракетних обстрілів. Так, за останній час серед НС різного характеру, які виникли на територіях різноманітних місць України, можна виділити масштабні пожежі з РОР, серед яких:

– вибух цистерни з легкозаймистою рідиною у складі вантажного поїзда, що складався з 40 цистерн, на залізничній станції «Шебелинка» Харківської

області. Пожежа кваліфікована як диверсія. Жертв і постраждалих немає. Рух залізничного транспорту не був припинений (січень 2015 року) [14];

– пожежа на АЗС у місті Миколаїв, яка виникла унаслідок ворожих обстрілів. Троє мирних мешканців отримали поранення, несумісні з життям. Пожежу вдалось загасити на площі десять квадратних метрів (березень 2022 року) [15];



Рисунок 1.2 – Обстановка на пожежі на АЗС у порту міста Рені на Одещині (липень 2022 року)

- займання бензовозу в порту міста Рені на Одещині. Внаслідок пожежі одна людина загинула і ще одна отримала важкі опіки (липень 2022 року) [16];
- пожежа, що сталася біля АЗС у Чернівцях. Згоріли бензовоз і три цистерни, пошкоджено адміністративне приміщення, а також травмовано людину (серпень 2022 року) [17];



Рисунок 1.3 – Обстановка на пожежі на АЗС у місті Дніпро внаслідок ракетного обстрілу (жовтень 2022 року)

– пожежа, що сталося на АЗС у місті Дніпро, в яку поцілила російська ракета. Пожежу було локалізовано на площі 300 квадратних метрів, 2 особи загинули, 2 осіб удалося врятувати (жовтень 2022 року) [18];



Рисунок 1.4 – Обстановка на пожежі на АЗС у Новобаварському районі міста Харкова внаслідок ракетного обстрілу (квітень 2023 року)

– пожежа, що сталося на АЗС та у гаражному кооперативі міста Нікополь Дніпропетровської області як наслідок російської атаки. У місті було пошкоджено вісім багатоповерхових та приватних будинків, кілька магазинів, меблеву фабрику, готель, автобусну зупинку, газогін та електромережі (жовтень 2022 року) [19];

– загорання бензовозу на території нафтобази на Сарненщині Рівненської області. Поруч із транспортом знаходилися резервуари з паливом. Внаслідок пожежі вогнем було пошкоджено цистерну-напівпричіп та два резервуари з легкозаймистими речовинами (січень 2023 року) [20];



Рисунок 1.5 – Обстановка на пожежі на АЗС у місті Київ (липень 2023 року)

– масштабна пожежа на АЗС «Мотто» у місті Бориспіль. На території АЗС спалахнув бензовоз. У цистерні було 10 тисяч літрів пального (березень 2023 року) [21];

– пожежа на АЗС у Новобаварському районі міста Харкова. Пожежа спалахнула, коли рф завдала ударів по місту. Вибухнули цистерни з газом. Поранених внаслідок вибуху та пожежі немає (квітень 2023 року) [22];



Рисунок 1.6 – Обстановка на пожежі на АЗС «ОККО» в місті Харків (листопад 2023 року)

– вибух бензовозу в Київській області, на автодорозі Харків–Київ. Унаслідок вибуху водій загинув, а на місці події сталася значна пожежа (травень 2023 року) [23];

– пожежа на АЗС у місті Київ спалахнула через наїзд авто на колонку. На місці було виявлено трьох потерпілих. Площа займання склала 1500 квадратних метрів. Вогонь повністю знищив будівлю й наземне обладнання АЗС та 8 легкових авто (липень 2023 року) [24];

– пожежа бензовозу та двох мікроавтобусів. Транспорт горів у селищі міського типу Немішаєве Київської області. Була загроза для поруч розташованої електропідстанції (жовтень 2023 року) [25];

– потужний вибух на АЗС «ОККО» в Харкові. Вибух стався всередині авто, внаслідок чого виникла масштабна пожежа. Водія авто, всередині якого стався вибух, було госпіталізовано. Персонал та інші клієнти не постраждали (листопад 2023 року) [26].

Таким чином, аналіз масштабних пожеж, пов'язаних із РОР, на територіях міст України показує, що більшість із них було спричинено ракетними обстрілами чи іншими актами агресії. Унаслідок таких небезпечних подій значних втрат зазнають об'єкти критичної інфраструктури (ОКІ) та житлові будівлі, що призводить до соціальних, матеріальних та економічних збитків.

1.1.3 Аналіз виникнення на територіях міст надзвичайних ситуацій терористичного характеру, пов'язаних із застосуванням вогнепальної зброї

На сьогодні до небезпек з великим рівнем соціальних та матеріальних збитків для життєдіяльності міст віднесено тероризм, який, відповідно до даних на рис. 1.7, є суспільно-небезпечною діяльністю, яка полягає у свідомому і цілеспрямованому застосуванні насильства, шляхом захоплення заручників, вчинення підпалів, скоєння убивств, залякування населення та органів влади або вчинення інших посягань на життя і здоров'я ні в чому не винних людей або погрози вчинення злочинних дій з метою досягнення злочинних цілей [27–29].

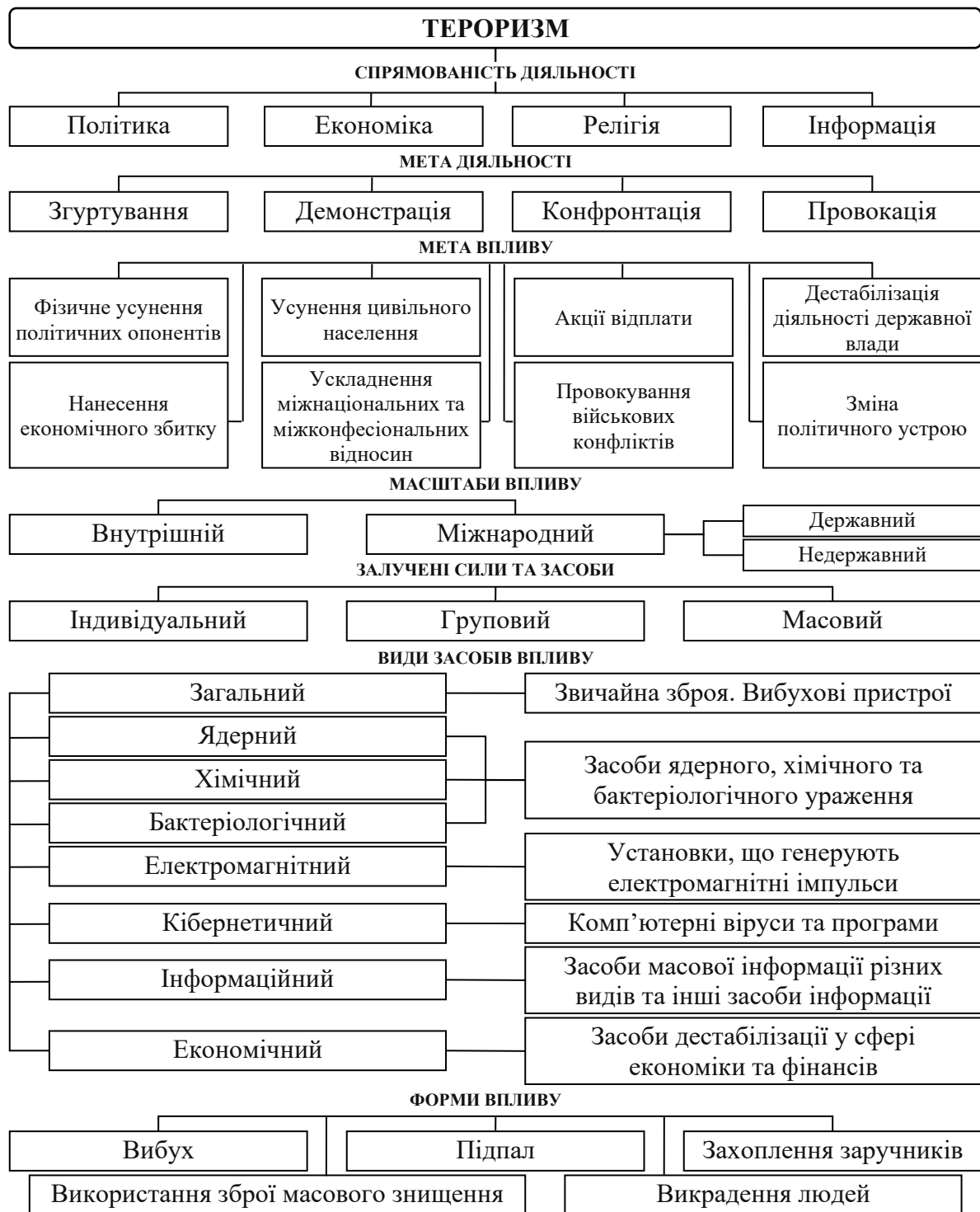


Рисунок 1.7 – Схема класифікації тероризму за видами небезпек

Терористична діяльність охоплює: планування, організацію, підготовку і реалізацію терористичних актів; підбурювання до вчинення терористичних актів, насильство над фізичними особами або організаціями, знищення матеріальних об'єктів у терористичних цілях; організацію незаконних збройних формувань, злочинних угруповань (злочинних організацій), організованих

злочинних груп для вчинення терористичних актів, так само як і участь у таких актах; вербування, озброєння, підготовку та використання терористів; пропаганду і поширення ідеології тероризму; фінансування завідомо терористичних груп (організацій) або інше сприяння їм [30].

Всі ці складові терористичної діяльності невід’ємно пов’язані з незаконним зберіганням та використанням вогнепальної зброї. Наприклад, за останні декілька років серед НС різного характеру, які сталися у світі, існує значна кількість небезпечних подій з використанням вогнепальної зброї, серед яких:

- в супермаркеті «Walmart» в місті Чесапек (штат Вірджинія, США). Загинуло до десяти людей, повідомлялося про велику кількість поранених (листопад 2022 року) [31];

- в готелі у центрі Львова (Україна). Обійшлося без жертв (грудень 2022 року) [32];

- під час зборів членів об’єднання «Valleverde», яке займається управлінням будинку в районі водосховища Турано поблизу Рима (Італія), стався терористичний акт, внаслідок якого троє людей загинуло та четверо отримали поранення [33];

- біля лісу на Закарпатті (Україна). Обійшлося без жертв (грудень 2022 року) [34];

- в центрі Парижа (Франція). Загинуло троє людей, ще декілька отримали поранення (грудень 2022 року) [35];

- у посольстві Азербайджану в Тегерані (Іран). Чоловік з автоматом Калашникова убив одного охоронця дипломатичного представництва і ще двох поранив (січень 2023 року) [36];

- у січні 2023 року під час святкування китайського Нового року в Лос-Анджелесі (Каліфорнія, США) трагічно загинули щонайменше десять осіб [37];

- у місті Лейкленд, штат Флорида, США, сталася чергова масова стрілянина, внаслідок якої троє людей загинули, а ще семеро отримали травми різного ступеня тяжкості та були госпіталізовані (січень 2023 року) [38, 39];

– в університеті американського містечка Іст-Лансінг (штат Мічиган, США). Через дії озброєного чоловіка загинули троє студентів та п'ятеро отримали поранення (лютий 2023 року) [40];



Рисунок 1.8 – Обстановка після стрілянини в центрі міста Париж (Франція) та у школі Де-Мойна (штат Айова, США)

– у прибережному місті Хаф-Мун-Бей, розташованому приблизно за 50 км на південь від Сан-Франциско (штат Каліфорнія, США), озброєний чоловік скоїв напад, внаслідок якого загинуло семеро людей (лютий 2023 року) [41];

– у центрі Праги (Чехія) чоловік відкрив стрілянину в будівлі Карлового університету, що призвело до загибелі 14 осіб та поранення 26 людей. Пізніше ще один постраждалий помер у лікарні. Серед поранених були троє іноземних громадян. Нападник покінчив життя самогубством (грудень 2023 року) [42];

– у районі Сарьер у Стамбулі під час служби в італійській церкві Санта-Марія сталася стрілянина, внаслідок якої одна людина отримала смертельне поранення (січень 2024 року) [43];



Рисунок 1.9 – Обстановка після стрілянини у центрі Праги (Чехія)

– у грузинському місті Руставі (Грузія) озброєний чоловік відкрив стрілянину на місцевому ринку, внаслідок чого загинуло четверо людей (лютий 2024 року) [44];

– у Детройті (штат Мічиган, США) під час стрілянини в парку були поранені 9 осіб. Нападник під'їхав до парку, наблизився до майданчика і здійснив 28 пострілів, кілька разів зупиняючись для перезарядження зброї [45];



Рисунок 1.10 – Обстановка після стрілянини у Детройті (штат Мічиган, США)

– у місті Віндер (штат Джорджія, США) у старшій школі Апалачі 14-річний підліток відкрив стрілянину, що призвело до загибелі чотирьох людей і поранення ще дев'яти осіб (вересень 2024 року) [46];

– на Тернопільщині (Україна) військовий біля сільської школи розстріляв людей. Загинуло двоє людей, ще трьох із важкими пораненнями доправили до лікарні (серпень 2024 року) [47].

– у місті Анкара (Турція) стався теракт біля об'єкта аерокосмічної компанії. Внаслідок терористичного акту загинули 5 осіб, 22 людини отримали поранення (жовтень 2024 року) [48].

Крім того, згідно даних Офісу Генерального прокурора України у період з лютого 2022 по жовтень 2023 року в державі було вилучено: вогнепальної зброї – 5950 одиниць (гладкоствольної – 111; нарізної – 2376; іншої вогнепальної зброї – 3463); гранатометів та реактивних систем – 138; патронів – 2643155 одиниць; гранат – 4911; мін – 151; саморобних вибухових пристроїв – 91; холодної зброї – 1315; газової та пневматичної зброї – 49; вибухових речовин – 4869,2948 кг.

За зазначений період із використанням нарізної вогнепальної зброї вчинено 3626 кримінальних правопорушень; із застосуванням гладкоствольної – 172; холодної – 490; газової та пневматичної – 262; вибухових речовин – 86; боєприпасів – 26869 [49].

Таким чином, внаслідок військової агресії РФ в містах України збільшилась кількість НС терористичного характеру, які невід'ємно пов'язані з незаконним зберіганням та використанням вогнепальної зброї, а також характеризуються великим рівнем соціальних та матеріальних збитків.

1.1.4 Аналіз виникнення на територіях міст надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів

За останні роки спостерігається значний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які знайшли широке застосування у цивільному, гуманітарному та військовому секторах. У контексті конфлікту в Україні вони активно використовуються співробітниками Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС) для моніторингу наслідків руйнувань, оцінки стану інфраструктури, а також координації рятувальних операцій. Особливу увагу привертає застосування дронів у військових конфліктах, зокрема для розвідки,

коригування артилерійського вогню та ураження цілей. Проти України російські окупанти застосовують дрони-камікадзе, спрямовані на ураження цивільних об'єктів, що призводить до численних поранень і загибелі мирних жителів. Ця проблема має глобальне значення, оскільки широке використання БПЛА створює нові загрози та виклики для національної безпеки, цивільної інфраструктури та громадян.



Рисунок 1.11 – Обстановка після обстрілів із дронів цивільного авто та автобуса на Глухівщині та Миропіллі в Сумській області

Під час воєнного стану в Україні спостерігається значне зростання кількості небезпечних інцидентів із застосуванням БПЛА, а саме:

– російська армія масовано атакувала безпілотниками місто Берислав Херсонської області. Внаслідок атаки загинули двоє чоловіків – волонтери з Франції. Із травмами до лікарні доставили ще трьох іноземців та 41-річного жителя Одеси (лютий 2024 року) [50];

– російські війська обстріляли з дрона цивільне авто на Глухівщині у Сумській області. Унаслідок атаки загинуло молоде подружжя. Прокуратура відкрила кримінальне провадження за фактом порушення законів та звичаїв війни, поєднаного з умисним вбивством. Триває документування наслідків обстрілів (серпень 2024 рік) [51];



Рисунок 1.12 – Обстановка після атаки БПЛА по цивільній інфраструктурі у місті Харків

- FPV-дрон влучив у рейсовий автобус у Миропіллі на Сумщині. Унаслідок атаки було поранено цивільних (вересень 2024 рік) [52];
- у Херсоні ворожий дрон атакував автомобіль швидкої меддопомоги. Поранення отримали двоє працівників: 44-річний та 47-річний чоловіки. Їх доправили до лікарні із вибуховими травмами та контузійми, а також уламковими пораненнями ніг (жовтень 2024 року) [53];
- завдано удару безпілотниками по Одесі. Внаслідок атаки у місті сталися руйнування цивільної інфраструктури, загинула людина та щонайменше 13 постраждалих (листопад 2024 року) [54];
- ворожа атака БПЛА на місто Харків. Унаслідок атаки постраждали четверо осіб – три жінки та один чоловік. Двоє потерпілих, 74-річний чоловік та жінка, зазнали уламкових поранень та були госпіталізовані [55].

Великий відсоток подій стався протягом останніх двох років, що підтверджує значне зростання використання БПЛА для загрози життю та здоров'ю людей. Зокрема, за останній рік виробничі потужності дронів зросли у понад 100 разів. У 2022 році обсяги виробництва становили 3–5 тисяч одиниць, тоді як у 2023 році – приблизно 300 тисяч одиниць, що підкреслює їх значущу роль у сучасних військових та гуманітарних операціях на території України.

Таким чином, окрім вогнепальної зброї, за останні два роки зріс відсоток випадків застосування БПЛА, зокрема під час терористичних атак, що свідчить про серйозну загрозу для цивільного населення та КІ міст України.

1.2 Аналіз особливостей запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня

1.2.1 Умови реалізації заходів із запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня

Згідно Кодексу цивільного захисту України НС визначається як обстановка на окремій території чи суб'єкті господарювання на ній або водному об'єкті, яка характеризується порушенням нормальних умов життєдіяльності населення, спричинена катастрофою, аварією, пожежею, стихійним лихом,

епідемією, епізоотією, епіфітотією, застосуванням засобів ураження або іншою небезпечною подією, що призвела (може призвести) до виникнення загрози життю або здоров'ю населення, великої кількості загиблих і постраждалих, завдання значних матеріальних збитків, а також до неможливості проживання населення на такій території чи об'єкті, провадження на ній господарської діяльності [56].

Класифікація НС впроваджена в Україні з метою забезпечення організаційної взаємодії центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ та організацій у процесі вирішення питань, пов'язаних із запобіганням виникненню НС та ліквідацією їх наслідків.

Класифікація здійснюється на підставі «Порядку класифікації надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру за їх рівнями», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 року № 368, Державного класифікатора надзвичайних ситуацій ДК 019-2010 та «Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій», затверджених наказом МВС України від 06 серпня 2018 року № 658 [57–59].

Залежно від причин походження небезпечних подій, що зумовили або можуть зумовити виникнення НС на території України, розрізняють НС техногенного, природного, соціального та воєнного характеру, а залежно від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, НС класифікуються як НС державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівня.

Запобіганням виникненню НС є комплекс правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання техногенної та природної безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення НС на основі даних моніторингу, експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення їх переростання у НС або пом'якшення її можливих наслідків.

На рисунку 1.13 подано умови реалізації заходів із запобігання виникненню НС місцевого рівня, у разі виникнення на території міста різного роду небезпечних подій.

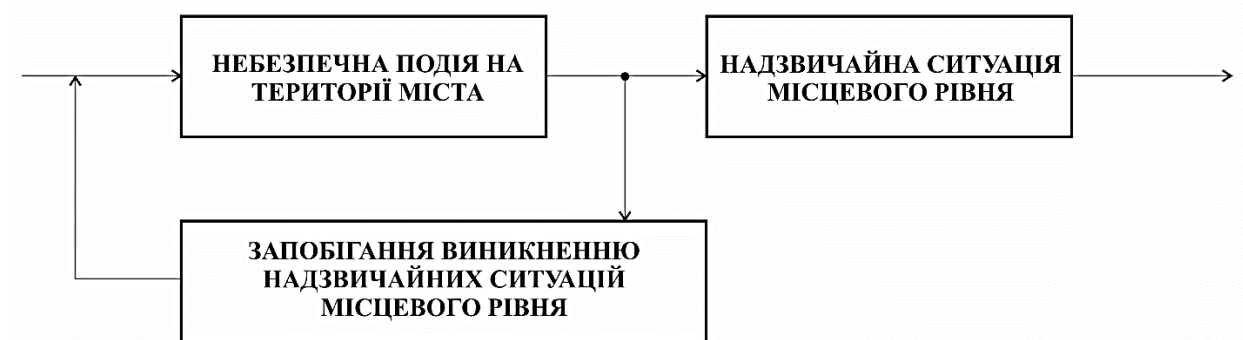


Рисунок 1.13 – Подання умов реалізації заходів із запобігання виникненню НС місцевого рівня, у разі виникнення на території міста різного роду небезпечних подій

Згідно даних (рисунок 1.13) запобігання виникненню НС місцевого рівня включає реалізацію на територіях та ОКІ міст України таких заходів:

- державне регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту та управління ризиками виникнення НС техногенного характеру та пожеж;

- забезпечення техногенної безпеки;

- забезпечення пожежної безпеки;

- державний нагляд (контроль) у сфері техногенної та пожежної безпеки.

При цьому державне регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту здійснюється шляхом:

- проведення експертизи проєктів містобудівної документації та проєктів будівництва;

- ліцензування послуг і виконання робіт протипожежного призначення;

- технічного регулювання у визначеній сфері відповідальності;

- державного ринкового нагляду щодо засобів цивільного захисту;

- державного нагляду (контролю) у сфері пожежної та техногенної безпеки;

- страхування відповідальності;
- моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій.

Не виключаючи перспективності комплексної реалізації в містах держави представлених заходів державного регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту, монографія спрямована на підвищення ефективності моніторингу НС на території міста. Це зумовлено тим, що згідно з Кодексом цивільного захисту України в державі, з метою забезпечення здійснення заходів із запобігання виникненню НС, здійснюється постійний моніторинг і прогнозування НС.

У свою чергу, моніторинг НС є системою безперервних спостережень, лабораторного та іншого контролю для оцінки стану захисту населення і територій та небезпечних процесів, які можуть призвести до загрози або виникнення НС, а також своєчасне виявлення тенденцій до їх зміни. Спостереження, лабораторний та інший контроль включають збирання, опрацювання і передавання інформації про стан навколишнього природного середовища, забруднення продуктів харчування, продовольчої сировини, фуражу, води радіоактивними та хімічними речовинами, зараження збудниками інфекційних хвороб та іншими небезпечними біологічними агентами. Для проведення моніторингу і прогнозування НС в Україні створюється та функціонує система моніторингу і прогнозування НС.

Ці обставини вказують на необхідність інтегрування в систему безпеки міста додаткових автоматизованих датчиків контролю різного роду джерел небезпек, які працюють на різних фізико-хімічних принципах. Розробка такої системи моніторингу джерел НС дасть можливість об'єднати функції спостереження та обробки інформації про джерела безпеки, а також функції прогнозування виникнення на території міста НС різного характеру, з подальшим розробленням ефективних рішень щодо управління службами безпеки та комунальними службами міста.

Одним із напрямів раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою

наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів в акустичному діапазоні [60].

Таким чином, показано, що запобігання виникненню НС місцевого рівня включає реалізацію на територіях та ОКІ міст України заходів щодо державного регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту та управління ризиками виникнення НС техногенного характеру та пожеж, а також забезпечення техногенної та пожежної безпеки. Серед заходів державного регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту залишаються цілком відкритими для держави питання щодо створення та функціонування в містах системи моніторингу і прогнозування НС. Вказано, що одним із напрямів раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів в акустичному діапазоні.

1.2.2 Огляд нормативно-правової бази України у сфері запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня

Запобігання та моніторинг НС на території міста регулюється низкою нормативно-правових актів, які встановлюють вимоги до містобудівного планування, інженерно-технічних заходів та забезпечення безпеки населення. Одним із ключових документів у цій сфері є Державні будівельні норми України (ДБН), зокрема ДБН Б.1.1-5:2007 «Система містобудівної документації. Склад, зміст, порядок розроблення, погодження та затвердження розділу інженерно-технічних заходів цивільного захисту (цивільної оборони) у містобудівній документації» [61].

Цей нормативний документ визначає вимоги до планування територій, спрямовані на створення безпечних умов для населення в умовах техногенних і природних НС. Він регламентує порядок розроблення, погодження та затвердження розділів інженерно-технічних заходів цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) у складі містобудівної документації як на мирний час, так і на особливий період.

Основні завдання, які висвітлені в ДБН Б.1.1-5:2007, охоплюють різні аспекти планування та забезпечення безпеки міської території. Прогнозування ризиків і оцінка небезпек передбачають ідентифікацію ОКІ і територій, включаючи зони можливого радіоактивного чи хімічного забруднення, підтоплення або зсувів. Планування евакуаційних заходів передбачає розроблення маршрутів евакуації, визначення місць захисту та забезпечення їх необхідною інфраструктурою. Розвиток захисних споруд включає створення та вдосконалення укриттів, підземних споруд і комплексів подвійного використання, які забезпечують надійний захист як у мирний час, так і в умовах НС. Інженерна підготовка територій зосереджується на стабілізації ґрунтів, водовідведенні, створенні систем оповіщення та благоустрою, що спрямовані на мінімізацію наслідків можливих НС.

Окрім ДБН Б.1.1-5:2007, регулювання цієї сфери здійснюється Кодексом цивільного захисту України, який визначає загальні принципи державної політики у сфері ЦЗ, включаючи попередження, ліквідацію наслідків НС та забезпечення сталого функціонування КІ [62–64].

Також враховуються положення інших нормативно-правових актів, зокрема, ДБН В.1.2-4:2020 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту», які встановлюють порядок інтеграції заходів безпеки у проєктну документацію. Документ регламентує прогнозування ризиків, планування захисних споруд, забезпечення систем оповіщення та розроблення евакуаційних маршрутів. Особлива увага приділяється інтеграції заходів безпеки у проєктування міської та промислової забудови. Використання сучасних технологій і міжнародного досвіду дає можливість підвищити ефективність захисту населення та інфраструктури від природних і техногенних загроз [65].

Крім того, ДБН В.1.2-4:2020 має певні недоліки, які можуть ускладнювати його ефективне застосування. Деякі положення документа є надто загальними та недостатньо враховують специфіку окремих територій або об'єктів. Хоча документ охоплює широкий спектр НС, сучасні загрози, такі як кіберзагрози чи атаки з використанням дронів, висвітлено поверхово. Також відсутні чіткі

механізми моніторингу та оцінки ефективності впроваджених заходів, що ускладнює контроль за їх реалізацією. Важливим аспектом є інтеграція інженерно-технічних заходів із сучасними інформаційними технологіями. Використання геоінформаційних систем (ГІС), цифрових картографічних моделей та автоматизованих систем моніторингу дає змогу своєчасно виявляти потенційні ризики та забезпечувати оперативне реагування на них моніторингу [66].

Захист ОКІ є однією з ключових складових національної безпеки будь-якої держави. Зростаюча кількість загроз, включаючи природні катаклізми, техногенні аварії, терористичні акти та кіберзагрози, вимагає створення системного підходу до організації та реалізації заходів безпеки. В Україні ця сфера регулюється низкою нормативно-правових актів, які закладають правові та організаційні основи для ідентифікації, моніторингу та захисту ОКІ на державному, регіональному, місцевому та об'єктовому рівнях.

Для забезпечення функціонування територій населених пунктів на місцевому рівні діє велика кількість ОКІ відповідно до Закону України «Про критичну інфраструктуру» (від 16 листопада 2021 року № 1882-IX). Цей закон є ключовим нормативним актом, що закладає правову основу для функціонування системи захисту КІ. Він визначає основні принципи, суб'єкти, об'єкти та механізми організації захисту, створюючи базу для деталізації окремих процесів у підзаконних актах [67].

Реалізація положень Закону України «Про критичну інфраструктуру» відображена у постанові Кабінету Міністрів України від 09 жовтня 2020 року № 1109, яка регламентує порядок ідентифікації та категоризації ОКІ. Цей документ встановлює критерії для визначення значущості об'єктів та їх класифікації, що є основою для подальшого моніторингу [68].

Аналізуючи функції, які виконує ДСНС у сфері захисту КІ, слід підкреслити комплексність моніторингу стану КІ, що включає постійний аналіз її функціонування, виявлення слабких місць і потенційних загроз. Ця діяльність спрямована на попередження НС через раннє виявлення ризиків та оперативне

їх вирішення, що детально регламентовано постановою Кабінету Міністрів України від 22 липня 2022 року № 821, яка передбачає проведення систематичних спостережень за станом і функціонуванням ідентифікованих об'єктів, оцінку ризиків та надання рекомендацій для зменшення їх впливу [69].



Рисунок 1.14 – Ураження критичної інфраструктури БПЛА

Особливе місце у роботі ДСНС займає не лише організація заходів для захисту населення під час НС, а і створення умов для забезпечення безпеки людей заздалегідь. ДСНС взаємодіє з іншими державними органами, приватними структурами, місцевими громадами та службами ЦЗ для забезпечення ефективного функціонування системи захисту КІ. Така взаємодія

спрямована на оперативний обмін інформацією, оцінку ризиків, координацію дій під час НС та узгодження заходів із мінімізації їх наслідків. Завдяки цьому забезпечується повнота та достовірність даних, необхідних для прогнозування загроз і прийняття рішень у кризових умовах; це регламентовано постановою Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 року № 1174, яка визначає порядок обміну інформацією між усіма суб'єктами системи захисту КІ. Документ забезпечує нормативну базу для передачі, обробки та захисту інформації між органами виконавчої влади, приватними компаніями та іншими зацікавленими сторонами. Аналіз ризиків, який проводить ДСНС, полягає у створенні моделей можливих небезпек, оцінці їх впливу на функціонування важливих об'єктів і прогнозуванні наслідків. Це дає змогу службі формувати дієві превентивні заходи, спрямовані на мінімізацію шкоди у випадку виникнення НС [70].

Важливою складовою процесів запобігання та реагування на НС є інтеграція України до Механізму цивільного захисту ЄС, що дозволяє отримувати швидку міжнародну допомогу, обмінюватися досвідом та удосконалювати національну систему безпеки. Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 10 серпня 2024 року № 535 ДСНС визначено національним координатором участі України в Механізмі цивільного захисту ЄС [71].

Завдяки участі у спільних навчаннях, рятувальних операціях та міжнародних проєктах ДСНС отримує доступ до сучасних методів оцінки ризиків і новітніх технологій, що сприяє підвищенню ефективності реагування на загрози. Також створено внутрішню базу знань про Механізм цивільного захисту ЄС, яка дає можливість українським фахівцям активно взаємодіяти з європейськими партнерами та використовувати передовий досвід для розроблення національних стандартів безпеки.

Важливою складовою діяльності ДСНС є захист КІ та забезпечення інформаційного обміну між усіма суб'єктами системи ЦЗ. У межах співпраці з ЄС затверджено дорожню карту з реалізації угоди щодо участі України в

Механізмі цивільного захисту ЄС, що передбачає посилення координації дій під час кризових ситуацій. Також проводиться робота щодо сертифікації українських рятувальних підрозділів за європейськими стандартами, що дає змогу ДСНС брати участь у міжнародних гуманітарних місіях. Крім того, здійснюється моніторинг та прогнозування загроз, що сприяє розробці ефективних превентивних заходів для мінімізації можливих наслідків НС.

Таким чином, правові засади запобігання НС у містах України та захисту КІ ґрунтуються на національному законодавстві, узгодженому з міжнародними правовими нормами. Діяльність ДСНС у цій сфері ЦЗ спрямована на зміцнення співпраці з Механізмом цивільного захисту ЄС, що дає можливість здійснювати моніторинг потенційних загроз, прогнозувати ризики, розробляти заходи щодо підвищення безпеки, включаючи створення систем оповіщення, планування евакуаційних маршрутів і вдосконалення інфраструктури цивільного захисту.

1.3 Аналіз стану запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня у світі

1.3.1 Процес запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня у розвинутих країнах світу

Ситуаційні центри створюються в містах з метою забезпечення моніторингу стану довкілля та оперативного реагування на позаштатні ситуації різного характеру. Для ефективного реагування та взаємодії залучаються працівники різних структур і організацій, що дозволяє забезпечити комплексний підхід до вирішення кризових ситуацій. Ці центри оснащуються системами для обробки великого обсягу інформації з різноманітних джерел, зокрема відео, аудіо та цифрових даних. Основною метою діяльності таких центрів є своєчасне сповіщення та координація дій відповідних служб у разі НС. Функціонування цих центрів спрямоване на вдосконалення роботи єдиної державної системи цивільного захисту (ЄДСЦЗ) відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 09 січня 2014 року № 11 «Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту» [72].

Однак процес формування єдиної системи моніторингу НС в Україні перебуває на початковому етапі, що зобумовлює відсутність уніфікованої правової бази для здійснення такого моніторингу. Одним із перших документів є постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2023 року № 705 «Питання мережі ситуаційних центрів», що є важливим кроком у напрямку створення ефективної мережі ситуаційних центрів для забезпечення безпеки та запобігання НС. Метою зазначеної постанови є регулювання діяльності мережі ситуаційних центрів: створення та функціонування ситуаційних центрів на різних рівнях управління (державному, регіональному та місцевому). Головними завданнями цих центрів є: єдина система координації: інтеграція зусиль органів виконавчої влади та інших суб'єктів для моніторингу, виявлення та реагування на НС; технічна модернізація: впровадження сучасних інформаційних систем та технологій для ефективного аналізу даних і прийняття рішень; оперативне реагування: забезпечення швидкого обміну інформацією між усіма рівнями управління [73–77].

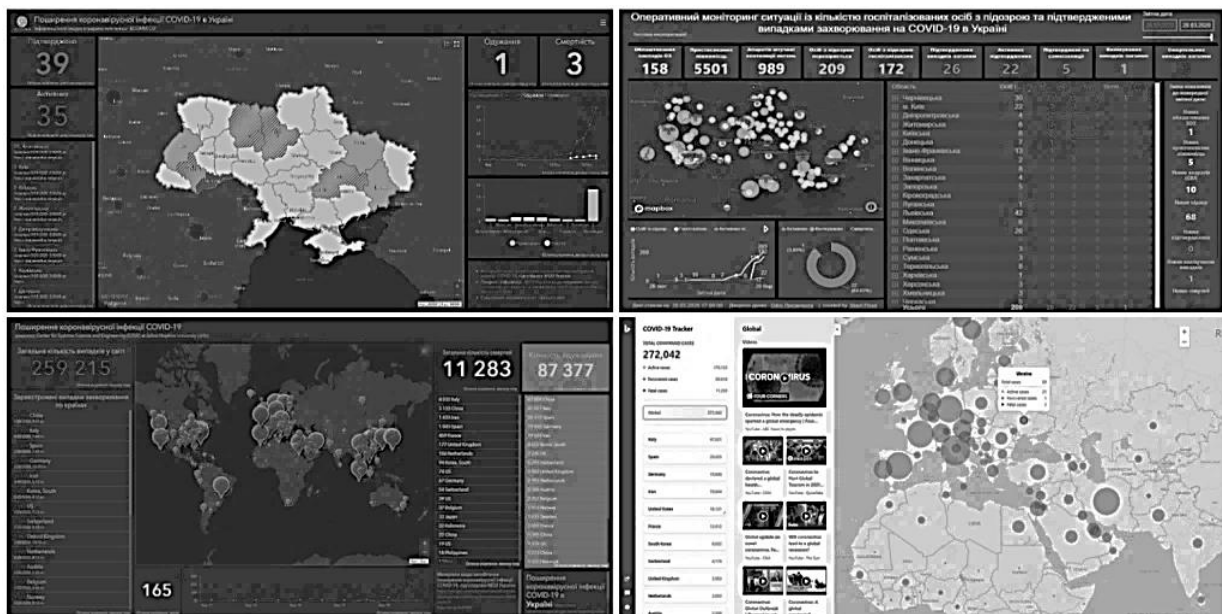


Рисунок 1.15 – Приклад роботи центру прогнозування і моніторингу НС

У структурі ДСНС завдання моніторингу НС покладено на Центр прогнозування і моніторингу НС, оперативно-чергові служби, ситуаційні центри, інформаційно-аналітичний центр та науково-дослідні установи. Це

підтверджується наказом ДСНС від 06 серпня 2018 року № 514 «Про затвердження Методичних рекомендацій з організації ситуаційних центрів», що регламентує діяльність структурних підрозділів, у тому числі Центру прогнозування і моніторингу, в частині їх участі у моніторингу НС [78].

Центр прогнозування здійснює моніторинг потенційно небезпечних ситуацій, аналізує інформацію про НС природного, техногенного та воєнного характеру, прогнозує їх розвиток і оцінює ризики. Оперативно-чергові служби забезпечують цілодобовий прийом, обробку та передачу інформації, тоді як ситуаційні центри координують моніторинг КІ, природного середовища та техногенних об'єктів. Інформаційно-аналітичний центр займається збиранням, узагальненням і аналізом даних із використанням сучасних ГІС і супутникових технологій, а науково-дослідні установи проводять дослідження та розробки для покращення прогнозування і попередження НС. Така структура забезпечує ефективний моніторинг та оперативне реагування на НС по всій території України [79].

Проте для підвищення ефективності роботи ДСНС важливо також враховувати досвід провідних країн світу в налагодженні системи ситуаційних центрів на території міст. Так, у багатьох країнах, таких як США (FEMA National Response Coordination Center – NRCC) [80], Велика Британія (National Crisis Coordination Centre – NCC) [81], Японія (Disaster Management Centre – DMC) [82], Австралія (Australian Government Crisis Coordination Centre – AGCCC) [83], ситуаційні центри працюють на основі інтегрованих технологій, що дають можливість у реальному часі отримувати дані з різних джерел, зокрема, за допомогою автоматизованих систем моніторингу, дронів та супутникових технологій. Ці країни використовують централізовані платформи для обробки великих обсягів даних, що дозволяє швидко реагувати на НС, ефективно координувати дії різних служб та організацій, а також забезпечувати чіткий обмін інформацією між державними та приватними структурами.

С точки зору ОКІ, системи провідних країн світу є високотехнологічними, інтегрованими та спрямованими на забезпечення стійкості до загроз. Вони

враховують сучасні виклики, такі як кіберзагрози, терористичні атаки, природні катастрофи та техногенні аварії. Це, у свою чергу, призводить до домінування провідних країн світу – США, Німеччини, Великої Британії та ряду інших країн з питань контролю та ухвалення законодавства у сфері запобігання НС.



Рисунок 1.16 – Ситуаційні центри: Disaster Management Centre (DMC), Японія; National Crisis Coordination Centre (NCC), Велика Британія

У США система моніторингу КІ є однією з найрозвиненіших у світі та охоплює фізичну, кібернетичну та економічну безпеку. Основним координатором цієї діяльності є Департамент внутрішньої безпеки (DHS), який взаємодіє з різними федеральними відомствами, місцевими органами влади, приватним сектором та громадськими організаціями. Моніторинг базується на багаторівневій системі захисту, використанні сучасних технологій і чіткій координації між зацікавленими сторонами [84].

Національний план захисту інфраструктури (NIPP) забезпечує стратегічну основу для захисту 16 визначених секторів КІ, таких як енергетика, транспорт, комунікації, фінансові послуги, водопостачання тощо. Цей план визначає механізми моніторингу, оцінки ризиків та управління ними. Він включає розробку моделей можливих загроз, сценаріїв кризових ситуацій і заходів реагування [85].

Одним із важливих компонентів є SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition), які забезпечують моніторинг і управління ОКІ в режимі реального часу. Ці системи використовуються у таких сферах, як електромережі, водопостачання та транспортні вузли. SCADA-системи оснащені датчиками, що збирають дані про стан об'єктів, які надалі аналізуються для виявлення можливих загроз чи несправностей.

Особливу роль відіграє Агентство з кібербезпеки та безпеки інфраструктури (CISA). Воно відповідає за моніторинг кіберзагроз, координацію дій у разі кібератак та забезпечення інформаційної безпеки. Агентство керує Національним центром управління ризиками (National Risk Management Center), який аналізує загрози, створює карти ризиків і координує заходи щодо зменшення їх впливу. У межах діяльності CISA активно впроваджуються автоматизовані системи моніторингу, штучний інтелект (ШІ) і технології великих даних (Big Data), які забезпечують високий рівень обробки інформації [86].

Моніторинг потенційних загроз здійснюється через розгалужену мережу спеціалізованих центрів, таких як Fusion Centers. Ці центри об'єднують зусилля

федеральних, місцевих і приватних структур для аналізу даних та спільного реагування на НС. Важливою складовою роботи Fusion Centers є обмін інформацією між усіма зацікавленими сторонами, що дає змогу швидко реагувати на потенційні небезпеки.

Крім того, у США використовуються сучасні супутникові системи для моніторингу стану інфраструктури та прогнозування природних катастроф. Супутники надають дані про зміни в земній корі, погодні умови, стан водних ресурсів, що дає змогу своєчасно реагувати на можливі загрози, такі як урагани, землетруси чи повені.

У рамках співпраці між державним і приватним секторами реалізується низка програм, спрямованих на вдосконалення захисту КІ. Наприклад, платформа Information Sharing and Analysis Centers (ISACs) об'єднує компанії та урядові структури для обміну інформацією про потенційні ризики і загрози.

Загалом система моніторингу у США побудована на принципах багаторівневого підходу, де кожен рівень, від федерального до місцевого, виконує свою функцію. Ця система інтегрує новітні технології, чітко координує дії зацікавлених сторін та активно реагує на виклики сучасного світу, забезпечуючи високий рівень безпеки КІ.

Одним із важливих інструментів, які використовуються в Німеччині, є MonET (Monitoring und Evaluation Tool). Ця система дає можливість у реальному часі оцінювати стан безпеки території міста, прогнозувати ризики та розробляти сценарії запобігання НС. Завдяки автоматизації збору даних MonET забезпечує точність і своєчасність рішень.

У Німеччині система захисту КІ є одним із пріоритетів державної політики, що координується Федеральним відомством з інформаційної безпеки (BSI). Відомство розробляє стратегії, які спрямовані на ідентифікацію, оцінку та мінімізацію ризиків для ОКІ. Основою цієї діяльності є програма KRITIS (Kritische Infrastrukturen), яка охоплює такі ключові сфери, як енергетика, транспорт, телекомунікації, водопостачання та охорона здоров'я. Програма

передбачає створення захищених систем обміну інформацією, регулярне проведення аудитів безпеки та тестування сценаріїв кризового реагування [87].

Важливою складовою німецької системи є публічно-приватне партнерство. Приватні компанії, які володіють і управляють ОКІ, активно співпрацюють із державними органами для обміну інформацією, впровадження спільних стандартів безпеки та координації дій у разі кризових ситуацій. Цей підхід сприяє ефективному використанню ресурсів і підвищує загальну стійкість системи.

У Великій Британії моніторинг і захист КІ здійснюються під керівництвом Центру національної кібербезпеки (NCSC), який є частиною Агентства урядового зв'язку (GCHQ). NCSC відповідає за розробку стратегій кіберзахисту та впровадження технологій, що забезпечують безперебійну роботу ОКІ. Особливістю британської системи є централізовані центри моніторингу, які працюють у режимі реального часу для виявлення та нейтралізації загроз. Ці центри обробляють великий обсяг даних із різних джерел, включаючи мережеві датчики, супутникові системи та інші сенсори [88].

Для посилення ефективності захисту КІ у Великій Британії створено центри реагування на НС, які об'єднують сили державних служб, приватних компаній і громадських організацій. Ці центри координують дії під час кризових ситуацій, розробляють заходи з мінімізації наслідків і відновлення роботи об'єктів.

Однією з ключових програм є СІІР (Critical Infrastructure Integration Programme), яка спрямована на інтеграцію кіберзахисту та фізичної безпеки ОКІ. Ця програма включає використання сучасних технологій, таких як штучний інтелект, автоматизація аналізу даних і впровадження стандартів кібербезпеки. Завдяки цій програмі Британія створила високоефективну систему захисту, яка здатна адаптуватися до нових викликів і загроз [89].

Таким чином, аналіз стану запобігання та моніторингу НС у розвинутих країнах світу засвідчив, що ефективність цих заходів залежить від рівня інтеграції сучасних технологій, координації між державними та приватними

структурами, а також впровадження єдиної системи моніторингу. Провідні країни, такі як США, Велика Британія, Німеччина та Японія, використовують централізовані платформи для оброблення великих обсягів даних, що забезпечує швидке реагування та прийняття рішень у кризових ситуаціях.

1.3.2 Аналіз існуючих засобів та систем акустичного моніторингу небезпечних подій як джерел надзвичайних ситуацій

Запобігання терористичним актам і злочинам, які можуть загрожувати безпеці суспільства, є одним із ключових завдань сучасного світу. Зростання загроз, пов'язаних із підпалами, а також із терористичними актами з використанням вогнепальної зброї та БПЛА, зумовило появу високотехнологічних рішень та спеціалізованих компаній, які працюють у сфері моніторингу НС. Світові лідери в галузі безпеки розробляють інноваційні системи, що дають змогу виявляти та запобігати атакам, мінімізуючи ризики для цивільного населення та КІ.

Компанії, які займаються цими питаннями, інтегрують передові технології, такі як штучний інтелект, аналітика великих даних, системи відео, аудіо-спостереження, сенсори та протидронові рішення. Їх продукти та послуги орієнтовані на захист стратегічних об'єктів, місць масового скупчення людей і КІ. Такі корпорації співпрацюють із державними структурами, правоохоронними органами та приватними підприємствами, забезпечуючи комплексний підхід до вирішення проблеми.

Дослідження діяльності провідних світових компаній у сфері безпеки дозволяє зрозуміти тенденції розвитку галузі, визначити найефективніші практики та оцінити роль інновацій у боротьбі із сучасними загрозами. Це питання присвячене аналізу компаній, які займаються розробкою засобів та систем моніторингу терористичних актів та НС, використовуючи методи контролю та аналізу акустичного простору.

Основними розробниками у цій галузі є ряд світових компаній. Так, компанія «Rheinmetall Defence Electronics» розробила акустичну систему

локалізації стрілка ASLS (Acoustic Shooter Locating System) для підвищення рівня захисту екіпажу машини. Антени цієї системи складаються із восьми спеціальних мікрофонів, створених для високих рівнів звукового тиску, і забезпечують кругове покриття. Точність виявлення пострілу за дальністю становить $\pm 10\%$. Кутова точність виявлення під час зупинки і під час руху становлять відповідно менше 2° і 5° . Частота оновлення інформації складає менше 1,5 с [90].

Мініатюрна версія цієї системи AkSL (Akustisches Schützen-Lokalisationssystem) являє собою акустичний сенсорний блок для носіння на плечі, який дає можливість під час руху військовослужбовця зберігати у пам'яті інформацію щодо місця виникнення загрози; при цьому інформацію щодо азимута, вертикального кута і дальності на дисплеї наручних часів. На дисплеї також наявна схема локалізації, її орієнтація, час небезпечної події та заряд батареї. Система AkSL забезпечує точність за азимутом $\pm 5^\circ$, за дальністю $\pm 10\%$ і має масу поряд 500 г та максимальну дальність виявлення, яка на 20 % більше за далекобійність зброї, що вистрілила [91].



Рисунок 1.17. – Акустична система AkSL

Компанія «Raytheon BBN» розробила локатор пострілів Boomerang. Можливості цього локатора дозволяють визначати положення стрільця з точністю до 15° протягом 1 с після пострілу на відстані до 30 м. Boomerang встановлюється на щоглі в задній частині автомобіля і складається із семи невеликих мікрофонів, які сканують звук з невеликою різницею у часі. Використання спеціального алгоритму дозволяє визначити напрямок пулі та дальність до стрілка. Система працює на зміцненому ноутбуці з ОС Windows та забезпечує локалізацію стрілка шляхом використання 10-розрядної координатної сітки. Система використовує електронні карти місцевості для відображення потенційно небезпечного сектору [92].

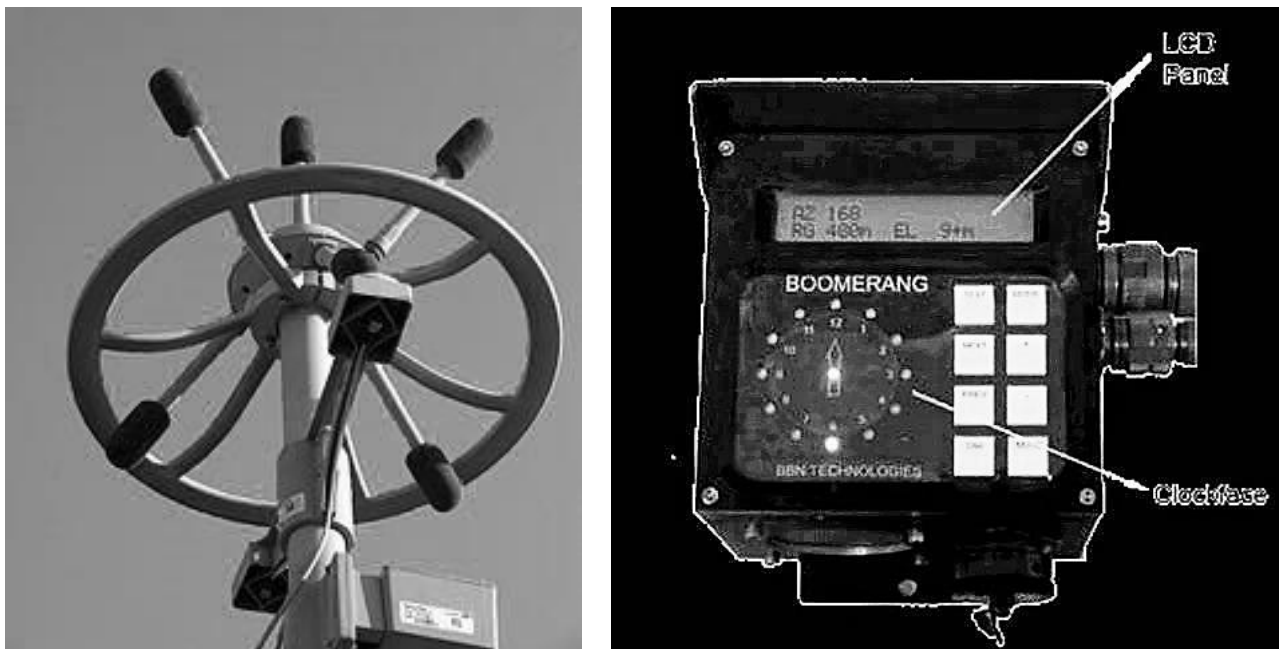


Рисунок 1.18 – Акустичний локатор пострілів Boomerang

Крім того, компанією «AAI Textron» розроблено систему PDCue (Projectile Detection and Cueing – визначення пострілу та сигналізація) для транспортних засобів, яка базується на установлених по кутах даху (що забезпечує повне покриття акустичного простору на 360°) чотирьох сенсорах. Похибка визначення пострілу по кутах азимута та місця становить порядку $\pm 1^\circ$, похибка за дальністю – менше 25 % та зменшується на дальності більше 350 м. Максимальна дальність ефективного контролю становить 1,2 км [93].

У свою чергу, компанією «Асоем-Метравіб» представлено пристрій Pearl Personal Equipment Add-on for Reactive Localization – доповнення до особистого спорядження для реакційної локалізації), який призначено для забезпечення військовослужбовця відносно дешевою системою виявлення та локалізації пострілу кулеметів, штурмових та снайперських гвинтівок. Пристрій включає мініатюрну акустичну матрицю чутливих елементів, процесорний блок з гірометром і людино-машинним інтерфейсом, який показує напрямок пострілу за азимутом та кутом місця за допомогою зелених та червоних світлодіодів. Ймовірність виявлення пострілу більше 95 %, похибка локалізації за азимутом та кутом місця становить $\pm 10^\circ$ і за дальністю $\pm 20^\circ$; час реакції менше однієї секунди [94].

Також ця компанія пропонує систему Pilarw для транспортних засобів та стаціонарних об'єктів, яка дає можливість у реальному масштабі часу визначати місце джерела вогню не тільки стрілецької зброї, но також ручних протитанкових гранатометів, мінометів та протитанкових ракет. Новий варіант для транспортних засобів Pilarw Vehicle має час реакції менше двох секунд та забезпечує точність за азимутом $\pm 2^\circ$ під час стоянки і $\pm 5^\circ$ під час руху. Точність за кутом місця становить $\pm 5^\circ$, точність за дальністю – від 10 до 20 % [95].



Рисунок 1.19 – Акустична система Pilarw

Нідерландська компанія «Microflown Avis» розробила інноваційні акустичні векторні сенсори AVS (Acoustic Vector Sensor) для визначення та локалізації пострілів стрілецької зброї, вогню артилерії, повітряних суден та транспортних засобів. Система на базі AVS дає змогу ідентифікувати місце мінометного пострілу з точністю 2 % за дальністю та менше 5° за азимутом [96].

Пристрій Sniper Egg – моноблоковий гвинтівковий локатор пострілу, розроблений компанією «Ultra Electronics» для встановлення із правого боку гвинтівки. Локатор має масу 450 г та дисплей 160x128 пікселів у якості людино-машинного інтерфейсу. Номінальна точність за азимутом та кутом міста становить $\pm 5^\circ$, а за дальністю – 15 % (на дисплеї відображається інформація щодо кількості подій та дистанція). Дальність виявлення становить від 30 до 1200 м. У компанії «Ultra Electronics» заявили про ймовірність виявлення та локалізації більше 90 % за низької частоти помилкових сигналів. Для плавності переміщення графічних елементів на дисплеї частота його оновлення становить 10 Гц [97].



Рисунок 1.19 – Моноблоковий гвинтівковий локатор пострілу Sniper Egg

Американська компанія «Cobham разом» з компанією «BioMimetic Systems (BMS)» розробила різні варіанти акустичної системи виявлення пострілів PinPoint для шпійної піхоти, а також для транспортних засобів та стаціонарних об'єктів. Варіант системи для шпійної піхоти PinPoint Dismount розроблено у формі плечового блока датчиків, які вимірюють дальність, напрямок і

вертикальний кут. Інформація подається у вигляді звукового повідомлення або виводиться на дисплей наручного годинника. Цей варіант обладнано спеціальним алгоритмом обробки інформації, що дозволяє виявляти і показувати постріли кожні 30 мс. Система може зберігати у пам'яті до 1000 пострілів, а кожен піхотинець може спостерігати за останніми 15 пострілами. Варіант системи для транспортних засобів PinPoint Vehicle має схожі характеристики стосовно часу аналізу, але більш високу точність виявлення, що зобумовлено використанням більш крупного загального сенсора розмірами 337x356x108 мм і масою 2,27 кг. Для відображення використовується зміцнений планшет з ОС Windows і можливістю підключення до системи Ethernet або радіозв'язку. Ця система також може зберігати у пам'яті до 1000 пострілів, а в машині є можливість відображати інформацію про останні 250 пострілів [98].



Рисунок 1.20 – Акустична система PinPoint Dismount

Проведений у роботі аналіз дає можливість встановити таке. Основні автоматизовані мобільні засоби акустичного моніторингу пострілів на відкритих площадках, які на сьогодні функціонують у розвинутих країнах світу, спрямовані на встановлення факту пострілу та пеленгації місця знаходження вогнепальної зброї.

В Україні також проводиться ряд досліджень щодо розробки аналогічного локалятора джерела пострілу. Так, у статті [99] автори пропонують структурну схему пристрою для локації джерела вогнепальних пострілів, детально

описуючи її структуру та принцип роботи прототипу. Наведено пояснення алгоритму запису й обробки звукових сигналів, а також подано результати лабораторних випробувань прототипу й оцінку ефективності похибки пеленгування приладу. Але у зазначеному прототипі локатора джерела пострілу також не розглядається можливість багатофакторного аналізу отриманих акустичних сигналів та ідентифікації джерела небезпеки, шляхом використання методів штучного інтелекту.

Наступний аналіз наукових джерел та інтернет-ресурсів свідчить, що основною проблемою дослідження методу акустичної ідентифікації БПЛА є необхідність зменшення часу оброблення даних у реальних умовах експлуатації БПЛА. Це питання ускладнюється обробкою значного обсягу інформації, що негативно впливає на ефективність швидкої ідентифікації.

Так, у дослідженні [100] було запропоновано вдосконалити існуючі набори даних за допомогою генеративних змагальних мереж (GAN). Це дозволило створювати штучні аудіозаписи, які імітують реальні звуки БПЛА. Результати показали, що GAN допомагає підвищити продуктивність класифікаторів, особливо у випадках нестачі реальних даних. Однак навчання моделей вимагає великих і різноманітних наборів даних, які іноді важко зібрати. Навіть з використанням GAN штучні дані не завжди повністю відповідають реальним звуковим умовам.

У дослідженні [101] зібрано аудіодані дронів із навантаженням та без, а також шумів навколишнього середовища. Для аналізу використовувались моделі у вигляді рекурентних нейронних мереж (recurrent neural networks, RNN), які показали високу точність у разі розрізнення навантажених і ненавантажених дронів та фонових шумів. Базуючись на аналізі цих джерел, встановлено, що головним недоліком аналізу акустичних даних, особливо за допомогою алгоритмів глибокого навчання, є велике значення обчислювальних ресурсів. Це може ускладнити використання в реальному часі.

Над удосконаленням цих параметрів працюють розробники з різних світових компаній та з різних галузей, такі як:

– «SoundCom Technologies», компанія із США, яка спеціалізується на розробці акустичних сенсорних систем для виявлення та класифікації звуків з різних джерел, у тому числі БПЛА. Вони використовують передові технології цифрової обробки звуку, щоб створювати рішення для безпеки і моніторингу, здатні визначати наявність дронів. Їх технології застосовуються в аеропортах і на критичних об'єктах для запобігання незаконним польотам і вторгненням [102];

– «DroneShield», австралійська компанія, є однією з провідних у розробці технологій безпеки від дронів. Вони пропонують комплексні рішення для виявлення, нейтралізації та блокування дронів, використовуючи акустичні, радарні та радіочастотні сенсори. Їх системи застосовуються в урядових організаціях, а також для охорони аеропортів та інших важливих об'єктів, допомагаючи вчасно виявляти дрони та запобігати несанкціонованим польотам [103];

– «ParaZero», ізраїльська компанія, займається розроблення систем безпеки для дронів. Вони використовують акустичні технології для виявлення небезпечних ситуацій, таких як порушення сигналу або проблеми з дронами під час польоту. Компанія орієнтується на забезпечення безпеки в авіаційній індустрії та серед підприємств, які працюють із дронами, допомагаючи запобігати аваріям та несанкціонованим польотам [104];

– «Dronelock», компанія з Нідерландів, розробляє технології для боротьби з дронами, включаючи акустичні системи для виявлення та відслідковування БПЛА. Їх сенсори допомагають ідентифікувати місцезнаходження дронів і захищати важливі об'єкти, такі як аеропорти, промислові зони та інші чутливі інфраструктури [105];

– «Microflown Avisia», також з Нідерландів, є лідером у сфері акустичних сенсорів для виявлення дронів. Вони використовують мікрофлуд-акустичні сенсори, які здатні точно виявляти звуки, створювані БПЛА, навіть у складних умовах. Їх системи застосовуються для захисту аеропортів, військових баз і

державних установ, а також для запобігання незаконним або небезпечним вторгненням дронів у повітряний простір.



Рисунок 1.21 – Акустична система DroneShield

В нашій країні триває розроблення акустичних локаторів для виявлення БПЛА. Так, у роботі [106] запропоновано простий та дешевий для конструювання акустичний детектор з одним мікрофоном СМА-4544PF-W із поролоновою вітрозахисною насадкою, а для забезпечення широкого

динамічного діапазону та захисту детектора від перевантаження використано підсилювач із системою автоматичного регулювання підсилення зі зворотним регулюванням на базі інтегральної мікросхеми MAX9814. Метод обробки акустичних сигналів від малих БПЛА ґрунтується на використанні згорткової нейронної мережі. Практичне застосування цього детектору полягає у створенні індивідуального засобу захисту від малих БПЛА на дистанції до 200 м.

Таким чином, аналіз існуючих схемних рішень моніторингу попередніх факторів різного роду небезпечних подій як джерел НС показав, що на сьогодні у розвинених країнах світу існують технічні рішення акустичного моніторингу інцидентів використання вогнепальної зброї та БПЛА.

Висновки до розділу 1

1. Джерелами НС місцевого рівня є небезпечні події природного, техногенного, соціального та воєнного характеру, які виникають на території міста та за своїми наслідками становлять загрозу життю або здоров'ю населення міста чи призводять до завдання матеріальних збитків. Аналіз масштабних пожеж на територіях міст України показує, що більшість із них спричинені ракетними обстрілами чи іншими актами агресії. Внаслідок військової агресії РФ у містах України збільшилась кількість НС терористичного характеру, які невід'ємно пов'язані з незаконним зберіганням та використанням вогнепальної зброї. Окрім вогнепальної зброї, за останні два роки зріс відсоток випадків застосування БПЛА, зокрема для терористичних атак. Унаслідок таких небезпечних подій значних втрат зазнають ОКІ та житлові будівлі, що призводить до соціальних, матеріальних та економічних збитків.

2. Запобігання виникненню НС місцевого рівня включає реалізацію на територіях та ОКІ міст України заходів щодо державного регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері ЦЗ та управління ризиками виникнення НС техногенного характеру та пожеж, а також забезпечення техногенної та пожежної безпеки. Серед заходів державного регулювання

діяльності суб'єктів господарювання у сфері ЦЗ залишаються цілком відкритими для держави питання щодо створення та функціонування в містах системи моніторингу і прогнозування НС. Показано, що одним із напрямів раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів в акустичному діапазоні.

Правові засади запобігання НС у містах України та захисту КІ ґрунтуються на національному законодавстві, узгодженому з міжнародними правовими нормами. Діяльність ДСНС у цій сфері ЦЗ спрямована на зміцнення співпраці з Механізмом цивільного захисту ЄС, що дає можливість здійснювати моніторинг потенційних загроз, прогнозувати ризики, розробляти заходи щодо підвищення безпеки, включаючи створення систем оповіщення, планування евакуаційних маршрутів і вдосконалення інфраструктури ЦЗ.

3. Аналіз стану запобігання та моніторингу НС у розвинутих країнах світу засвідчив, що ефективність цих заходів залежить від рівня інтеграції сучасних технологій, координації між державними та приватними структурами, а також впровадження єдиної системи моніторингу. Провідні країни, такі як США, Велика Британія, Німеччина та Японія, використовують централізовані платформи для обробки великих обсягів даних, що забезпечує швидке реагування та прийняття рішень у кризових ситуаціях. Аналіз існуючих схемних рішень моніторингу попередніх факторів різного роду небезпечних подій, як джерел НС, показав, що на сьогодні у розвинених країнах світу існують технічні рішення акустичного моніторингу інцидентів використання вогнепальної зброї та БПЛА.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ МІСТА ЯК СКЛАДОВОЇ ПРОЦЕСУ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ МІСЦЕВОГО РІВНЯ В КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY»

2.1 Особливості розвитку концепції «Smart City»

Сучасний світ переживає безпрецедентні темпи урбанізації. За даними ООН, до 2050 року близько 68 % населення планети проживатиме в містах. Це створює величезне навантаження на міську інфраструктуру, ресурси та соціальні системи, викликаючи такі проблеми, як транспортні затори, забруднення довкілля, енергетичний дефіцит, дефіцит житла та соціальна нерівність. У відповідь на ці виклики виникла та активно розвивається концепція «Smart City» – інтелектуального міста, яке використовує передові технології та інноваційні підходи для підвищення ефективності управління, покращення якості життя мешканців та забезпечення сталого розвитку.

«Smart City» – це не просто місто, оснащене технологіями; це екосистема, де технології слугують інструментом для інтеграції, оптимізації та трансформації міського середовища. Її центральна ідея полягає у використанні інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для збору, обробки та аналізу величезних обсягів даних, що генеруються різними міськими системами та мешканцями, з метою прийняття обґрунтованих рішень та надання ефективних послуг [108–114].

Історія концепції «Smart City» бере свій початок у кінці ХХ – на початку ХХІ століття, спочатку зосереджуючись на технологічних рішеннях для окремих міських проблем. На цьому етапі домінував підхід, орієнтований на «технології заради технологій», де місто розглядалося як сукупність розрізнених систем, які можна оптимізувати за допомогою ІКТ.

Ключові етапи еволюції «Smart City»

Початок 2000-х років – технологічна орієнтація. Перші ініціативи у сфері розумних міст були зосереджені переважно на впровадженні сенсорних мереж, систем відеоспостереження, електронного урядування (e-Government) та

інтелектуальних транспортних систем (ITS). Основний акцент робився на підвищенні ефективності функціонування міської інфраструктури та забезпеченні безпеки.

Середина 2000-х – 2010-ті роки – активізація корпоративних ініціатив. У цей період провідні технологічні корпорації, зокрема *IBM, Cisco, Siemens* та ін., почали активно формувати власні бачення розвитку «Smart City», пропонуючи комплексні платформи та інтегровані рішення. Це сприяло поширенню системного підходу до управління міським середовищем, однак у низці випадків призводило до залежності міст від конкретних постачальників технологій (так званих «vendor lock-in» ситуацій).

2010-ті роки – сьогодення – холістичний і людиноцентричний підхід. Сучасна інтерпретація концепції «Smart City» виходить за межі виключно технологічної парадигми. Вона дедалі більше орієнтується на підвищення якості життя населення, забезпечення сталого економічного розвитку, екологічної стійкості та соціальної інклюзивності. Концепція еволюціонувала від моделі «технології в місті» до розуміння «місто, що функціонує раціонально завдяки технологіям».

При цьому розумність міського середовища розглядається як емерджентна характеристика, що формується внаслідок інтеграції різних систем, взаємодії інформаційних потоків та активної участі громадян у процесах управління. Сучасні моделі розвитку розумних міст спрямовані на досягнення оптимального співвідношення між впровадженням інноваційних технологій та реалізацією соціальних, економічних і екологічних завдань, орієнтованих на підвищення добробуту міських громад [115–119].

Функціонування будь-якого розумного міста ґрунтується на розвиненій технологічній інфраструктурі, що забезпечує збір, передавання, оброблення та аналіз великих обсягів даних. За даними рис. 2.1 ключовими складовими цієї інфраструктури є такі технологічні компоненти.

Інтернет речей (Internet of Things, IoT). IoT являє собою мережу взаємопов'язаних фізичних об'єктів – сенсорів, датчиків, пристроїв,

транспортних засобів, будівель тощо, оснащених електронікою, програмним забезпеченням та засобами зв'язку. Це дозволяє їм здійснювати збір, обмін і передавання даних. У межах «Smart City» технології IoT застосовуються для моніторингу транспортних потоків, якості повітря, рівня шуму, споживання енергії, стану інфраструктурних об'єктів, управління відходами та інших міських процесів.



Рисунок 2.1 – Основні складові технологічної інфраструктури розумного міста

Великі дані (Big Data) та аналітика. Збір значних обсягів різномірних даних із численних джерел (пристроїв IoT, соціальних мереж, державних реєстрів тощо) потребує використання високопродуктивних інструментів для їх зберігання, оброблення та аналітичного опрацювання. Технології Big Data забезпечують можливість виявлення закономірностей, прогнозування подій та підтримки процесів ухвалення рішень у реальному часі.

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН). Алгоритми ШІ та МН застосовуються для автоматизації управлінських процесів, оптимізації функціонування міських систем (зокрема, адаптивного регулювання світлофорів, прогнозування потреб у громадському транспорті), персоналізації

послуг і підвищення рівня безпеки шляхом розпізнавання облич та аналізу аномальних ситуацій.

Хмарні обчислення та периферійна обробка даних (Edge Computing). Хмарні платформи забезпечують масштабоване зберігання та оброблення даних, а також розміщення застосунків «Smart City». Технологія Edge Computing передбачає оброблення інформації безпосередньо поблизу джерела її генерації, що дає можливість зменшити затримки передавання та навантаження на центральні сервери – це є критично важливим для систем, які працюють у режимі реального часу.

Мобільні технології та мережі п'ятого покоління (5G). Поширення мобільних пристроїв і розвиток мереж 5G із високою пропускнуою здатністю та низькою затримкою створюють основу для надання громадянам мобільних послуг, збору даних про пересування населення та інтеграції численних пристроїв IoT в єдину міську екосистему.

Геоінформаційні системи (ГІС). ГІС-технології відіграють ключову роль у візуалізації, аналізі та управлінні просторовими даними. Вони забезпечують підтримку процесів міського планування, управління інфраструктурними ресурсами та реагування на надзвичайні ситуації, сприяючи підвищенню ефективності міського управління.

Більшість дослідників та міжнародних організацій сходяться на думці, що концепція «Smart City» охоплює шість основних взаємопов'язаних вимірів (або стовпів), що є похідними від європейської моделі «Smart City Index». Характеристику цих вимірів наведено у табл. 2.1.

Ці виміри не існують ізольовано, а взаємодіють, створюючи синергетичний ефект. Наприклад, розумна мобільність сприяє розумному середовищу через зменшення викидів, а розумне управління підтримує всі інші виміри, надаючи цифрові інструменти та прозорість.

Незважаючи на значний потенціал, реалізація концепції «Smart City» стикається з низкою серйозних викликів.

Кібербезпека та приватність даних. Збільшення кількості підключених пристроїв та обсягів даних створює нові вразливості для кібератак. Захист персональних даних громадян від несанкціонованого доступу та зловживань є критично важливим етичним та юридичним питанням.

Таблиця 2.1 – Виміри (стовпи) концепції «Smart City»

Вимір (Стовп)	Мета	Компоненти / Ключові елементи
Розумна економіка (Smart Economy)	Сприяння інноваційному розвитку, підвищення конкурентоспроможності, формування сприятливого бізнес-середовища	Цифрова економіка, підтримка стартапів, залучення інвестицій, цифрові платформи для бізнесу, гнучкий ринок праці, інноваційні кластери
Розумні люди (Smart People)	Розвиток людського капіталу, сприяння креативності, інклюзивності та активній соціальній участі	Доступна освіта (включно з цифровою грамотністю), культурне розмаїття, соціальна інтеграція, активне громадянство, цифрові платформи для взаємодії громади
Розумне управління (Smart Governance)	Підвищення прозорості, ефективності та підзвітності органів міського управління	Електронне урядування (e-Government), відкриті дані (Open Data), цифрові послуги для громадян, e-Participation, кібербезпека
Розумна мобільність (Smart Mobility)	Оптимізація транспортних потоків, зменшення заторів та шкідливих викидів, розвиток стійких видів транспорту	Інтелектуальні транспортні системи (ITS), громадський транспорт, каршеринг/байкшеринг, інфраструктура для електромобілів, розумні паркінги, мультимодальне планування
Розумне середовище (Smart Environment)	Зменшення екологічного впливу, сталий розподіл ресурсів, покращення якості довкілля	Моніторинг якості повітря та води, інтелектуальне управління відходами, енергоефективні будівлі, відновлювані джерела енергії, озеленення, управління водними ресурсами
Розумне життя (Smart Living)	Підвищення якості життя, доступності послуг та забезпечення безпеки мешканців	Розумні будинки, телемедицина, культурні й рекреаційні можливості, громадська безпека (відеоспостереження, оповіщення), доступне житло

Цифровий розрив та соціальна інклюзія. Не всі мешканці мають рівний доступ до цифрових технологій або необхідні цифрові навички. Це може

поглибити соціальну нерівність та виключити певні групи населення з переваг «Smart City».

Фінансування та інвестиції. Впровадження «Smart City»-проектів вимагає значних капіталовкладень у технології, інфраструктуру та людський капітал. Пошук стійких моделей фінансування, включаючи державно-приватне партнерство, є ключовим.

Інтероперабельність та стандартизація. Відсутність єдиних стандартів та інтероперабельності між різними системами та платформами може призвести до розрізнених, неефективних рішень та ускладнити масштабування.

Політична воля та управління змінами. Успішна реалізація вимагає довгострокового стратегічного бачення, сильної політичної волі, міжвідомчої співпраці та здатності до управління комплексними змінами у міській адміністрації.

Прийняття мешканцями. Без активної участі та прийняття з боку громадян навіть найпередовіші технології не зможуть реалізувати свій потенціал. Важливо забезпечити прозорість, інформування та залучення громади.

Етичні аспекти. Використання ШІ та розширеного спостереження порушує питання етичних норм, потенційної дискримінації та можливості зловживання владою.

Незважаючи на виклики, багато міст по всьому світу успішно впроваджують елементи «Smart City».

Сінгапур часто називають лідером у сфері «Smart City». Його стратегія «Smart Nation» охоплює цифрові послуги для громадян, інтелектуальне управління транспортом через IoT, сенсори для моніторингу довкілля та ініціативи у сфері охорони здоров'я. Одним із прикладів є використання «цифрових близнюків» для моделювання міського розвитку.

Барселона відома своїм інноваційним підходом до сталого розвитку. Місто впровадило інтелектуальні системи управління освітленням, розумне управління водними ресурсами, сенсори для оптимізації паркування та відкриті дані для заохочення інновацій.

Амстердам фокусується на енергоефективності, сталому транспорті та активній підтримці стартапів через платформу «Amsterdam Smart City».

Відень орієнтується на якість життя мешканців, соціальну інклюзію та сталий розвиток, що відображено в його стратегії «Smart City Wien Framework Strategy 2050».

Майбутнє «Smart City» буде характеризуватися подальшою інтеграцією технологій та посиленням людиноцентричного підходу. Ключові тенденції включають:

Гіперконнективність. Розвиток 6G та інших передових мережевих технологій забезпечить ще більшу швидкість та надійність зв'язку для мільярдів пристроїв.

Квантові обчислення. Потенціал квантових обчислень може революціонізувати обробку даних та криптографію, відкриваючи нові можливості для «Smart City» (і нові виклики для кібербезпеки).

Цифрові двійники (Digital Twins). Створення віртуальних копій реальних міських систем, що дозволить моделювати сценарії, тестувати рішення та оптимізувати управління в реальному часі.

Автономні системи. Подальший розвиток безпілотних транспортних засобів, дронів для доставки та моніторингу, а також роботизованих рішень для обслуговування міста.

Стійкість та адаптивність. З огляду на кліматичні зміни та інші глобальні виклики, «Smart City» будуть все більше зосереджуватися на підвищенні своєї стійкості до природних катаклізмів, криз та швидкої адаптації до змін.

Розумніші громадяни. Активне залучення громадян до співтворення міста, що передбачає їхню участь у зборі даних (громадянська наука), розробці додатків та прийнятті рішень.

Етичний ІІІ. Все більше уваги приділятиметься розробці та впровадженню ІІІ-систем, які є справедливими, прозорими та підзвітними, з чіткими етичними рамками.

Таким чином, концепція «Smart City» демонструє суттєвий потенціал для підвищення ефективності управління міським середовищем та забезпечення безпеки громадян. Науково-технічний розвиток у сфері інформаційних технологій, інтеграція систем Інтернету речей, великих даних, штучного інтелекту, хмарних обчислень і мобільних технологій створює передумови для формування комплексної інфраструктури міста, здатної забезпечувати безперервний моніторинг та аналіз міського середовища в реальному часі.

У цьому контексті особливої значущості набуває розробка підсистеми моніторингу та запобігання НС, що дає змогу інтегрувати дані з різних джерел – сенсорів, відеоспостереження, транспортних систем та соціальних платформ – для своєчасного прогнозування ризиків, швидкого реагування та підвищення безпеки населення. Така підсистема є ключовим елементом ЦЗ у межах концепції «Smart City» і сприяє збалансованому поєднанню технологічних рішень із соціально-економічними та екологічними цілями міського розвитку.

Інтеграція сучасних інформаційно-технологічних рішень у систему ЦЗ міста забезпечує підвищення ефективності управління НС, формує основу для сталого та безпечного розвитку міського середовища та сприяє підвищенню якості життя його мешканців.

2.2 Структурно-функціональне моделювання особливостей функціонування системи безпеки міста

Особливості функціонування системи моніторингу акустичного простору території міста досліджено за допомогою використання методу структурно-функціонального моделювання, який реалізовано за стандартом IDEF0 [120, 121]. Це дає змогу навести алгоритм процесу як діаграми та наочно показати послідовність процесів забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста в умовах наступного завдання: визначити сутність структурно-функціонального підходу і побудувати модель для опису процесу спостереження та обробки інформації про джерела небезпеки, а також прогнозування виникнення на

території міста НС різного характеру з подальшим розробленням ефективних антикризових рішень.

Результати структурно-функціонального моделювання дали змогу створити наочну модель та відтворити учасників процесу забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста [122]. Це допомогло розробити послідовність дій щодо стратегічного розвитку системи безпеки міста з урахуванням створення на території міста системи моніторингу акустичного простору його території, нормативно-правової бази та наявності відповідних механізмів (ресурсів).



Рисунок 2.2 – Контекстна діаграма системи функціонування міста

Моделювання процесів забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста проведено у декілька етапів. На першому етапі здійснено побудову контекстних діаграм функціонування міста (блок A0 на рис. 2.2) з подальшою декомпозицією його процесів (рис. 2.3). На цих діаграмах наведено: вхідні (соціальні, енергетичні, фінансові, транспортні та матеріально-технічні) потоки; вхідні (фінансові, природні, техногенні, соціальні, військові та інформаційні) загрози для нормального функціонування міста; вихідні потоки, які характеризуються соціально-демографічними та фінансово-економічними

показниками; вихідні потоки, які характеризуються рівнями економічної, соціальної, інформаційної, екологічної, науково-технічної, військової безпеки та рівнем виникнення НС у місті; механізми та керуючі впливи.

До механізмів впливу належать: місцеві органи влади, служби міста; служби безпеки міста, а до управлінського впливу – законодавство України, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, укази та розпорядження Президента України, розпорядження виконавчої влади.

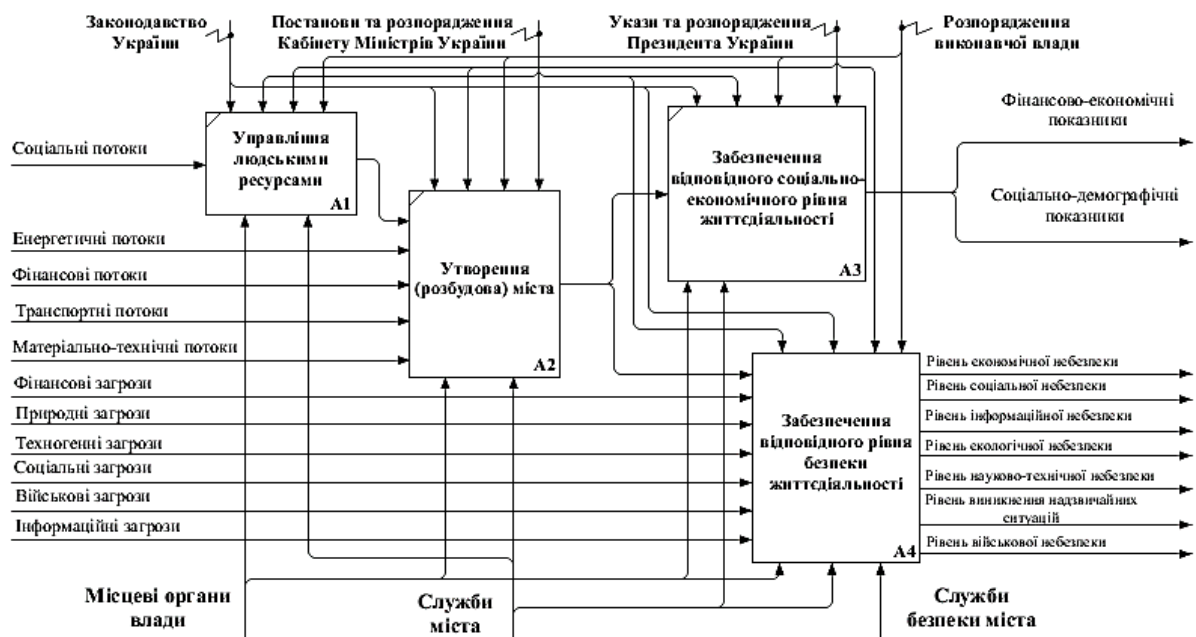


Рисунок 2.3 – Діаграма декомпозиції системи функціонування міста

На рис. 2.3 наведено діаграму декомпозиції як результат послідовного етапу моделювання за методологією IDEF0 процесів функціонування міста. Модель містить такі етапи: управління людськими ресурсами; утворення (розбудова) міста; забезпечення відповідного соціально-економічного рівня життєдіяльності; забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності. Система державного управління людськими ресурсами (блок A1) може бути умовно поділена на три основних блоки. До першого із них належать органи, які відповідають за соціальний розвиток і стежать за постійним покращенням громадського харчування, побутового обслуговування, житлово-комунальним господарством, торгівлею продовольчими та промисловими товарами, а також за

охороною здоров'я. Другий блок охоплює міністерства і відомства, які відповідають за державне управління демографічними процесами, а також у сфері освіти, професійної орієнтації, зайнятості, праці та соціального забезпечення. До третього блоку входить орган управління державною службою, який відповідає за підбір, підготовку, розстановку і раціональне використання державних службовців. Ці службовці відповідають за ефективне функціонування перших двох блоків системи управління людськими ресурсами.

Процес утворення (розбудови) міста (блок А2) має відбуватися в умовах реалізації концепцій креативної економіки на регіональному та місцевому рівнях. Особливостями реалізації цієї концепції є: зниження потужності факторів розвитку індустріального міста, зміна пріоритетів до залучення креативного класу; підвищення уваги до кваліфікації, адаптації, мобільності робочої сили; посилення значущості якості життя, забезпечення соціальної стабільності та захищеності населення; поглиблення міжнародного співробітництва не тільки на державному рівні, а й налагодження тісної співпраці між містами; оновлення інфраструктури, основаної на використанні найсучасніших інформаційних технологій; підвищення швидкості, чутливості та гнучкості ухвалення рішень; інноваційність та міжкультурність розвитку; зростання інтересу до якості освіти населення та підсилення науково-технічного та науково-дослідного потенціалу державних інститутів та бізнес-структур, налагодження їх тісної взаємодії.

Для створення креативного міста необхідно забезпечити відповідний соціально-економічний контекст (блок А3), який містить: підтримку та розвиток високотехнологічного підприємництва; забезпечення інвестицій в людський капітал і підтримку креативного підприємництва; підтримку та сприяння науковим та дослідним розробкам; оптимізацію культурних та суспільних послуг із вільним доступом до них; широке використання інформаційних технологій у сфері державного управління та застосування інноваційних підходів для досягнення поставлених цілей; створення умов для покращення якості життя мешканців міста; поліпшення комунікації між різними формами

підприємництва та забезпечення тісних зв'язків із галузями мистецтва та культури.

Забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста досягається через виявлення, запобігання, послаблення, усунення і відвернення загрози, здатної призвести до соціальних та екологічних збитків, знищення матеріальних та духовних цінностей, перешкоджання їх прогресивному розвитку (блок А4).

Так, на рис. 2.4 наведено діаграму декомпозиції процесу забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста. Модель містить такі етапи: реєстрацію загроз для життєдіяльності міста; аналіз та систематизацію інформації про загрози; формування бази даних про загрози; моделювання та прогнозування розвитку небезпек для життєдіяльності міста; оцінку рівня цих небезпек та ухвалення антикризового рішення; виконання ухваленого антикризового рішення.

Реєстрація засобами контролю загрози для життєдіяльності міста здійснюється у блоці А41. Отримана інформація про фактори небезпеки на території самого міста або на об'єктах критичної інфраструктури міста проходить процес аналізу та систематизації інформації про загрози для життєдіяльності міста (блок А42). Результатом є інформація, яка оброблена та надана так, як необхідно для формування бази даних про загрози для життєдіяльності міста (блок А43), а також для моделювання та прогнозування розвитку небезпеки для життєдіяльності міста (блок А44).

Оброблена інформація у відповідному форматі передається до блоку А44, де проводиться її аналіз і систематизація, на основі чого робиться висновок щодо рівня небезпеки в місті. Забезпечення швидкодії системи є особливо важливим, та використання автоматизованих засобів обробки інформації значною мірою прискорює цей процес і дає змогу створити електронні бази даних та знань, які доступні в реальному часі. Застосування відповідних математичних методів надає змогу моделювати небезпечні ситуації, прогнозувати їх розвиток та рівень

і відображати цю прогнозовану динаміку катастрофічних подій у вигляді графіків, зокрема використання електронних карт.

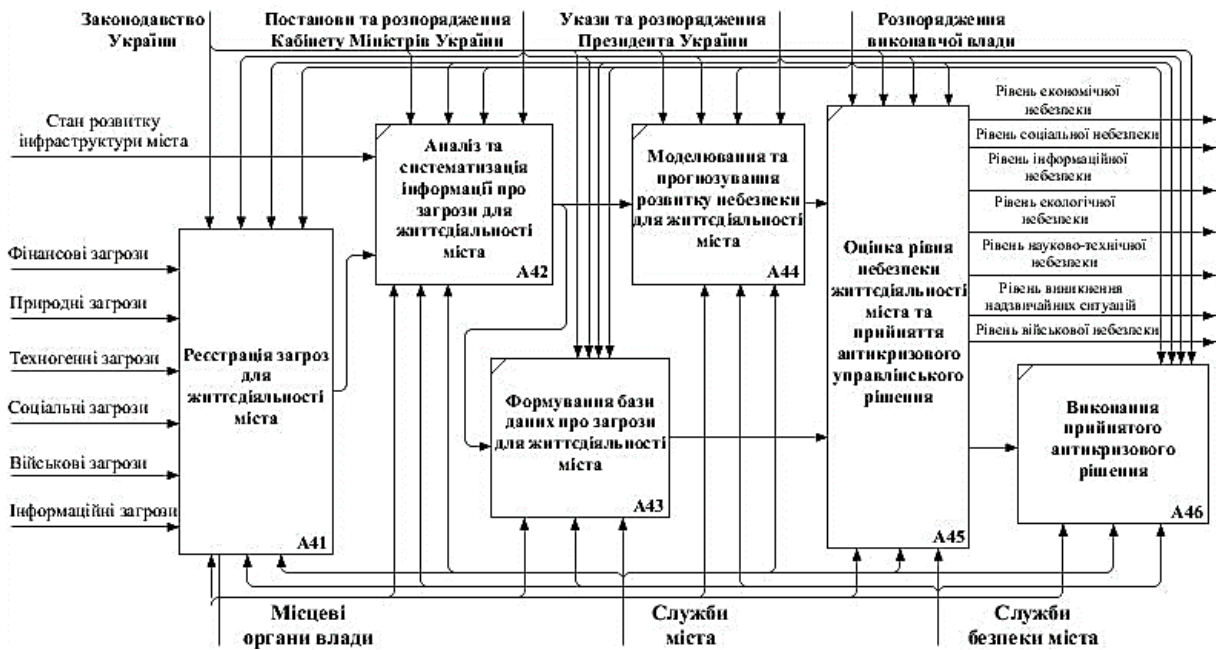


Рисунок 2.4 – Діаграма декомпозиції процесу забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста

Блок А45 є системою оцінки рівня небезпеки життєдіяльності міста та підтримки ухвалення антикризових управлінських рішень. Особа, відповідальна за ухвалення рішень, визначає один або декілька критеріїв, за якими проводиться прогностичне моделювання розвитку небезпеки та розробляються альтернативні варіанти управлінських рішень, які підтримуються відповідними розрахунками. Із низки доступних управлінських рішень особа, відповідальна за ухвалення рішень, вибирає один або може встановлювати додаткові критерії, на підставі яких проводиться моделювання та розроблення управлінських рішень. Ці рішення спрямовані на запобігання небезпечному розвитку ситуації до рівня катастрофи. Якщо її не можна уникнути, розроблені управлінські рішення спрямовані на мінімізацію наслідків. Затверджені рішення особи, відповідальної за ухвалення рішень, передаються для виконання в межах системи виконання антикризових рішень (блок А46), де вони формалізуються та надсилаються виконавцям – службам міста та службам безпеки міста, які функціонують у рамках чинної ЄДСЦЗ.

Так, на рис. 2.5 наведено діаграму декомпозиції процесу реєстрації загроз для життєдіяльності міста. Модель містить такі етапи: організацію фінансового аудиту (блок А416); організацію моніторингу соціального стану (блок А415); організацію моніторингу довкілля (блок А414); організацію відеоспостереження (блок А413); організацію радіаційного, хімічного та біологічного моніторингу (блок А412); організацію спектрального аналізу випромінювань, які виникають від джерел небезпек (блок А411). Процес формування звіту про загрози для життєдіяльності міста реалізується у блоці А417.

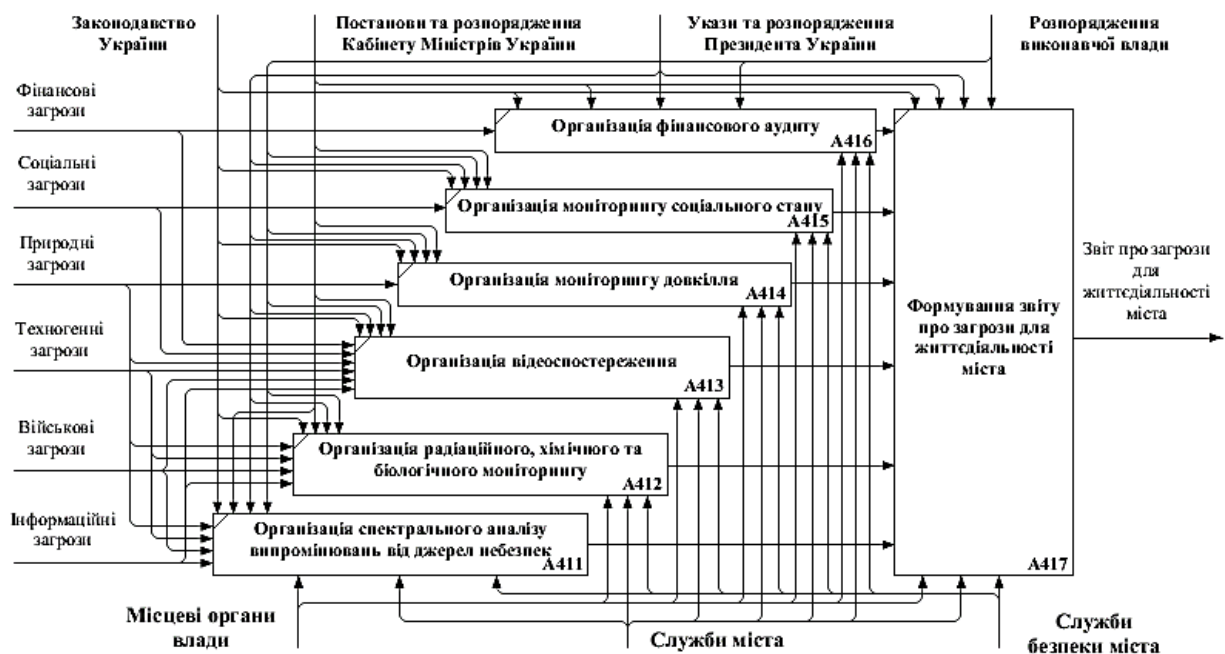


Рисунок 2.5 – Діаграма декомпозиції системи реєстрації загроз для життєдіяльності міста

Блок А411 є складовою системи безпеки міста, який має забезпечувати організацію спектрального аналізу випромінювань, які виникають від джерел небезпек з різними спектральними характеристиками, а саме: в акустичному, радіо-, інфрачервоному, оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма- та космічних променів (рис. 2.6).

Кожен із методів спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек у різних частотних діапазонах має як недоліки, так і переваги [123–125]. Отже, з метою виявлення та ідентифікації джерел НС місцевого рівня в монографії обрано метод спектрального аналізу акустичного простору міста.

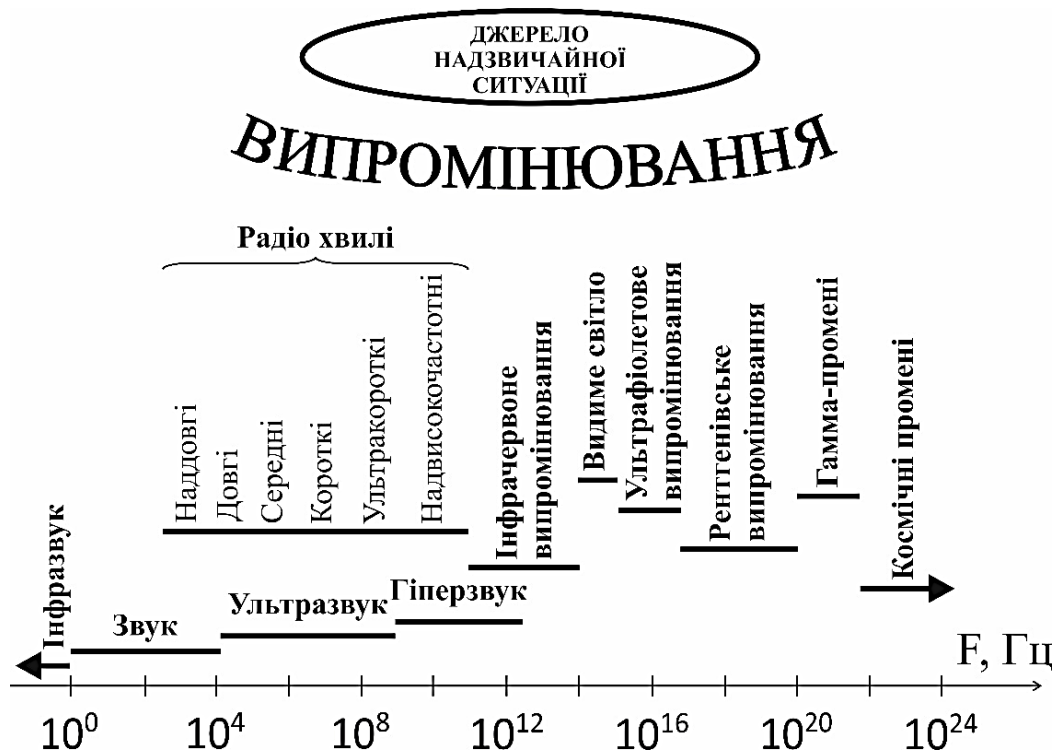


Рисунок 2.6 – Спектральні характеристики випромінювань від джерел НС

Таким чином, розроблено (за стандартом IDEF0) структурно-функціональну модель стратегічного розвитку системи безпеки міста, з урахуванням нормативно-правової бази України та наявності в державі відповідних механізмів (ресурсів). У процесі моделювання показано, що процес реєстрації загроз для життєдіяльності міста включає організацію фінансового аудиту, моніторингу соціального стану та довкілля, відеоспостереження, радіаційного, хімічного та біологічного моніторингу, а також спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек. Встановлено, що організація спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек включає комплексний аналіз характеристик випромінювань у різних частотних діапазонах (в акустичному, радіо, інфрачервоному, оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма- та космічних променів). Тому реалізація ефективних заходів запобігання виникненню НС місцевого рівня потребує розробки міської системи оперативного моніторингу і прогнозування НС на основі спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації небезпечних подій, з

подальшим розробленням рішень щодо управління службами безпеки та комунальними службами міста.

2.3 Моделювання процесу застосування спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій місцевого рівня

Реалізація спектрального аналізу акустичного простору міста досягається тим, що безперервний та тривалий у реальному масштабі часу оперативний моніторинг за територією міста здійснюється за рахунок об'єднання у систему моніторингу наземних автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпек, а також отримання й обробки інформації від наземних пристроїв акустичного контролю ситуаційним центром, функціонування якого пов'язане із системою виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС [126].

Методи пасивної акустичної локації джерел небезпек мають свої специфічні особливості, а саме: в умовах відсутності інформації про тривалість акустичного випромінювання дальність до джерела випромінювання неможливо визначити за даними прийому тільки одного наземного засобу автоматизованого контролю акустичного простору. У зв'язку з цим для визначення координат джерела небезпеки необхідно застосовувати комплекс із двох або декількох рознесених у просторі засобів автоматизованого контролю акустичного простору, які з'єднані каналами зв'язку та утворюють комп'ютерну мережу; прийом прямого, а не відбитого сигналу, полегшує виявлення і вимір координат джерела небезпеки, але незнання форми сигналу та наявність інших джерел акустичного випромінювання ускладнює процес оперативного моніторингу за зоною НС; відсутність передавальних пристроїв при пасивній локації спрощує апаратуру, а також підвищує її енергозбереження та скритність [127].

Функціональну схему цієї системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору, ситуаційного центру, підсистеми зв'язку та передачі телеметричної інформації, а також підсистеми

виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС, зображено на рис. 2.7.

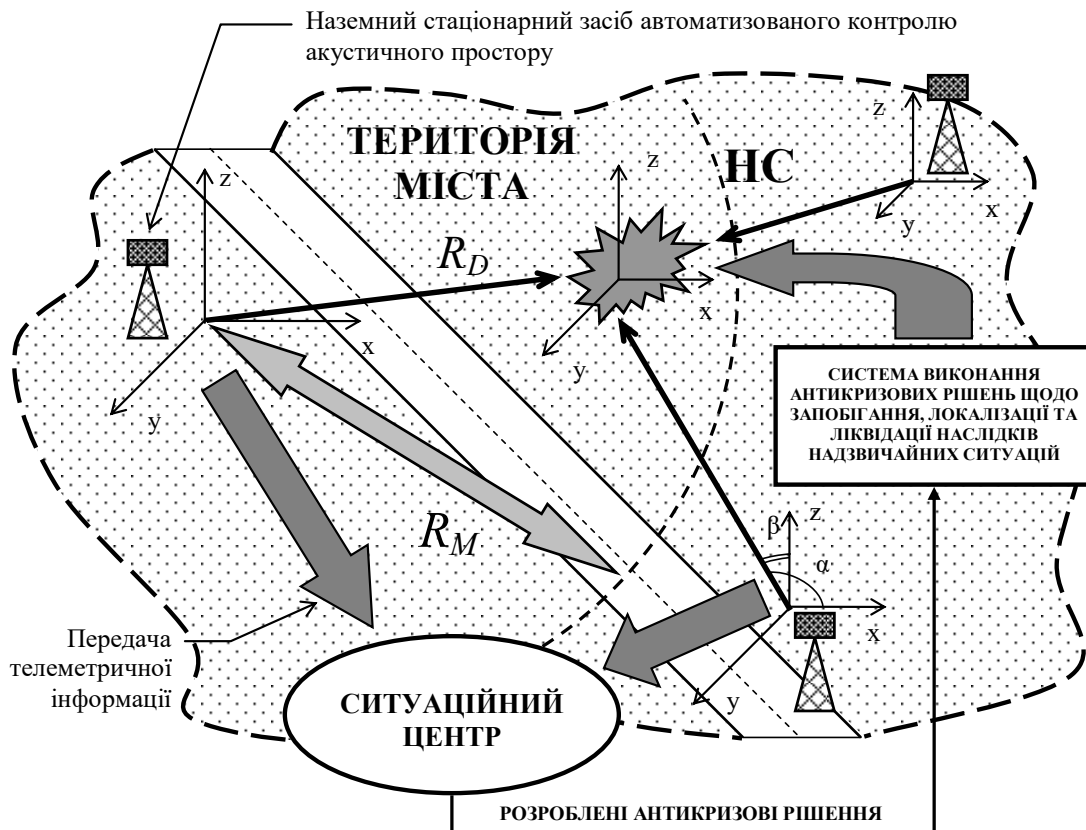


Рисунок 2.7 – Схема функціонування системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору на території міста, ситуаційного центру, підсистеми зв'язку та передавання телеметричної інформації, а також підсистеми виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС на території міста

Функціонування розробленої підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони НС на території міста повинно здійснюватися у складі функціонуючої в Україні ЄДСЦЗ та в межах класичного контуру управління, який забезпечує:

- 1) збір, обробку та аналіз інформації;
- 2) моделювання НС різного характеру на території міста;
- 3) розробку та ухвалення (в рамках ситуаційного центру) управлінських рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації НС різного характеру, а також мінімізації їх наслідків;

4) виконання рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків.

Основним показником ефективності функціонування підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони НС на території міста є достовірність ідентифікації джерела небезпеки за видом та місцем виникнення.

Фактори, які можуть впливати на достовірність акустичної ідентифікації джерела НС, можна об'єднати у три групи. До першої групи належать фактори, які характеризують безпосередньо динаміку зміни показників розвитку джерела небезпеки (наприклад, тактико-технічні характеристики засобів, які використовуються для проведення терористичних дій; кількість та інтенсивність використання цих засобів тощо). До другої групи факторів належать тактико-технічні характеристики засобів контролю акустичного простору (метрологічні та експлуатаційні показники засобів отримання та обробки інформації). До третьої групи факторів належать географічні та фізико-хімічні характеристики місця виникнення джерела небезпеки та середовища розповсюдження інформаційного акустичного сигналу [128, 129].

Розглядаючи умови приземного розповсюдження в атмосфері акустичних хвиль від джерела НС, необхідно враховувати високу чутливість звукового випромінювання в атмосфері до значення таких метеорологічних параметрів, як швидкість та напрямок вітру, температура, вологість повітря та атмосферний тиск, а також до їх змін з висотою. Суттєвий вплив на дальність приземного розповсюдження звуку також здійснюють характеристики турбулентності, підстиляючої поверхні, геометрії поширення та джерела звуку.

Зазвичай у процесі аналізу характеристик звукових хвиль, що поширюються, розглядають середній стан атмосфери, що мало змінюється протягом довжини хвилі. Але на фоні цих відносно повільних змін середовища існують різношвидкісні зміни у стані атмосфери (так звані турбулентні флуктуації метеорологічних параметрів), які викликають флуктуації амплітуди і фази звукової хвилі, розсіювання звуку, додаткове ослаблення енергії випромінювання, порушення когерентності тощо.

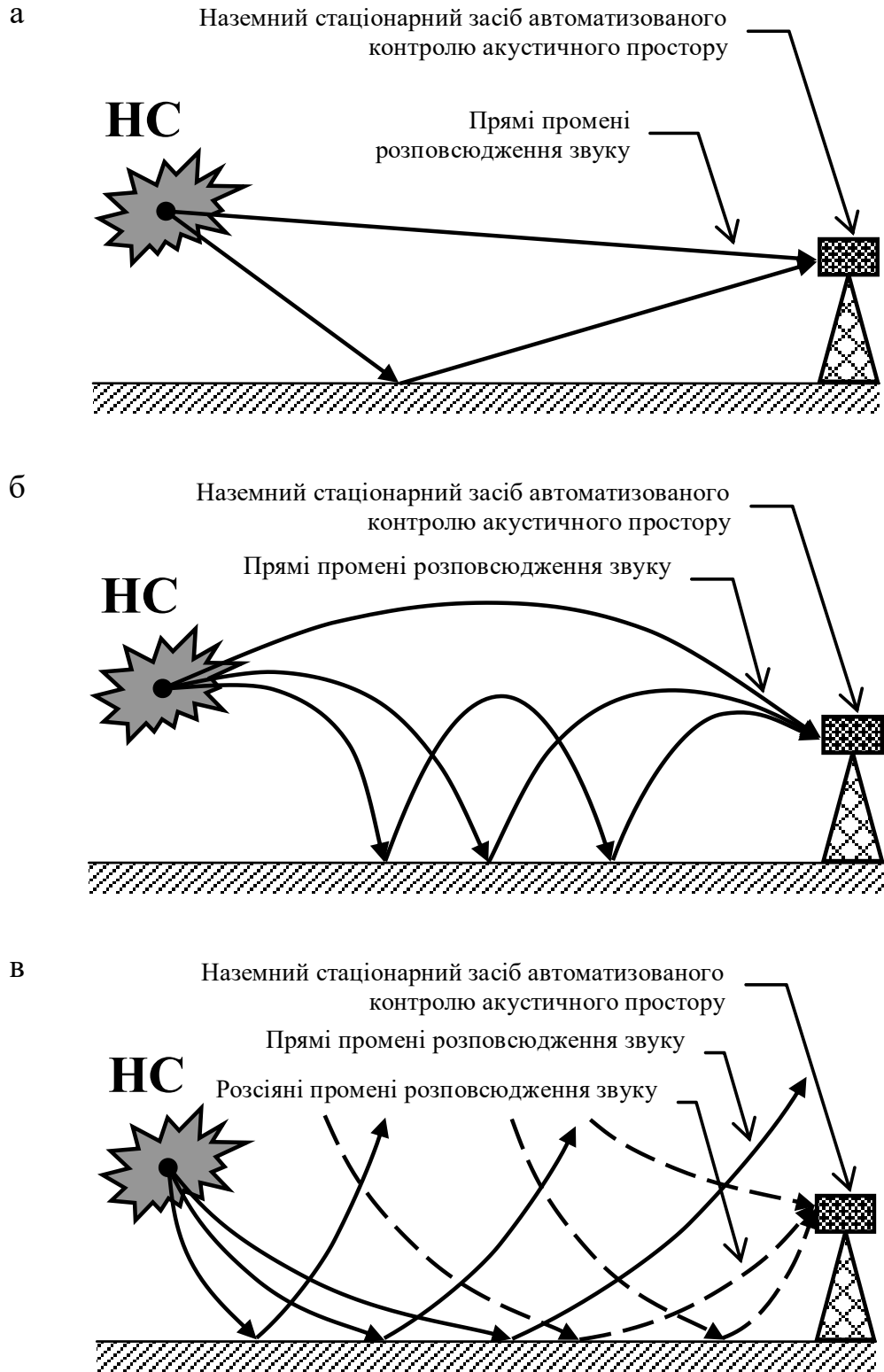


Рисунок 2.8 – Променеві картини розповсюдження звуку в атмосфері від джерел НС до наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору в різних метеорологічних умовах: а) нейтральний режим; б) хвильовий режим (приведено тільки промені типу «верх–низ»); в) антихвильовий режим

Середні значення цих метеорологічних параметрів мають вплив як на абсолютне значення сумарного коефіцієнта поглинання звуку на фіксованій частоті f , так і на його частотній залежності. Ослаблення енергії звуку в атмосфері відбувається таким чином, що на значні відстані можуть поширюватися лише його низькочастотні складові. У разі передачі широкосмугових сигналів це явище істотно впливає на амплітудно-частотну характеристику сигналу, що приймається, а відповідно, на якість отриманої інформації.

Іншим важливим фактором, який впливає на процес приземного розповсюдження в атмосфері акустичних хвиль, є рефракція, що виникає внаслідок неоднорідності середовища поширення хвиль та зміни швидкості звуку з висотою за рахунок змін швидкості вітру V та температури повітря T . Це явище може бути розглянуте на основі методу геометричної акустики, де використовується таке уявлення про звук як хвилі, що поширюються вздовж променевих траєкторій, кривизна яких визначається змінами з висотою швидкості вітру V і температури T , а також кутовими параметрами, що характеризують початковий напрямок випромінюваного звуку. При цьому вважаємо, що енергія звукової хвилі не залишає променевої трубку, сформовану сімейством променів, що утворює при їх поперечному перерізі замкнуту криву. Тому збіжність чи розбіжність променів (зміна діаметра променевої трубки) у геометричній акустиці безпосередньо впливає на інтенсивність звуку. Прийнято розрізняти три основні режими поширення звуку [130–132]: хвилевий, антихвилевий і як проміжний нейтральний режим (рис. 2.8).

Нейтральний режим розповсюдження звуку (рис. 2.8, а) є характерним для відносно невеликих відстаней та за умов прямої видимості. Так, у точці приймання наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного простору відбувається інтерференція прямого (випромінюваного джерелом терористичних дій) та відбитого від поверхні Землі променів.

За умов приземного розповсюдження в атмосфері звуку від джерела НС на великі відстані характеристики акустичних хвиль визначаються головним образом рефракцією на градієнтах температури та швидкості вітру, що

призводить до виникнення хвильового режиму (рис. 2.8, б) та антихвильового режиму (рис. 2.8, в). У першому випадку промені загинаються донизу з багаторазовим відбиттям від Землі. Цьому режиму поширення звуку притаманні відносно малі значення ослаблення звуку. В іншому випадку промені загинаються вгору і зона акустичної тіні виникає біля Землі на певній відстані від джерела НС. Тому тільки дуже слабкий звук, розсіяний турбулентними неоднорідностями у верхніх шарах атмосфери, проникає до цієї зони. Ці два режиму розповсюдження звуку працюють в основному на відстанях, які перевищують 1 км.

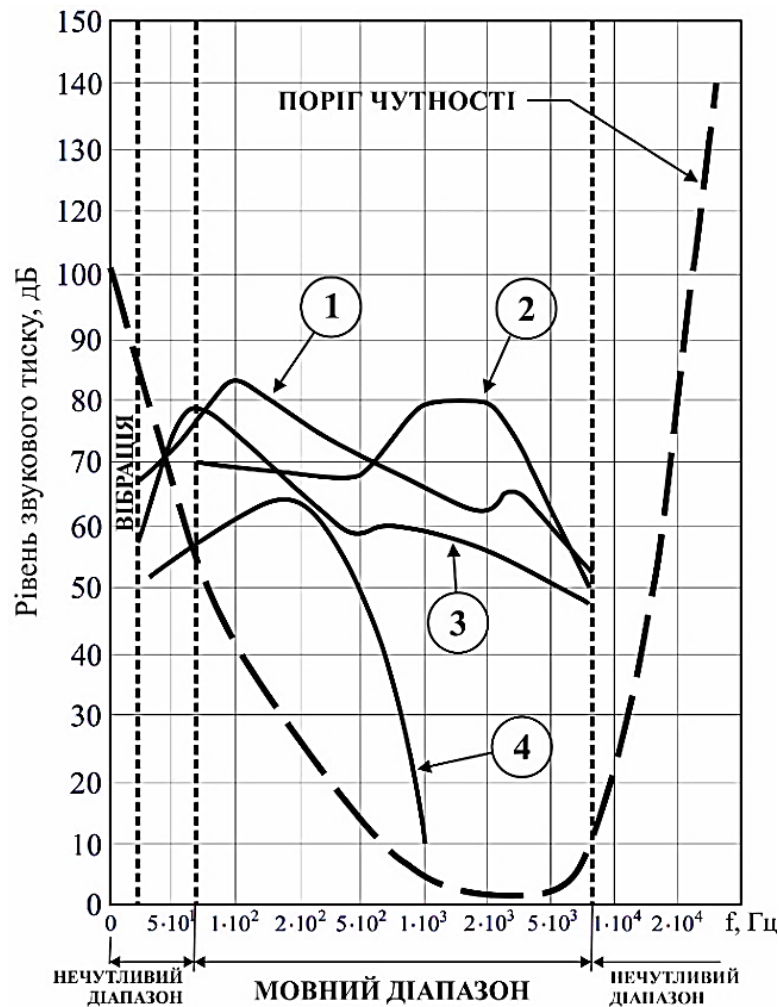


Рисунок 2.9 – Спектральні характеристики основних завад для функціонування автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору: 1 – транспортні потоки (на відстані 7,5 м) за інтенсивності руху 250 автомобілів за годину; 2 – потяг (на відстані 25 м) за швидкості руху 160 км/год; 3 – місто; 4 – гелікоптер (на відстані 150 м) за швидкості 190 км/год

В той же час, територія великого міста характеризується функціонуванням динамічно-розгалуженої системи забудови на великій площі поверхні Земної кулі, де локально та ймовірно виникають різні атмосферні процеси, а також існує велика концентрація на одиниці площі об'єктів різного функціонального призначення, будівель та споруд із різною кількістю поверхів, автотранспортних шляхів тощо. Всі ці фактори сприяють виникненню перешкод (див. рис. 2.9) для ефективного прийому інформаційного сигналу засобів контролю акустичного простору. Тому, розглядаючи умови акустичного моніторингу за зоною НС на території такого міста, стає зоцільним встановлення засобів контролю акустичного простору на відстанях, які не перевищують 1 км.

В таких умовах виникає необхідність аналізу ефективності функціонування засобів контролю акустичного простору в режимі слабкої рефракції звуку, який можна віднести до випадку прямого поширення звукової хвилі в точку спостереження. При такому режимі (див. рис. 2.8, а) в точку спостереження приходять тільки два промені: прямий промінь, який не має точки повороту, та відбитий від Землі промінь, де променева картина розповсюдження звуку характеризується нехтовно малою кривизною траєкторій променів. Розрахунок звукових тисків у цьому випадку можна виконати за виразом:

$$L_{R_M}(f) = L_S(f) + L_{abs}(f) + L_t(f) + L_e(f) + L_{div}(f) + L_{pat}(f) \quad (2.1)$$

де R_M – радіус зони ймовірної акустичної ідентифікації джерела НС; $L_{R_M}(f)$ – рівень звукового тиску на вході наземного стаціонарного засобу контролю акустичного простору на частоті f від джерел НС, які виникли на межі зони достовірної акустичної ідентифікації; $L_S(f)$ – звуковий тиск від джерела НС, який перерахований до звукового тиску на відстані одного метра від джерела; $L_{abs}(f)$ – внесок класичного та молекулярного поглинання звуку в атмосфері; $L_t(f)$ – внесок турбулентного послаблення звуку; $L_e(f)$ – внесок

приземного ослаблення звуку (враховується вплив інтерференції прямої та відбитої хвилі); $L_{div}(f)$ – внесок кутової розбіжності; $L_{pat}(f)$ – доданок, який враховує характеристики діаграми направленості засобу контролю акустичного простору. Рівняння (2.1) виражає закон збереження енергії та являє собою рівняння енергетичного балансу. Всі члени правої частини цього рівняння, за винятком компонента $L_S(f)$, зазвичай мають негативне значення. Для точної акустичної ідентифікації джерела небезпеки та визначення місця виникнення цього джерела на території міста необхідно враховувати такі умови: $R_D \leq R_M$.

За цих умов для визначення місця виникнення джерела НС необхідно застосувати позиційні методи локації, які ґрунтуються на використанні поверхонь або ліній положення для визначення місця виникнення джерела у просторі або на поверхні Землі. Поверхня положення є геометричним місцем точок у просторі, що відповідають умові сталості параметра (вимірюваної координати відносно розташування наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного простору ((дальності, кута тощо) – рис. 2.10). Розташування джерела НС у просторі знаходиться як точка перетину трьох поверхонь положення. Перетин двох поверхонь положення дає лінію положення, яка є геометричним місцем точок із постійними значеннями двох параметрів. Щоб визначити точку у просторі, потрібен перетин трьох поверхонь положення або лінії та поверхні положення [133].

На сьогодні є відомими три основних методи визначення координат джерел випромінювання, а саме: кутомірний, різницево-далекомірний та кутомірно-різницево-далекомірний. Найбільшого поширення набули різницево-далекомірний та кутомірно-різницево-далекомірний методи. Системи пасивної локації з цими методами вимірювання координат, які використовують для визначення різниці відстаней кореляційний метод обробки, називають кореляційно-базовими. Особливістю пристроїв кореляційно-базової локації є аналіз за допомогою кореляторів часових запізнень τ .

Найбільш перспективним для визначення місця виникнення джерела НС є кутомірно-різничево-далекомірний метод, оснований на вимірі кутових напрямків на джерело випромінювання та різниці відстаней від нього до місць розташування засобів контролю акустичного простору [134]. У найпростішому випадку достатньо мати два засоби контролю. Так, для визначення площинних координат слід виміряти лише азимут β та різницю відстаней $R = r_1 - r_2$ (рис. 2.10).

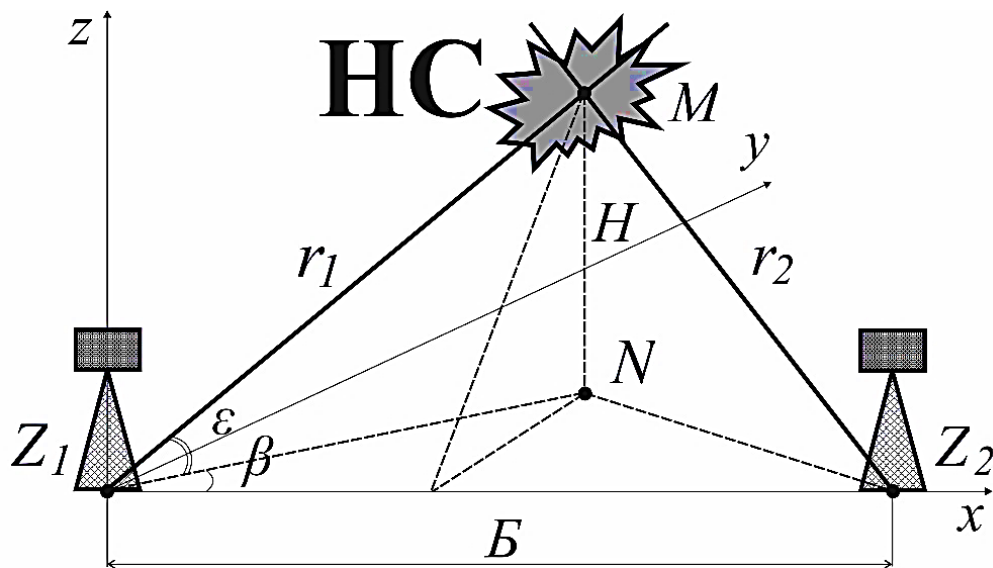


Рисунок 2.10 – Пасивний кутомірно-різничево-далекомірний метод акустичного визначення місця виникнення джерела НС місцевого рівня, де Z_1 і Z_2 – точки розташування наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору; B – відстань (база) між точками Z_1 і Z_2 ; M – точка простору, де виникло джерело НС; N – проєкція точки M на площину XU ; β і ε – азимут і кут міста відносно напрямку на точку M ; r_1 і r_2 – дальності до точки M від точок Z_1 і Z_2

Так, базуючись на основних постулатах кутомірно-різничево-далекомірного методу (за даними рис. 2.10), дальність до точки виникнення джерела НС від точки розташування засобу контролю акустичного простору Z_1 визначається як:

$$r_1 = \frac{B^2 - R^2}{2(B \cos \varepsilon \cos \beta - R)}. \quad (2.2)$$

При цьому повна похибка визначення місця виникнення джерела НС є багатовимірним нестационарним випадковим процесом і функцією виду:

$$r_1 - r_1^* = \psi [M(t), S(t, u), e(t)], \quad (2.3)$$

де r_1^* – істинне значення дальності до точки виникнення джерела НС від точки розташування засобу контролю акустичного простору Z_1 ; $S(t, u)$ – акустичний сигнал, що має інформацію про вимірюваний параметр u ; $e(t)$ – зовнішні та внутрішні адитивні перешкоди для функціонування розташованого в точці Z_1 наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного простору; $M(t)$ – масштабний коефіцієнт (перетворення), що характеризує ефективність функціонування засобу контролю акустичного простору.

Таким чином, запропоновано системний підхід та принципи використання спектрального аналізу акустичного простору міста для реалізації безперервного та тривалого у реальному масштабі часу оперативного моніторингу за місцем виникнення та динамікою розвитку ідентифікованих джерел НС різного характеру. При цьому встановлено, що основним показником ефективності функціонування підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони НС на території міста є достовірність ідентифікації джерела небезпеки за видом та місцем виникнення, яка залежить від факторів, які характеризують безпосередньо динаміку зміни показників розвитку джерела небезпеки, від факторів, які характеризують тактико-технічні показники засобів контролю акустичного простору, а також від факторів, які характеризуються географічними та фізико-хімічними показниками місця виникнення джерела небезпеки та середовища розповсюдження інформаційного акустичного сигналу.

Висновки до розділу 2

1. Концепція «Smart City» демонструє суттєвий потенціал для підвищення ефективності управління міським середовищем та забезпечення безпеки

громадян. Науково-технічний розвиток у сфері інформаційних технологій, інтеграція систем Інтернету речей, великих даних, штучного інтелекту, хмарних обчислень і мобільних технологій створює передумови для формування комплексної інфраструктури міста, здатної забезпечувати безперервний моніторинг та аналіз міського середовища в реальному часі. У цьому контексті особливої значущості набуває розробка підсистеми моніторингу та запобігання НС, що дає можливість інтегрувати дані з різних джерел – сенсорів, відеоспостереження, транспортних систем та соціальних платформ – для своєчасного прогнозування ризиків, швидкого реагування та підвищення безпеки населення. Така підсистема є ключовим елементом ЦЗ у межах концепції «Smart City» і сприяє збалансованому поєднанню технологічних рішень із соціально-економічними та екологічними цілями міського розвитку. Інтеграція сучасних інформаційно-технологічних рішень у систему ЦЗ міста забезпечує підвищення ефективності управління НС, формує основу для сталого та безпечного розвитку міського середовища та сприяє підвищенню якості життя його мешканців.

2. Розроблено (за стандартом IDEF0) структурно-функціональну модель стратегічного розвитку системи безпеки міста, з урахуванням нормативно-правової бази України та наявності в державі відповідних механізмів (ресурсів). У процесі моделювання показано, що процес реєстрації загроз для життєдіяльності міста включає організацію фінансового аудиту, моніторингу соціального стану та довкілля, відеоспостереження, радіаційного, хімічного та біологічного моніторингу, а також спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек. Встановлено, що організація спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек включає комплексний аналіз характеристик випромінювань у різних частотних діапазонах (в акустичному, радіо, інфрачервоному, оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма- та космічних променів). Тому реалізація ефективних заходів запобігання виникненню НС місцевого рівня потребує розробки міської системи оперативного

моніторингу і прогнозування НС на основі спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації небезпечних подій, з подальшою розробкою рішень щодо управління службами безпеки та комунальними службами міста.

3. Запропоновано системний підхід та принципи використання спектрального аналізу акустичного простору міста для реалізації безперервного та тривалого у реальному масштабі часу оперативного моніторингу за місцем виникнення та динамікою розвитку ідентифікованих джерел НС різного характеру. При цьому встановлено, що основним показником ефективності функціонування підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони НС на території міста є достовірність ідентифікації джерела небезпеки за видом та місцем виникнення, яка залежить від факторів, які характеризують безпосередньо динаміку зміни показників розвитку джерела небезпеки, від факторів, які характеризують тактико-технічні показники засобів контролю акустичного простору, а також від факторів, які характеризуються географічними та фізико-хімічними показниками місця виникнення джерела небезпеки та середовища розповсюдження інформаційного акустичного сигналу.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА

У цьому розділі подано результати досліджень можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС місцевого рівня. Основу проведених досліджень становить аналіз амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) звукових коливань, які є унікальними для кожного типу небезпечних подій. Зокрема, дослідження спрямовані на вивчення характеристик звуків, які виникають під час пожеж, небезпечних подій із використанням вогнепальної зброї та БПЛА. Для проведення експериментів було створено спеціалізовану лабораторну установку, концептуальну схему якої наведено на рис. 3.1.

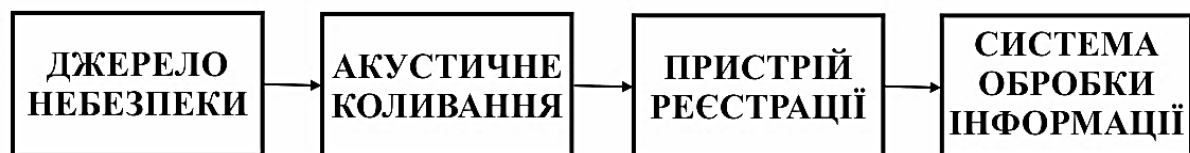


Рисунок 3.1 – Концепція проведення лабораторних досліджень можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС місцевого рівня

Концепція проведення лабораторних досліджень базується на класичних методах планування та оброблення результатів експерименту [135–137] щодо реєстрації звукових сигналів, їх оброблення з виділенням частотних компонентів та класифікації звукових сигналів, шляхом їх порівняння з АЧХ небезпечних подій, які вже внесено до бази даних.

3.1 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із масштабними пожежами

Процес горіння являє собою швидкий окислювально-відновний процес, під час якого горюча речовина з'єднується з окиснювачем і виділяється енергія та продукти розкладання [138–141].

Загальними закономірностями пожеж, відповідно до даних рис. 3.2, є:

- 1) горіння з виділенням тепла і продуктів повного та неповного згорання;
- 2) масообмін, що виникає внаслідок утворення на пожежі конвекційних газових потоків, які забезпечують надходження свіжого повітря в зону горіння та відведення продуктів горіння з неї;
- 3) тепло, що виділяється в зоні горіння, передається в навколишнє середовище і частково витрачається на нагрів горючих речовин, будівельних конструкцій тощо і, таким чином, робить можливим самостійне розповсюдження процесу горіння.

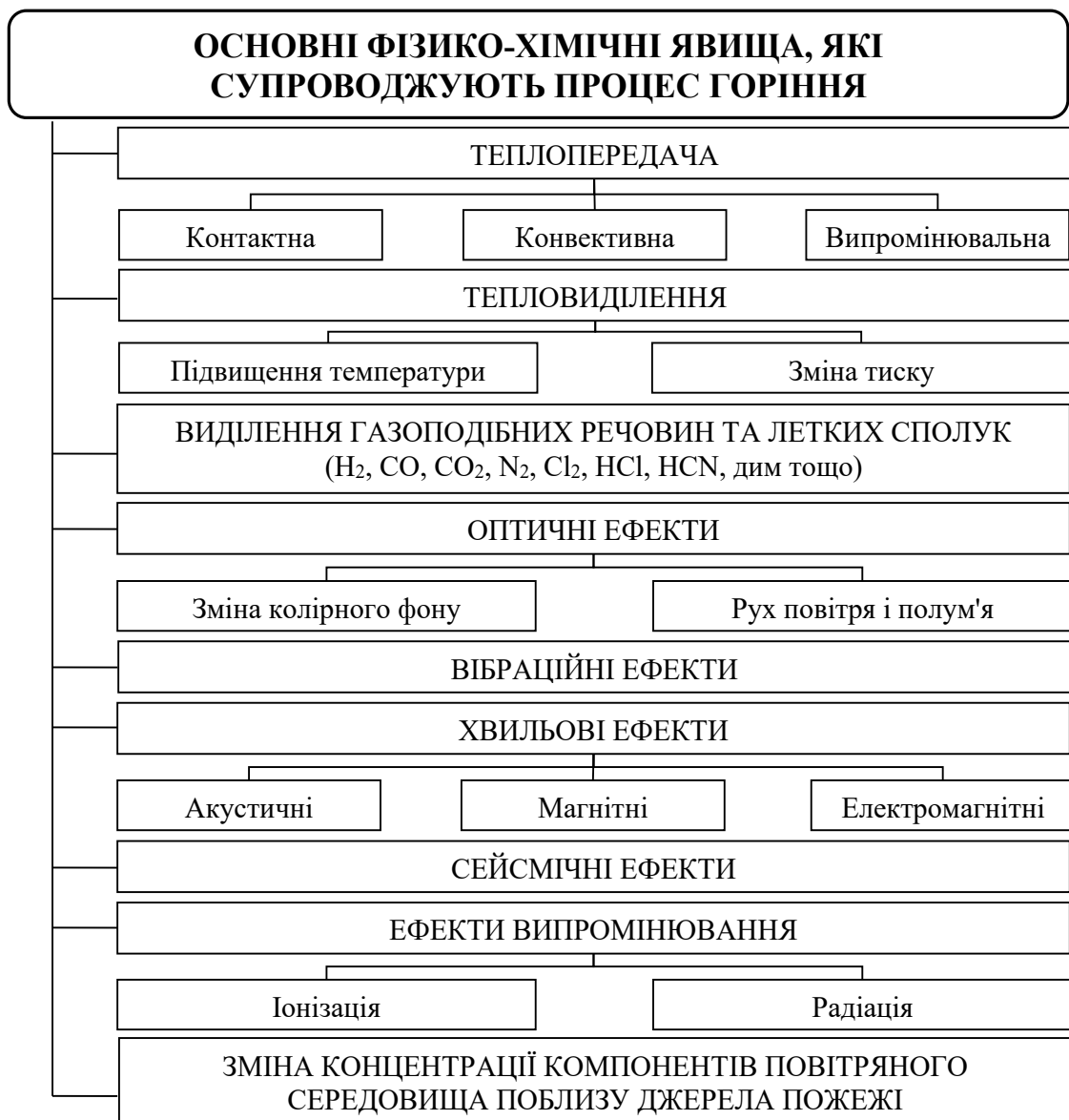


Рисунок 3.2 – Класифікація основних фізико-хімічних явищ, які супроводжують процес горіння

Загальний принцип функціонування пристроїв виявлення займання полягає у своєчасній реєстрації факторів пожежної небезпеки та подальшій оцінці їх фізичних параметрів. На основі проведеного порівняльного аналізу різних типів детекторів пожежних сповіщувачів [142–156] встановлено такі закономірності та особливості їх роботи.

По-перше, відповідно до встановлених областей функціонування технічно реалізованих типів пожежних сповіщувачів, а також з урахуванням часу прояву пріоритетних факторів пожежної небезпеки як інтегрального показника ефективності функціонування системи раннього виявлення джерел займання, можна виокремити два кластери (рис. 3.3).

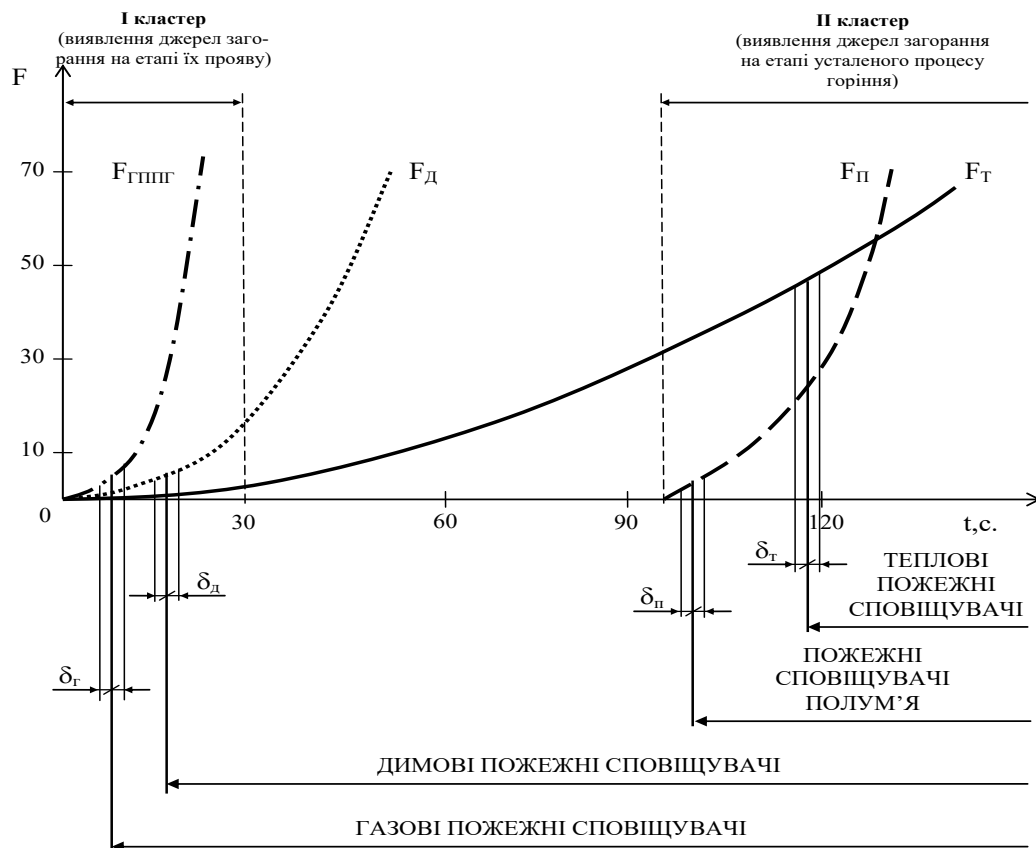


Рисунок 3.3 – Графічне подання областей функціонування технічно реалізованих типів пожежних сповіщувачів залежно від часу (t) появи пріоритетних факторів пожежної небезпеки (F) та розмірів зон їх виявлення ($\delta_{Г}$ – газівий аналіз середовища, $\delta_{Д}$ – виявлення диму, $\delta_{П}$ – аналіз полум'я, $\delta_{Т}$ – контроль температури середовища), залежно від тактико-технічних характеристик чутливих елементів засобів виявлення

До першого кластеру належать пожежні сповіщувачі, призначені для виявлення джерел займання на етапі потенційної появи пожежної небезпеки. Принцип їх функціонування ґрунтується на виявленні газоподібних продуктів горіння ($F_{гшг}$) та диму ($F_{д}$), що дає змогу фіксувати початкову фазу розвитку пожежі до моменту поширення відкритого полум'я.

Розміри та розташування на осі часу (рис. 3.3) графічних залежностей зон виявлення $\delta_{г}$ і $\delta_{д}$ факторів $F_{гшг}$ і $F_{д}$ пожежної небезпеки визначаються тактико-технічними характеристиками (ТТХ) наявних газових і димових пожежних сповіщувачів. Можливість зміни параметрів зазначених зон у напрямі підвищення ефективності раннього виявлення джерел займання обмежується метрологічними характеристиками фізико-хімічних методів аналізу середовища займання, що реалізовані в роботі чутливих елементів відповідних пожежних сповіщувачів.

До другого кластеру належать пожежні сповіщувачі, призначені для виявлення джерел займання на етапі сталого (стаціонарного) процесу горіння. Принцип їх функціонування ґрунтується на аналізі (контролі) динаміки зростання температури ($F_{т}$) та інтенсивності полум'я ($F_{п}$), що забезпечує фіксацію розвиненої стадії пожежі з високою достовірністю визначення її просторових параметрів.

Розміри та розташування на осі часу (рис. 3.3) графічних залежностей зон виявлення $\delta_{т}$ і $\delta_{п}$ факторів $F_{т}$ і $F_{п}$ пожежної небезпеки визначаються ТТХ існуючих теплових пожежних сповіщувачів і сповіщувачів полум'я. Можливість зміни параметрів зазначених зон для підвищення ефективності раннього виявлення джерел займання обмежується характеристиками фізико-хімічних принципів аналізу середовища займання, реалізованих у чутливих елементах розглянутих пристроїв.

По-друге, у сучасних умовах розвитку урбанізованих територій ОКІ характеризуються зростанням рівня техногенного навантаження та підвищеними вимогами до безпеки функціонування. З огляду на це виникає необхідність

розширення зон моніторингу, а також підвищення ефективності процесів виявлення та ідентифікації факторів пожежної небезпеки в межах контрольованих територій. Водночас ключовою парадигмою таких вимог є забезпечення обмеження швидкості поширення у просторі факторів пожежі.

Зазначені обставини свідчать про необхідність реалізації режиму виявлення та ідентифікації джерел займання для ефективної протидії масштабним пожежам на території міста. Це передбачає технічну реалізацію нових фізико-технічних методів аналізу властивостей середовища займання, спрямованих на практично миттєвий контроль хвильових факторів небезпеки на етапі зародження та прояву джерел займання.

Практична значущість методу контролю хвильових факторів підтверджується тим, що вже відомі спроби ефективної технічної реалізації методу контролю пружних хвиль, які були викликані локальною динамічною перебудовою внутрішньої структури речовини (так званий процес акустичної емісії) для раннього розпізнавання тріщин у металах і сплавах, для виявлення прихованих дефектів на стадії їх зародження, для дослідження корозії металів під напругою, вивчення кінетики розвитку тріщин у зварних швах, а також для дослідження акустичних властивостей середовища загоряння [157–160].

На підтвердження цих уявлень необхідно особливо відзначити, що в літературних джерелах [161–163] описано позитивні результати розширення областей використання методу акустичної емісії (АЕ), а також наведено експериментальні спроби виявити можливості цього методу для дослідження хімічних реакцій та фізико-хімічних процесів. Так, для встановлення АЕ, що супроводжує процеси в гомогенних середовищах, було обрано і досліджено процеси розчинення сірчаної кислоти та етилового спирту у воді. В результаті розчинення рідини в рідині було зафіксовано характерні акустичні сигнали та відзначено два принципових моменти, які притаманні явищу виникнення АЕ у фізико-хімічних процесах: а) явище носить універсальний характер; б) імпульсний характер АЕ при хімічних реакціях та фізико-хімічних процесах

свідчать про те, що реакція відбувається в невеликому об'ємі й когерентно в часі в окремих ділянках системи, тому має місце колективна взаємодія субстратів.

Отримані результати дали змогу зробити припущення про перспективи створення пристрою акустичного контролю на території міста масштабних пожеж, в основу функціонування якого закладено принцип аналізу властивостей акустичних коливань, які випромінюються джерелом загоряння в результаті прояву ефекту АЕ як хвильового чинника на етапах прояву і розвитку пожежної небезпеки.

3.1.1 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із масштабними пожежами целюлозовмісних матеріалів

Фізико-хімічна суть прояву АЕ під час горіння полягає в тому, що у процесі протікання окислювально-відновної реакції виникає спектр коливань, пов'язаних із виникненням і руйнуванням на молекулярному рівні напружень у кристалічній решітці матеріалу. У процесі горіння власне рідкої фази відбувається переміщення мас реагентів і продуктів та утворення бульбашок газу, що призводять до коливань навколишнього середовища об'єкта загоряння (кавітаційні явища). Чим більше молекул речовини задіяні у процесі протікання реакції, тим інтенсивнішим є горіння та потужніше випромінюється звукове коливання. Ефект АЕ має місце на всіх стадіях горіння, поки є деструкція матеріалу і температурний градієнт всередині вогнища горіння. При появі відкритого полум'я, коли реакція горіння переходить у стійку стадію, інтенсивність звукових коливань різко зростає. Це зумовлено під час горіння твердих тіл посиленням ефектів деструкції й деформації матеріалу. Збільшення інтенсивності звукових коливань у процесі горіння рідинно-фазних матеріалів пов'язане з переходом у стадію кипіння поверхневого шару на границі полум'я. При цьому необхідно відзначити, що і саме полум'я викликає значні коливання повітря за рахунок нерівномірності течії реакції горіння. Крім того, виділення газових складових під час горіння як твердих, так і рідких речовин, також призводить до локальних коливань повітря в місці виходу газу із зони горіння.

Цей ефект генерації акустичних коливань у процесі прояву й розвитку пожежної небезпеки (як і під час протікання інших фізико-хімічних процесів) впливає з аналізу об'єднаного рівняння першого і другого законів термодинаміки [164, 165]:

$$dG = pdV - TdS + \sum \mu_i dn_i + \phi dq + \sigma ds + \dots, \quad (3.1)$$

де G – енергія Гіббса; S – ентропія; T – температура; V – об'єм; p – тиск; σ – поверхнева напруга (поверхнева напруга для твердих тіл); s – площа поверхні; μ_i – хімічний потенціал i -го компонента; n_i – кількість молей i -го компонента; ϕ – електричний потенціал; q – електричний заряд.

За аналогією з відомими процесами перетворення хімічної енергії в електричну (ϕdq), теплову (TdS) та електромагнітну, має відбуватися безпосереднє перетворення її в механічну (pdV). Оскільки у всій системі одинична зміна обсягу у вигляді єдиного імпульсу не може статися в силу фізичних властивостей, то в системі будуть порушуватися акустичні коливання.

У зв'язку з тим, що імпульсний характер акустичної емісії характеризується імпульсами тривалістю 10^{-8} – 10^{-4} с (час елементарного акту передачі \bar{e} в хімічній реакції), а енергія окремого імпульсу – від 10^{-9} до 10^{-5} Дж, то частотний спектр АЕ лежить у широких межах – від області інфразвуку і частот чутного звуку до десятків і сотень МГц, інтенсивність імпульсів АЕ залежить від обсягу зони, в якій речовина піддається деструкції, а також від зміни обсягу продуктів реакції. Значення амплітуди механічних коливань (звукові хвилі) у твердих тілах при хімічних реакціях відповідно знаходяться в межах від $1 \cdot 10^{-4}$ до 5 мм.

Дослідження, які були проведені у [165–168], лягли в основу подальших науково-технічних досліджень спектральних характеристик горіння різного роду матеріалів в умовах виникнення пожеж на території міста, з метою розробки автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору як складових

системи оперативного моніторингу за зоною НС, рівнем небезпеки в ній та прогнозування виникнення нових ризиків.

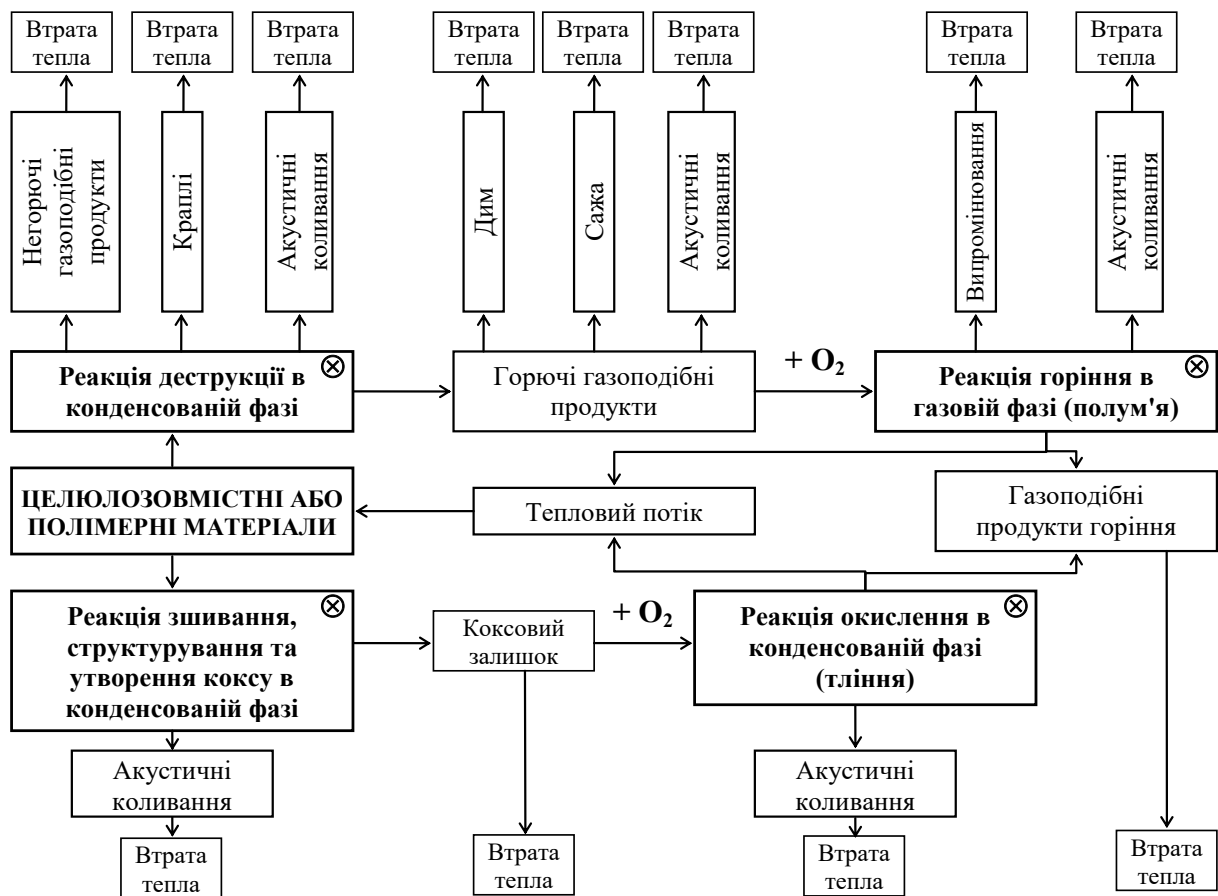
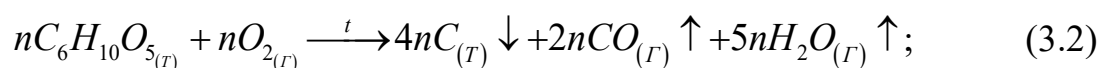


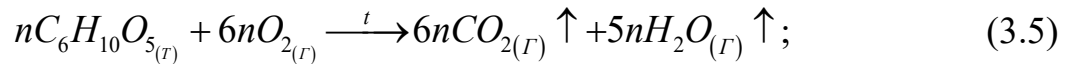
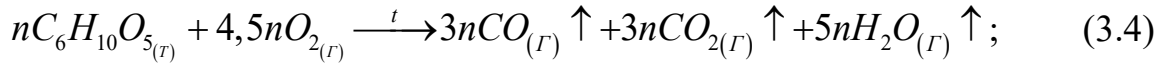
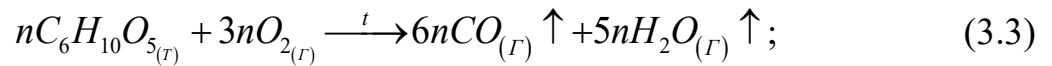
Рисунок 3.4 – Схема горіння целюлозовмісних або полімерних матеріалів та прояву ефекту АЕ на стадіях горіння. ⊗ – найхарактерніші стадії АЕ при фізико-хімічних перетвореннях

Згідно з даними рис. 3.4 ефект АЕ має місце на всіх стадіях горіння. Так, акустичні хвилі будуть випромінюватися протягом усіх стадій горіння, поки є деструкція матеріалу та температурний градієнт всередині джерела горіння. Стадії горіння целюлозовмісних або полімерних матеріалів можна описати у вигляді наступних рівнянь хімічної реакції:

а) недостаток O_2 (піроліз):



б) надлишок O_2 :



в) у випадку утворення CO є можливим подальше його горіння в умовах контакту в об'ємі полум'я з киснем:



Для проведення лабораторних досліджень використано лабораторну установку, структурну схему та фото якої подано на рис. 3.5 та 3.6.

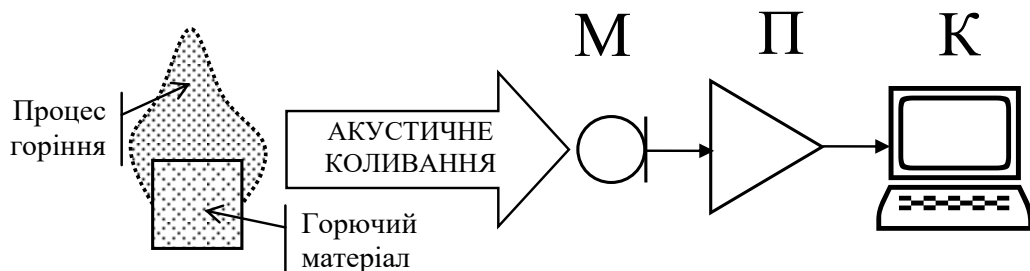


Рисунок 3.5 – Схема лабораторної установки для дослідження умов прояву ефекту АЕ на стадіях горіння різних горючих матеріалів: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер

Обробка цих спектрів в єдиних координатах P_{\min}/P_a (відносна амплітуда сигналу) від f (частота сигналу) показала задовільну збіжність пікових амплітуд досліджуваних зразків у різних діапазонах частот (5 Гц–25 кГц). Незбіжність для деяких діапазонів частот пояснюється різним вмістом целюлози у зразках, а

також специфікою самого процесу високотемпературного окислення, який істотно залежить від домішкових компонентів матеріалу та структури досліджуваних зразків.

Результати експериментів відображено на рис. 3.7–3.11 у вигляді амплітудно-частотних акустичних спектрів для деревини (сосна) та інших целюлозовмісних матеріалів (бинт, картон, папір, вата).

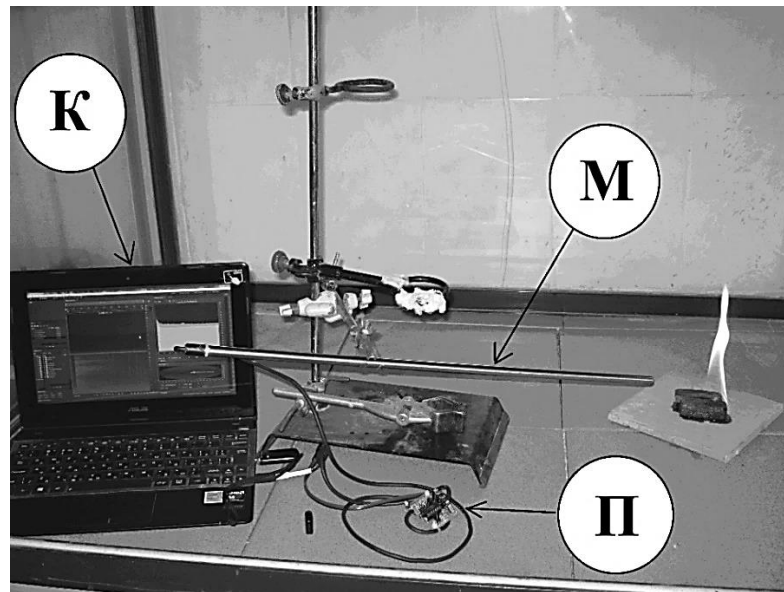


Рисунок 3.6 – Фото лабораторної установки та проведення експерименту щодо дослідження умов прояву ефекту АЕ на стадіях горіння різних горючих матеріалів: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер

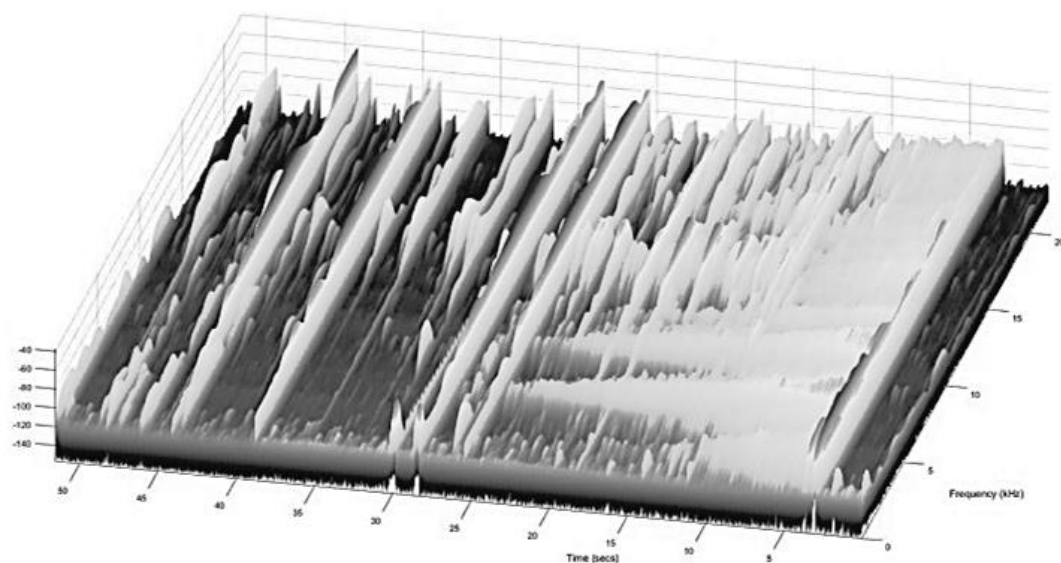


Рисунок 3.7 – Акустичні спектри від часу горіння зразка дерева (сосна) після фільтрації від фонових перешкод

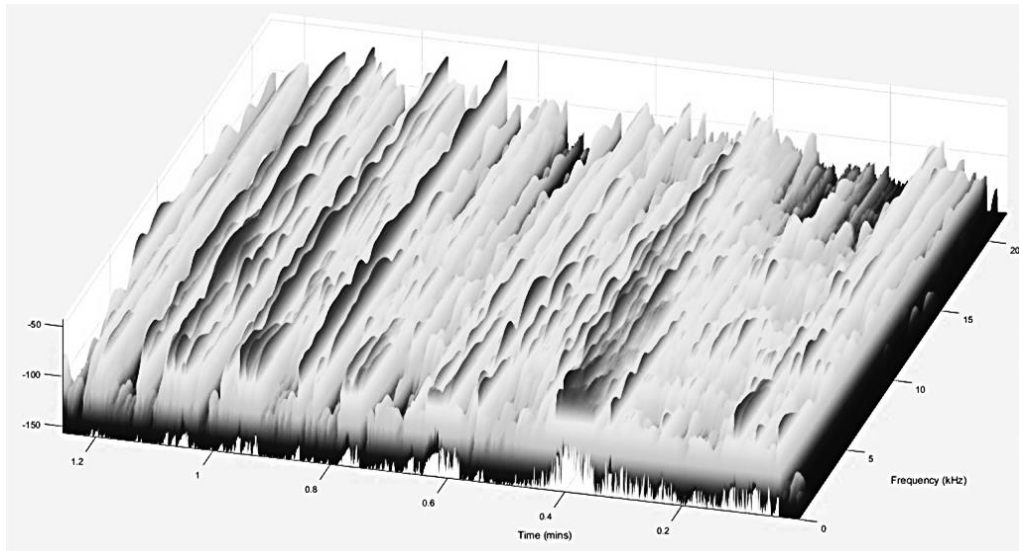


Рисунок 3.8 – Акустичні спектри від часу горіння зразка папіру після фільтрації від фонових перешкод

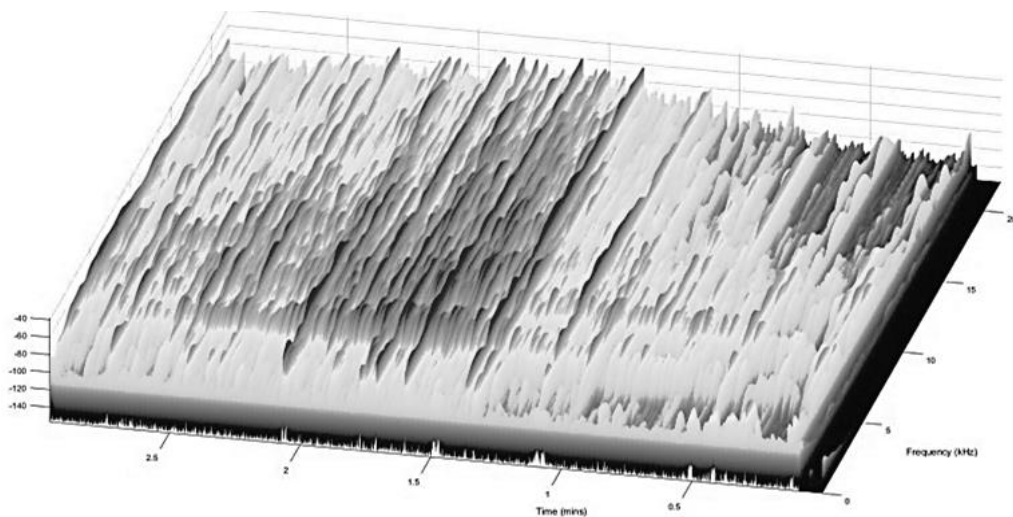


Рисунок 3.9 – Акустичні спектри від часу горіння зразка картону після фільтрації від фонових перешкод

Узагальнену гістограму розподілу пікових амплітуд спектрів АЕ для досліджених матеріалів (дослідження було проведено на трьох зразках кожного типу целюлозовмісного матеріалу) подано на рис. 3.12. Усереднені для кожного типу целюлозовмісного матеріалу АЧХ спектрів АЕ під час їх горіння відображено на рис. 3.13.

За даними рис. 3.13 процес горіння досліджених матеріалів характеризується високою щільністю максимальних амплітуд в областях частот

від 5 до 200 Гц і від 400 Гц до 25кГц. Максимальна збіжність амплітуд є найбільш характерною для діапазону частот 1–11 кГц.

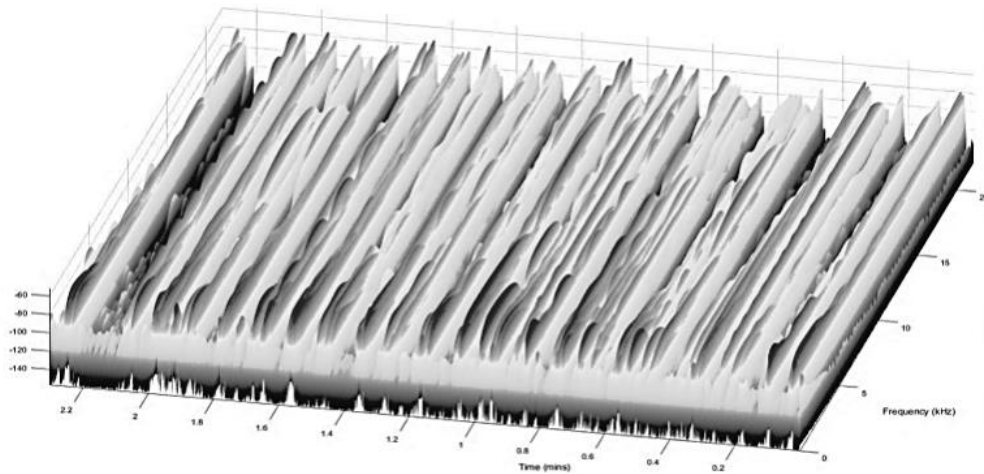


Рисунок 3.10 – Акустичні спектри від часу горіння зразка дерева (сосна) після фільтрації від фонових перешкод

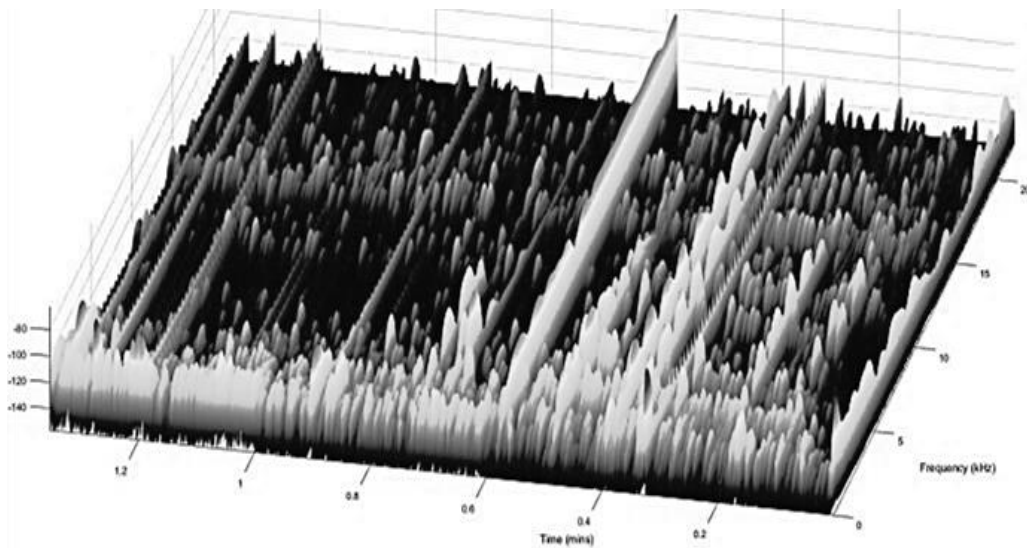


Рисунок 3.11 – Акустичні спектри від часу горіння зразка бинту після фільтрації від фонових перешкод

Наведені на рис. 3.12 та 3.13 результати досліджень показали, що процес горіння целюлозовмісних матеріалів характеризується наявністю спектрів АЕ як у низькочастотних (від 0 до 1000 Гц), так і у високочастотних (від 1 до 25,4 кГц) областях. Амплітудна характеристика є максимальною для вати ($P_{\min}/P_a = 1,92$,

де $P_{\min} = 115\text{dB}$), в порівнянні з іншими матеріалами ($P_{\min}/P_a = 1,00 \div 1,40$) як для низькочастотних, так і для високочастотних областей.

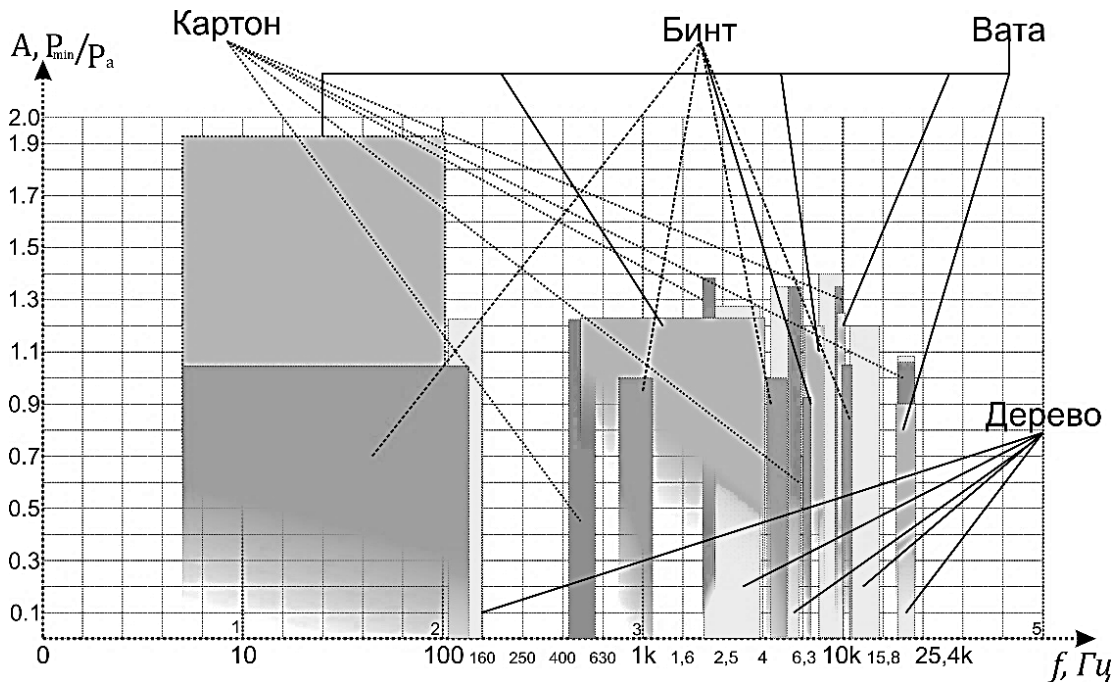


Рисунок 3.12 – Узагальнена гістограма характерних у діапазоні частот 5 Гц–20,4 кГц пікових відносних амплітуд спектрів АЕ у процесі горіння целюлозовмісних матеріалів

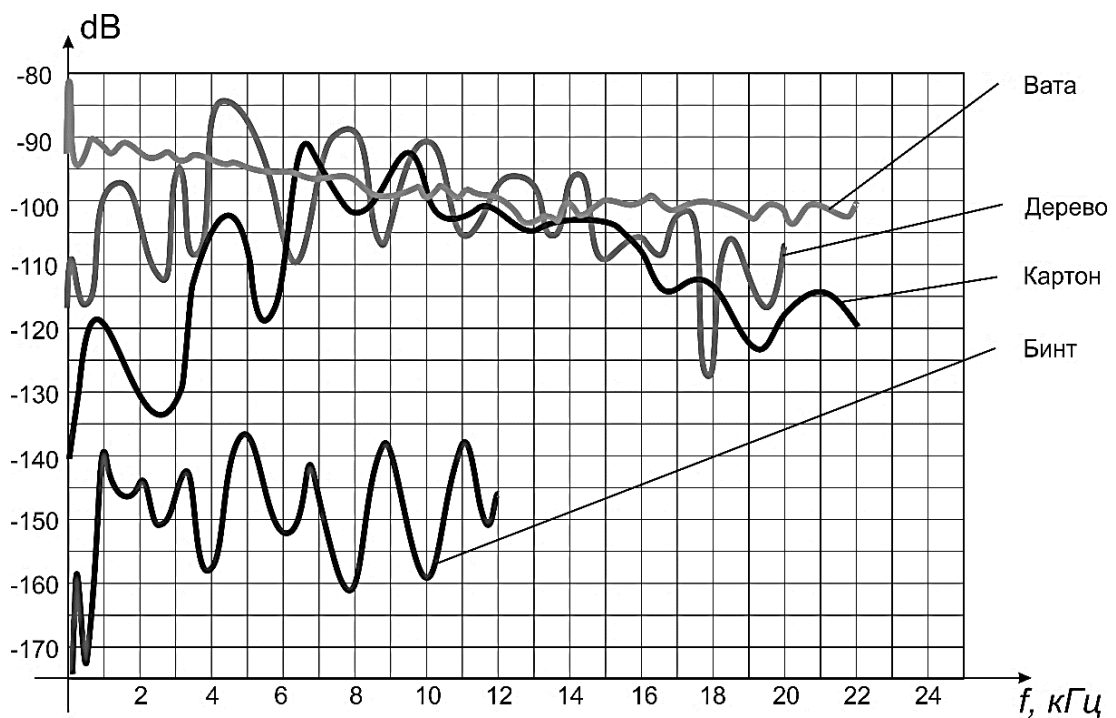


Рисунок 3.13 – Усереднені АЧХ спектрів АЕ для кожного типу целюлозовмісного матеріалу у процесі їх горіння

Порівняння акустичних спектрів процесу горіння целюлозовмісних матеріалів показує їх стійку схожість, але в той же час і відмінність залежно від виду матеріалу. Щоб провести повноцінне порівняння результатів, підтвердити їх невідповідність і зробити відповідні висновки про можливість однозначної ідентифікації спектра процесу АЕ різних матеріалів, застосуємо інший метод ідентифікації спектра процесу АЕ.

Для цього переведемо отримані акустичні сигнали в числовий вигляд, скориставшись одним з методів спектральної обробки сигналів. Метод оснований на фрактальному аналізі властивостей часового ряду [169–172].

У зв'язку з тим, що звуковий сигнал являє собою набір значень, відомих тільки в дискретні моменти часу, тобто $t_n = n\Delta t$, $n = 0 \text{K} N - 1$, то сигнал можна записати у вигляді:

$$x_n = x(t_n) = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} X(\omega_k) e^{i2\pi kn/N}, \quad (3.7)$$

де ω – частота, а k – номер гармоніки, або, що є більш зручним для подальшого аналізу, як

$$x(t) = trend(t) + x^h(t) + r(t), \quad (3.8)$$

де $trend(t)$ – тренд, який апроксимується поліномом 1, 2 і більш високого ступеня; $t=t_0, t_1, \dots, t_n$ – моменти часу (рівні відліки); $x^h(t)$ – компонент, що виражає міру хаотичності ряду, що описує характер процесу і залежить від показника Херста $H(t)$ або показника фрактальної розмірності D_i ; $r(t)$ – випадковий шум.

Фрактальна розмірність D тимчасового ряду (3.8) дає можливість визначити його властивості, пов'язані з хаотичністю, випадковістю і регулярністю, що може бути використано для ідентифікації сигналу АЕ, а отже,

і для виявлення раннього процесу загоряння відповідних матеріалів. Значення величини фрактальної розмірності знаходиться в межах $1 < D < 2$.

Якщо значення D сигналу АЕ у зразків у межах однієї вибірки (процес АЕ трьох зразків) дасть схожі результати і буде відрізнятися від значень D у вибірці іншого зразка, який також дасть схожі значення, то можна стверджувати з високою часткою ймовірності, що такий підхід можна застосувати при ідентифікації процесу АЕ раннього спалаху.

Фрактальна розмірність D пов'язана з показником Херста H залежністю

$$D = 2 - H, \quad (3.9)$$

а показник H визначається з емпіричного закону Херста:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{n}{2}\right)^H, \quad (3.10)$$

де R – максимальний розмах досліджуваного ряду, який визначається як $R = x_{\max}(t) - x_{\min}(t)$; S – середньоквадратичне відхилення спостережень; n – кількість спостережень (може набувати будь-якого цілого значення і відповідає відлікам тимчасового інтервалу дослідження сигналу); t – інтервал часу, що складається з n відліків.

Аналіз рівняння (3.10) показав, що при $H = 0,5$ – процес є випадковим. Якщо $0 < H < 0,5$ – процес є антиперсистентним, тимчасовим. При $0,5 < H < 1,0$ процес є персистентним, тобто довготривалим. І тільки при $1,0 < H < 2,0$ процес набуває динамічного характеру.

Дробна розмірність сигналу, отримана в даному випадку як сукупність фону та АЕ відповідного процесу горіння, результати розрахунків фрактальної розмірності для зразків дерева, паперу, вати, бинта і картону наведено на

рис. 3.14. Звертає на себе увагу важливий факт суттєвої близькості наведених показників для зразків дерева і пресованого картону.

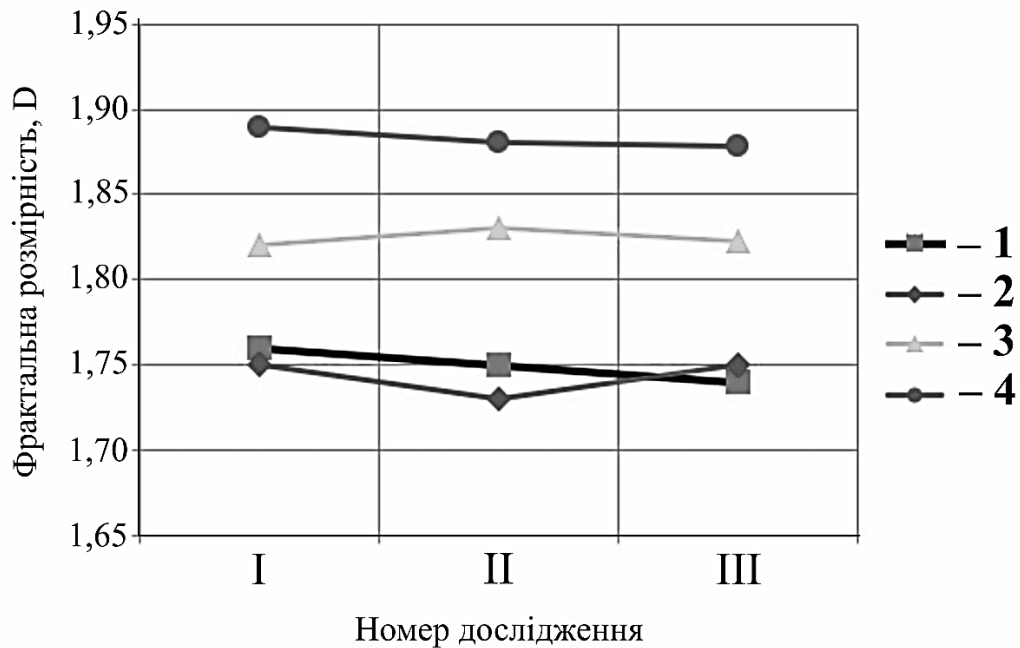


Рисунок 3.14 – Значення фрактальної розмірності досліджуваних зразків: 1 – бинт; 2 – картон; 3 – вата; 4 – деревина

Таким чином, реалізація режиму раннього виявлення джерел НС, пов'язаних із масштабними пожежами целюлозовмісних матеріалів, свідчить про необхідність технічної реалізації пристроїв контролю за територією міста на нових фізико-технічних методах аналізу властивостей середовища загоряння, спрямованих на практично миттєвий контроль хвильових факторів небезпеки на етапі зародження та прояву джерел загорянь. Запропоновано контроль джерела загоряння проводити за спектральними характеристиками акустичних коливань, що генеруються джерелом загоряння в результаті прояву ефекту АЕ під час протікання окисно-відновної реакції горіння різних (твердих, рідких та газоподібних) речовин і матеріалів.

Прикладними результатами проведених досліджень є: а) розроблено та створено установку для вимірювання спектрів АЕ з високою чутливістю, для широкого частотного діапазону (5Гц–25кГц); б) розроблено комплексну методику та алгоритм фільтрації спектра фону із загальної акустичної

спектрограми для визначення характеристичних гармонік прояву реакції горіння; в) показано стійку залежність АЧХ АЕ процесу горіння від природи і хімічного складу целюлозовмісних матеріалів; г) виконані дослідження особливостей процесу горіння різних целюлозовмісних матеріалів методом АЕ однозначно вказують на високу ефективність виявлення джерел НС, пов'язаних із масштабними пожежами.

3.1.2 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із масштабними пожежами рідких органічних речовин

Отримані у розділі 3.1.1 та опубліковані в роботах [165–168] висновки свідчать про стабільну залежність АЧХ АЕ під час горіння від природи та хімічного складу цих целюлозовмісних матеріалів. Враховуючи ці обставини, було сформульовано план дослідження стосовно оцінки можливостей спектрального аналізу акустичного простору стосовно виявлення та ідентифікації джерел НС, пов'язаних із масштабними пожежами рідких органічних речовин (РОР).

Ці дослідження реалізовані шляхом реєстрації спектрів АЕ від осередків займання деяких РОР та аналізу, згідно даних рис. 3.15, впливу фізико-хімічних характеристик цих речовин на кінетику їх високотемпературного окиснення (горіння) [173].

Враховуючи означене, завдання цього дослідження, згідно даних рис. 3.16, є такими [174]:

1) визначення характеристичних піків ($A_m(f)$) АЧХ акустичного сигналу активного високотемпературного окиснювально-відновного процесу від кількості атомів вуглецю ($n(C)$) у вуглецевому каркасі молекули РОР та їх молярної маси (M);

2) встановлення залежності амплітуди характеристичних піків ($A_m(f)$) АЧХ та фрактальної розмірності (D) прийнятого акустичного сигналу від динаміки згасання процесу горіння РОР у часі залежно від $n(C)$;

3) оцінка початкового (τ_1) та кінцевого (τ_2) часу горіння первинної хмари парів РОР, а також тривалості їх горіння ($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$) залежно від АЧХ прийнятого акустичного сигналу;

4) встановлення, за результатами аналізу АЧХ прийнятого акустичного сигналу, залежність між термодинамічними і кінетичними параметрами процесу високотемпературного окислення (горіння) деяких РОР залежно від $n(C)$ і P ;

5) встановлення взаємозв'язку між АЧХ прийнятого акустичного сигналу та способом гасіння різноманітних джерел масштабних пожеж на території міста, залежно від фізико-хімічної природи та термодинамічних показників займання РОР.



Рисунок 3.15 – Алгоритм встановлення природи кінетичних ефектів процесу високотемпературного окислення (горіння) деяких РОР методом АЕ

Приєм та аналіз акустичного сигналу в процесі високотемпературного окислення РОР, як на етапі первинного займання, так і у процесі протікання реакції горіння, реалізовано у роботі шляхом перетворення сигналу $A(t)$ у числовий ряд $X = x_1, x_2, \dots, x_N$, з подальшим застосуванням методу фрактального R/S -аналізу – методу, оснований на використанні для аналізу результатів

спостережень безрозмірного показника у вигляді відношення розмаху ($R = x_{\max} - x_{\min}$) накопиченого відхилення від середнього до середньоквадратичного відхилення (S) [169–171, 175, 176].

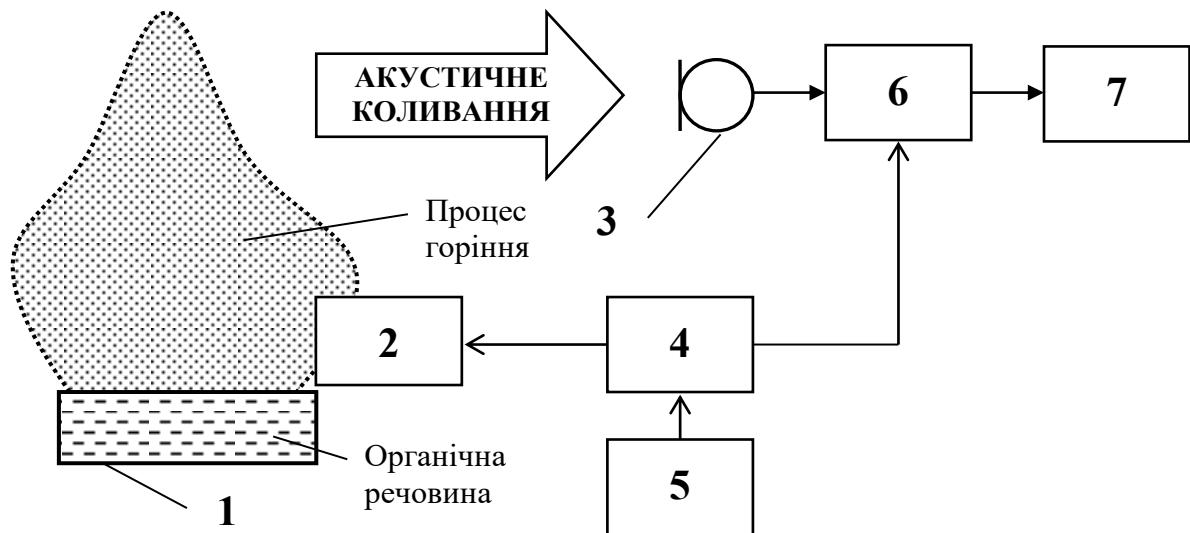


Рисунок 3.16 – Блок-схема установки дослідження акустичних коливань процесу горіння рідких органічних речовин. Позначення: 1 – металева чаша з аналізованою органічною речовиною; 2 – електричний підпал; 3 – акустичний мікрофон; 4 – вимикач для синхронного включення підпалу (2) та акустичного мікрофона (3); 5 – джерело живлення; 6 – підсилювач; 7 – аналізатор спектра

Алгоритм реалізації R/S -аналізу числового ряду, який отримано при перетворенні акустичного сигналу процесу горіння ПОР, подано на рис. 3.17. Використання R/S -аналізу для оцінки числового ряду X прийнятого акустичного сигналу $A(t)$ обумовлено наявністю відношення сигнал/шум, меншого одиниці, що є умовою функціонування нормально-розподіленої системи або близької до неї. В результаті цього, на основі R/S -аналізу в роботі оцінено фрактальну структуру ряду X як сукупності фонового сигналу та корисного акустичного сигналу, отриманого у процесі високотемпературного окислення ПОР.

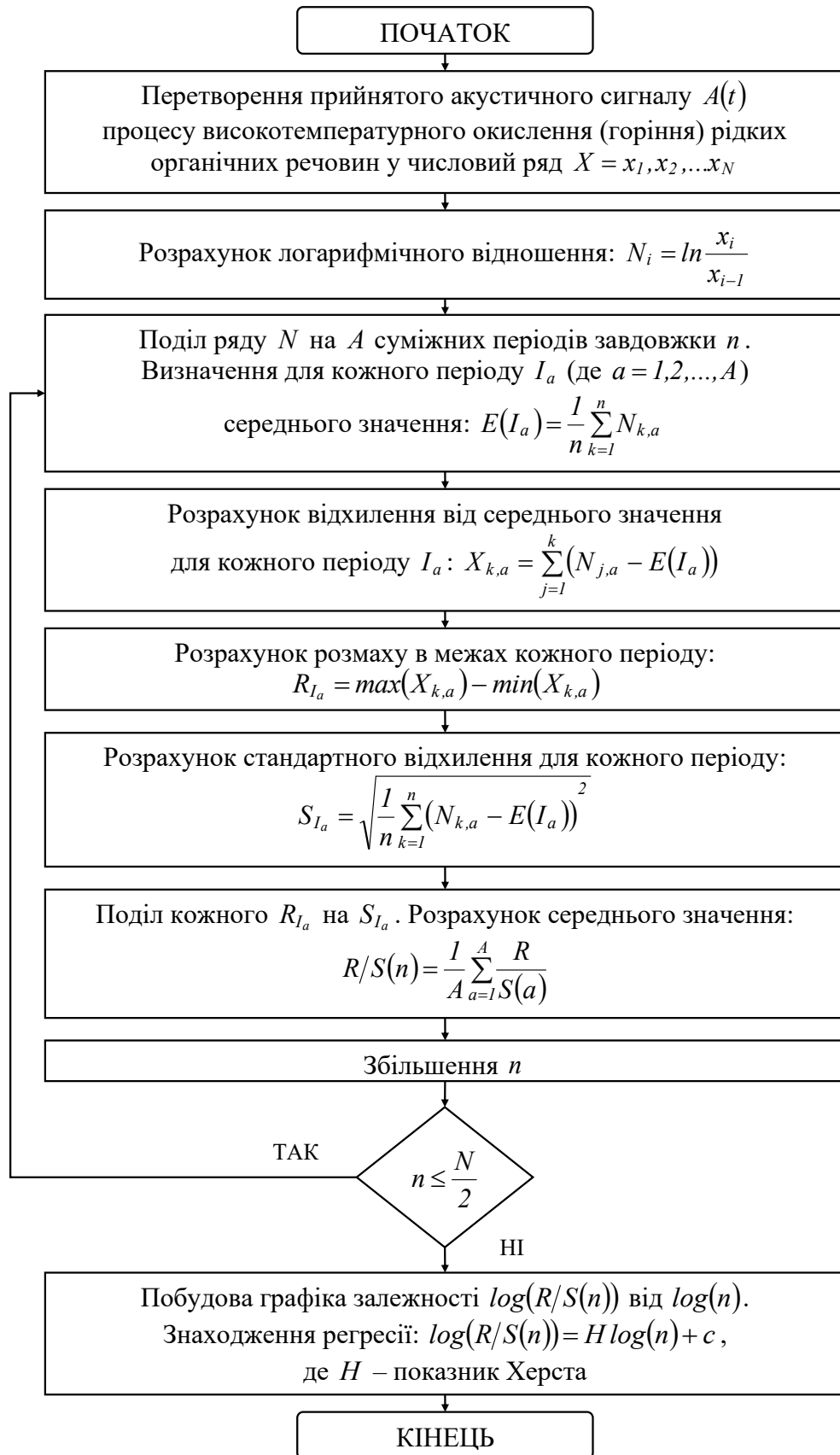


Рисунок 3.17 – Алгоритм R/S -аналізу числового ряду, отриманого шляхом перетворення акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) рідких органічних речовин

З урахуванням особливостей акустичних спектрів для РОР, які були піддані високотемпературному окисленню, виконано розрахунок фрактальної розмірності (D_τ), яка віддзеркалює ступінь подібності амплітудно-часових характеристик РОР, що аналізувалися, а також характеризує динаміку процесів горіння та затухання горіння РОР (для зразків постійного об'єму). Фрактальна розмірність D_τ (як ступінь зламності ряду) визначалася як $D_\tau = 2 - H$, де H – показник Херста. Показник H визначався із умови $R/S = (\alpha A)^H$, де A – кількість періодів спостереження, α – константа, яка задається. При цьому Херст емпірично розраховував константу α для порівняно короткострокових тимчасових рядів природних явищ як 0,5.

Для дослідження було взято деякі спирти (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 і C_8), їх ізомери (C_3, C_5 і C_8), а також рідкі вуглеводи (C_8, C_{12} і C_{16}). Чітко відібрані проби РОР ($V = 2$ мл) переносились у металеву чашу діаметром 38 мм та висотою 5 мм. Чаша була обладнана електричним підпалом. Схему лабораторної установки наведено на рис. 3.16, де аналізатор акустичного сигналу з мікрофоном розташовується на відстані 100 мм від краю металевої чаші. Електричний підпал та підсилювач акустичного мікрофона включалися синхронно, що дозволило фіксувати спектри як на первинній стадії горіння (спалаху) парів РОР, так і процес горіння РОР. Як приклад результатів лабораторних досліджень на рис. 3.18 подано отриманий у процесі експерименту графік зміни в часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) метанолу. Зміни в часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу горіння РОР фіксувалися до припинення горіння (відсутність коливального режиму горіння) в діапазоні частот 5 Гц–25 кГц.

Робоча гіпотеза для обробки та аналізу результатів дослідження процесу горіння деяких РОР методом АЕ основана на уявленнях про те, що характер амплітудно-часової характеристики та АЧХ процесу у вирішальній мірі залежить від фізико-хімічних констант горючої речовини ($T_{спал.}$ – температура спалаху;

$T_{займ.}$ – температура займання; $T_{с.займ.}$ – температура самозаймання; ΔT – температурний інтервал поширення полум'я; P – парціальний тиск парів РОР над розчинником; $\Delta \tau$ – час горіння первинної хмари парів РОР; ΔH_0° – стандартна ентальпія утворення горючої речовини; ΔH_τ° – стандартна ентальпія високотемпературного окиснення горючої речовини).

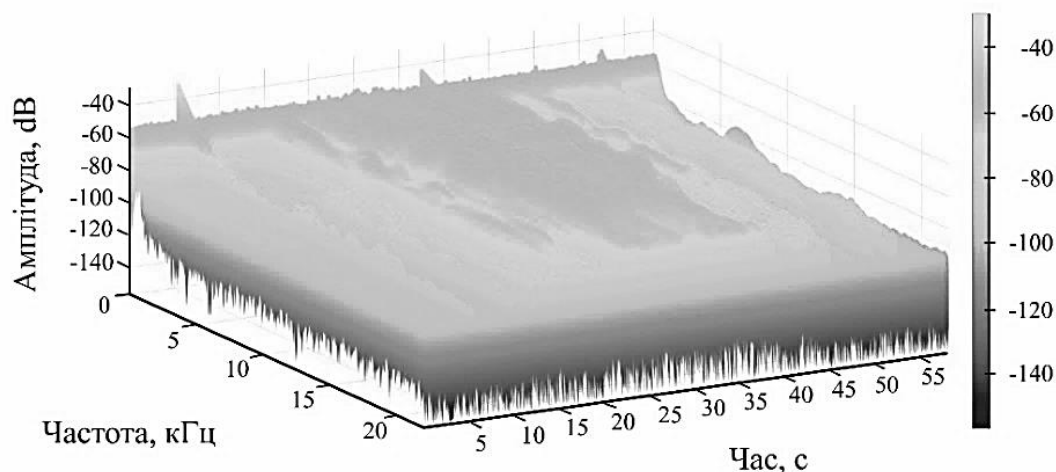


Рисунок 3.18 – Графік зміни у часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу горіння метанолу

У плані обґрунтування висловленої гіпотези необхідно встановити взаємозв'язок фізико-хімічних констант РОР, які досліджуються, з їх структурою (кількість атомів вуглецю в молекулі РОР, ефекти ізомерії) та молярною масою. Для цього складено рівняння реакцій горіння та розраховано величини ΔH_0° і ΔH_τ° РОР (див. табл. 3.1).

Аналіз результатів обчислень дає змогу встановити однозначну залежність збільшення теплоти утворення нормальних (*n* –) та ізомерів (*izo* –) спиртів (C_1 – C_8), а також більш «важких» вуглеводнів (C_8 , C_{12} , C_{16}) від кількості атомів вуглецю у скелетному каркасі молекул спиртів та величин стандартних теплових ефектів реакцій високотемпературного окиснення РОР. Ґрунтуючись на наявності залежностей показників ΔH_0° і ΔH_τ° процесів горіння проб РОР постійного обсягу від показників $n(C)$ і M , у роботі висловлено припущення

про наявність подібних залежностей АЧХ випромінюваного у процесі горіння проб РОР акустичного сигналу від показників $n(C)$ і M цих речовин.

Таблиця 3.1 – Значення енергій утворення (ΔH_0°) та стандартних теплових ефектів (ΔH_τ°) реакцій горіння аліфатичних спиртів (C_1-C_8) та важких ($C_{12}-C_{16}$) рідких вуглеводнів

№ з/п	Рівняння реакції горіння різних рідких органічних речовин	ΔH_0° , $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	ΔH_τ° , $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
1.	$CH_3OH + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	-201,3	-763,8
2.	$C_2H_5OH + 3O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	-234,9	-1408,0
3.	$n-C_3H_7OH + 4,5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	-257,7	-2067,4
4.	$izo-C_3H_7OH + 4,5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	-272,4	-2051,4
5.	$n-C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	-274,6	-2728,0
6.	$izo-C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$ (вторинний)	-292,6	-2713,0
7.	$n-C_5H_{11}OH + 7,5O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$	-302,5	-3383,6
8.	$izo-C_5H_{11}OH + 7,5O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$ (третинний)	-330,0	-3353,0
9.	$n-C_8H_{17}OH + 12O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$	-357,0	-5360,0
10.	$izo-C_8H_{17}OH + 12O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$	-367,6	-5352,3
11.	$C_8H_{18}(z, p) + 12,5O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$	-215,5 (z) -259,3 (p)	-5505,1 (z) -5496,5 (p)
12.	$C_{12}H_{26}(z) + 18,5O_2 = 12CO_2 + 13H_2O$ ↑ ($M = 172,3 \div 204,0$)	-290,9	-8147,2
13.	$C_{16}H_{34}(z) + 24,5O_2 = 16CO_2 + 17H_2O$ ↑ ($C_{13}-C_{15}; C_{12}-C_{16}; M = 198 \div 199$)	-373,3	-10782,2
14.	$C_3H_6O + 4O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$ (ацетон) пропанон	-217,6	-1821,4

* з.т. – закритий тигель; в.т. – відкритий тигель

Таблиця 3.2 – Значення величин $T_{спал.}$, $T_{займ.}$, $T_{с.займ.}$ та температурних меж поширення полум'я досліджених рідких органічних речовин у реакції горіння

№ з/П	Формула РОР	$T_{спал.}$, °C		$T_{займ.}$, °C	$T_{с.займ.}$, °C	Температурні межі поширення полум'я, °C		
						нижня	верхня	ΔT
1.	CH_3OH	6,0	–	13,0	440	5	39	34
2.	C_2H_5OH	13,0 (з.т.)*	16,0 (в.т.)	18,0	400	11	41	30
3.	$n-C_3H_7OH$	23,0 (з.т.)	29,0 (в.т.)	30,0	371	21	55	34
4.	$ізо-C_3H_7OH$ (2 пропанол)	14,0 (з.т.)	18,0 (в.т.)	21,0	430	11	42	31
5.	$n-C_4H_9OH$	35,0 (з.т.)	41,0 (в.т.)	43,0	340	34	67	33
6.	$ізо-C_4H_9OH$ (вторинний)	24,0	–	32,0	395	20	55	35
7.	$n-C_5H_{11}OH$	48,0	–	57,0	300	45	79	34
8.	$ізо-C_5H_{11}OH$ (третинний)	24,0	–	34,0	410	23	55	32
9.	$n-C_8H_{17}OH$	86,0	–	92,0	260	80	116	36
10.	$ізо-C_8H_{17}OH$ (ізооктанол)	77,0 (з.т.)	82,0 (в.т.)	86,0	266	70	108	38
11.	C_8H_{18} (р)	14,0	–	19,0	215	13	49	36
12.	$C_{12}H_{26}$ (р) ($M = 172 \div 204$)	37,0 65,0–110,0	59,0	112,0	210-370	35 99	92 155	57 56
13.	$C_{16}H_{34}$ (р) $C_{13} - C_{15}$ ($M = 181 \div 212$)	–	95,0 (в.т.)	116	190	83	146	63
	$C_{12} - C_{16}$ ($M = 172 \div 226$)	98,0 (з.т.)	107,0 (в.т.)	112	200	95	145	50
14.	C_3H_6O ацетон (кетон)	-18,0 (з.т.)	-9,0 (в.т.)	-5	535 (в повітрі) 485 (в атм. O ₂)	-20	6	26

* з.т. – закритий тигель; в.т. – відкритий тигель

Так, згідно з даними табл. 3.1 величини ΔH_0° для ізомерів спиртів є дещо вищим, ніж для аліфатичних (n -) спиртів. Відповідно величини ΔH_τ° для ізомерів спиртів є нижчими, хоч і незначною мірою. Встановлені факти для розглянутих закономірностей однозначно вказують на складність (багатофакторність) процесу перебігу високотемпературного окиснення ізомерів досліджених спиртів. Одним із ідентифікуючих факторів РОР при їх високотемпературному окисненні є те, що для ізомерів спиртів період прямування максимумів (τ) акустичного сигналу має бути меншим, ніж для спиртів із лінійним вуглецевим каркасом молекул.

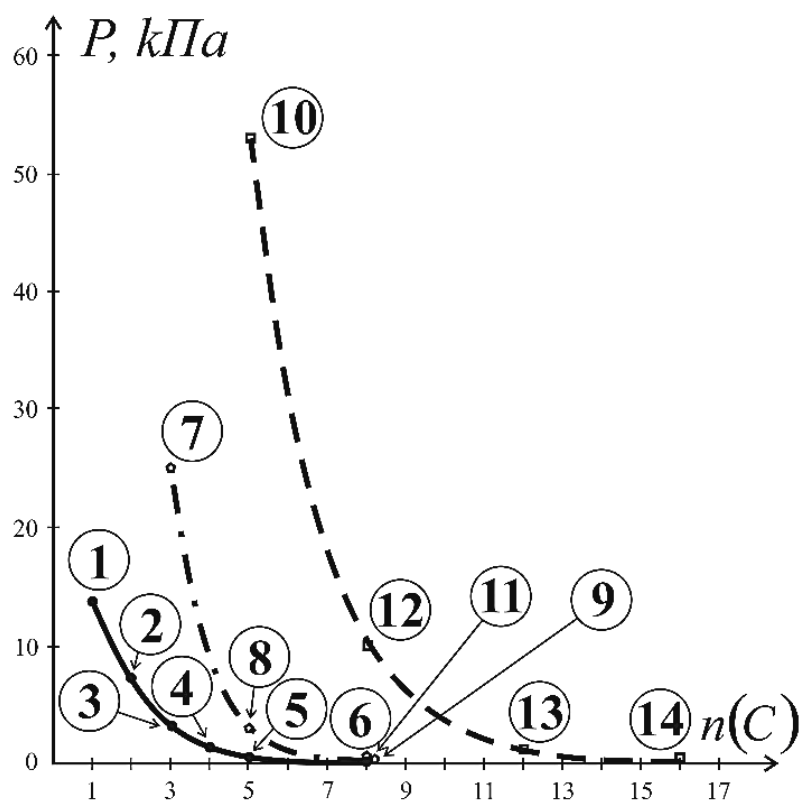


Рисунок 3.19 – Парціальний тиск парів (P) рідких органічних речовин (за температури $20^\circ C$) залежно від $n(C)$ у вуглецевому каркасі молекул. Позначення: спирти (\bullet): 1 – CH_3OH ; 2 – C_2H_5OH ; 3 – $iso-C_3H_7OH$; 4 – $n-C_4H_9OH$; 5 – $iso-C_5H_{11}OH$; 6 – $iso-C_8H_{17}OH$; кетони (\circ): 7 – пропанон (C_3H_6O); 8 – пентанон ($C_5H_{10}O$); 9 – октанон ($C_8H_{16}O$); вуглеводи (\square): 10 – пентан (C_5H_{12}); 11 – октан (C_8H_{18}); 12 – бензин (C_8H_{18}); 13 – дизпаливо ($C_{12}H_{28}$); 14 – парафін ($C_{15}H_{34}$)

Оскільки початок процесу високотемпературного окиснення РОР відбувається через первинну стадію – запалювання газоподібної хмари (парів) над розчинником, то час займання (спалаху) визначається пружністю парів (P) вуглеводнів за стандартних температур (рис. 3.20) та величинами $T_{спал.}$, $T_{займ.}$, $T_{с.займ.}$ і ΔT (табл. 3.2).

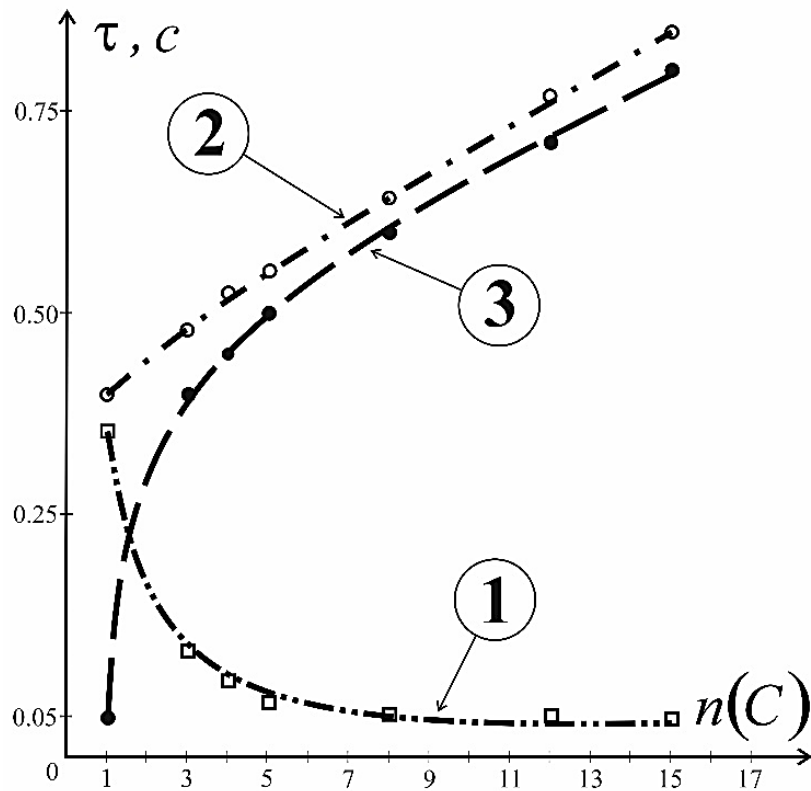


Рисунок 3.20 – Значення часу: початку спалаху – τ_1 , закінчення спалаху – τ_2 та тривалості спалаху (горіння первинного шару парів РОР) – $\Delta\tau$ для досліджуваних спиртів, кетону та вуглеводнів. Позначення: 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – $\Delta\tau$

За даними табл. 3.2, зі збільшенням $n(C)$ або M (n - та izo -) спиртів $T_{спал.}$ та $T_{займ.}$ збільшуються, причому для izo -спиртів ці величини є дещо нижчими, ніж для n -спиртів, а значення ΔT у досліджуваному ряду спиртів мало змінюються, але спостерігається зміщення величини інтервалу ΔT за умов збільшення $n(C)$ або M у бік високих температур. Подібний характер зміни мають величини $T_{спал.}$, $T_{займ.}$ і ΔT для більш важких, ніж спирти, вуглеводнів (C_8 , C_{12} , C_{16}).

Закономірно стверджувати, що чим вище пружність парів, тим швидше відбувається первинне займання (спалах) при досягненні температури займання $T_{займ.}$ і тим швидше має згоріти первинна газоподібна маса пару РОР, і навпаки, чим менше P , тим більше температура спалаху парів РОР, тим більше інтервал часу $\Delta\tau$ стадії первинного займання РОР.

У разі розгляду вуглеводнів із високим вмістом C за звичайних температур значення їх P приблизно дорівнюють нулю, тому потрібне попереднє нагрівання (для парафіну попереднє нагрівання і перехід у рідку фазу) доти, доки утворюється мінімальний обсяг газової фази вуглеводнів, достатній для займання (спалаху) і подальшого горіння. Тому результати розрахунків τ_1 , τ_2 і $\Delta\tau$ для дизпалива ($C_{12}H_{36}-C_{14}H_{30}$) та парафіну ($C_{16}H_{34}-C_{18}H_{38}$) мають деструктивний характер у разі аналізу загальних залежностей ($\tau_1-n(C)$, $\tau_2-n(C)$ та $\Delta\tau-n(C)$), проте «важкі» вуглеводні можуть розглядатися у контексті аналізу залежностей $n(A_m(t))-n(C)$, $n(A_m(t))-M$, $n(A_m(f))-n(C)$ і $n(A_m(f))-M$.

Залежність кількості амплітудних максимумів $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ від $n(C)$ за амплітудно-часовими характеристиками та АЧХ прийнятого акустичного сигналу від процесу АЕ під час горінні спиртів та вуглеводнів знято за умови постійного об'єму проби пального ($V_{проби} = \text{const}$), а також у встановленому діапазоні частот (5 Гц–25 кГц) та часу (до повного згасання горіння). При цьому може бути встановлена різниця у величинах $n(A_m(t))$ та $n(A_m(f))$ аліфатичних та ізомерних структур спиртів залежно від $n(C)$ та M .

Враховуючи, що амплітуда спектрів характеризує потужність акустичного процесу (емісії) в імпульсі, а величина визначається кількістю окисленого пального в імпульсі, можна висловити припущення про зменшення потужності процесу емісії зі збільшенням $n(C)$ або M за умов $V_{проби} = \text{const}$. Так, характер зміни виду амплітудної модуляції акустичного сигналу при перебігу реакції

горіння POP може бути встановлений на основі результатів розрахунків параметра повторюваності (подібності) амплітудної модуляції прийнятого акустичного сигналу, на основі аналізу фрактальної розмірності D_r (рис. 3.13), яка розраховувалася на основі показника Херста часових рядів прийнятого сигналу (відповідно до поданого на рис. 3.16 алгоритму R/S -аналізу). Встановлення особливостей зміни фізичних параметрів амплітудної модуляції прийнятого акустичного сигналу від процесу АЕ під час горіння POP (в умовах $V_{проби} = \text{const}$), а також його амплітудно-частотного відображення, проілюстровано на рис. 3.21 і 3.22, де використані наступні позначення POP: 1 – CH_3OH ; 2 – $n-C_4H_9OH$; 3 – $n-C_8H_{17}OH$; 4 – $izo-C_3H_7OH$; 5 – $izo-C_5H_{11}OH$; 6 – $izo-C_8H_{17}OH$; 7 – C_8H_{18} ; 8 – $C_{12}H_{26}$; 9 – $C_{16}H_{34}$; 10 – C_3H_6O (ацетон).

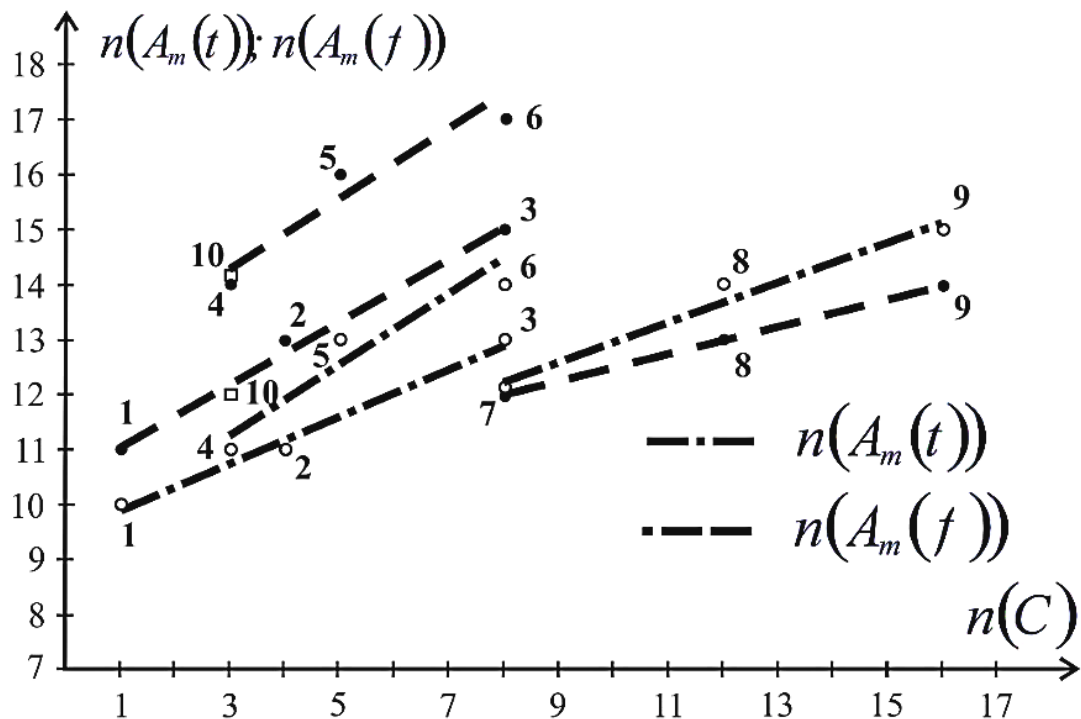


Рисунок 3.21 – Характер зміни кількості амплітудних максимумів $n(A_m(t))$ (в інтервалі часу – від займання до повного припинення горіння) і $n(A_m(f))$ (у діапазоні частот – 5 Гц–25 кГц) у прийнятому акустичному сигналі при перебігу реакції горіння спиртів, кетону та вуглеводнів залежно від $n(C)$ у вуглецевому каркасі POP

Подані на рис. 3.21 і 3.22 результати експериментальної реалізації розглянутих вище уявлень про характер змін амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик процесу горіння РОР від структури та молярної маси паливної речовини. Як випливає з поданого аналізу результатів експерименту, параметри амплітудної модуляції акустичного сигналу та його амплітудно-частотного відображення характеризуються кількістю атомів вуглецю ($n(C)$) у вуглецевому каркасі молекул (див. рис. 3.21) або величиною молярної маси (M) РОР (див. рис. 3.22). Залежності $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ від $n(C)$ і M апроксимовані у роботі лінійною функцією, що не суперечить закону діючих мас для хімічних реакцій – для реакції горіння РОР (спиртів, кетону та вуглеводнів).

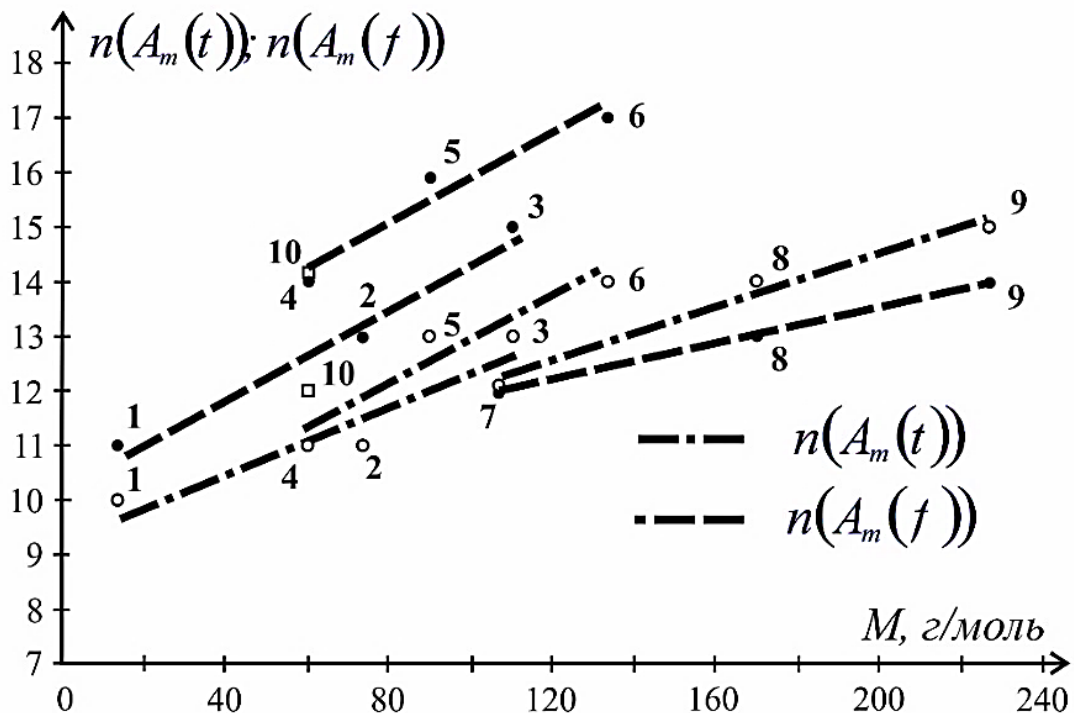


Рисунок 3.22 – Характер зміни кількості амплітудних максимумів $n(A_m(t))$ (в інтервалі часу – від займання до повного припинення горіння) і $n(A_m(f))$ (у діапазоні частот – 5 Гц–25 кГц) у прийнятому акустичному сигналі при перебігу реакції горіння спиртів, кетону та вуглеводнів залежно від їх молярної маси (M)

Тим часом у характері залежностей $n(A_m(t))$ та $n(A_m(f))$ від $n(C)$ та M є суттєві кількісні відмінності, а саме: значення $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ для

ізомерів спиртів виявляються більше аналогічних величин для n – спиртів. При переході від спиртів до «важких» вуглеводнів (при $n(C) \geq 8$ або $M \geq 120 - 130$ г/моль) спостерігається своєрідна оборотність розташування залежності: $n(A_m(f)) - n(C)$ проходить нижче $n(A_m(t)) - n(C)$ (рис. 3.21). Подібне розташування зазначених показників спостерігається і в разі розгляду їх залежно від M (рис. 3.22).

Спостережені залежності у взаємному розташуванні амплітудних максимумів для спиртів (n – та izo –) і «важких» вуглеводнів можуть бути пояснені зміною структури спиртів та відсутністю функціональних груп вуглеводнів (C_8 , C_{12} , C_{16}), а також практично нульовими значеннями P у вуглеводнів з $n(C) \geq 8$, внаслідок чого є можливою зміна динаміки горіння вуглеводнів, відповідно виду амплітудної модуляції й виду спектральних гармонік акустичного сигналу при ефекті АЕ процесу високотемпературного окислення РОР. Внаслідок можливого прояву перерахованих факторів для вуглеводнів спостерігається реверсивність взаємного розташування залежностей $n(A_m(t))$ та $n(A_m(f))$ від $n(C)$ та M (рис. 3.21 і 3.22).

Викладені результати експериментальних досліджень дають можливість створити банк даних геоінформаційної системи автоматизованого контролю акустичного простору міста для достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж із РОР. Так, у разі виникнення на території міста масштабної пожежі система акустичного моніторингу дасть змогу у реальному масштабі часу ідентифікувати (за наявністю в базі даних інформації щодо АЧХ горіння РОР) природу та координати осередку займання, що є джерелом інформації для системи підтримки прийняття антикризових рішень.

З метою підвищення достовірності та надійності результатів визначення природи РОР (у режимі високотемпературного окислення (горіння)) необхідні результати тестування характеру повторюваності у часі (τ) кількості максимумів амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті АЕ протягом часу горіння

проб POP. І тому на рис. 3.23 і 3.24 подано результати розрахунків показників Херста (H) та фрактальної розмірності D_τ і використано такі позначення POP: 1 – CH_3OH ; 2 – $n-C_4H_9OH$; 3 – $n-C_8H_{17}OH$; 4 – $izo-C_3H_7OH$; 5 – $izo-C_5H_{11}OH$; 6 – $izo-C_8H_{17}OH$; 7 – C_3H_6O (ацетон); 8 – C_8H_{18} ; 9 – $C_{12}H_{26}$; 10 – $C_{16}H_{34}$.

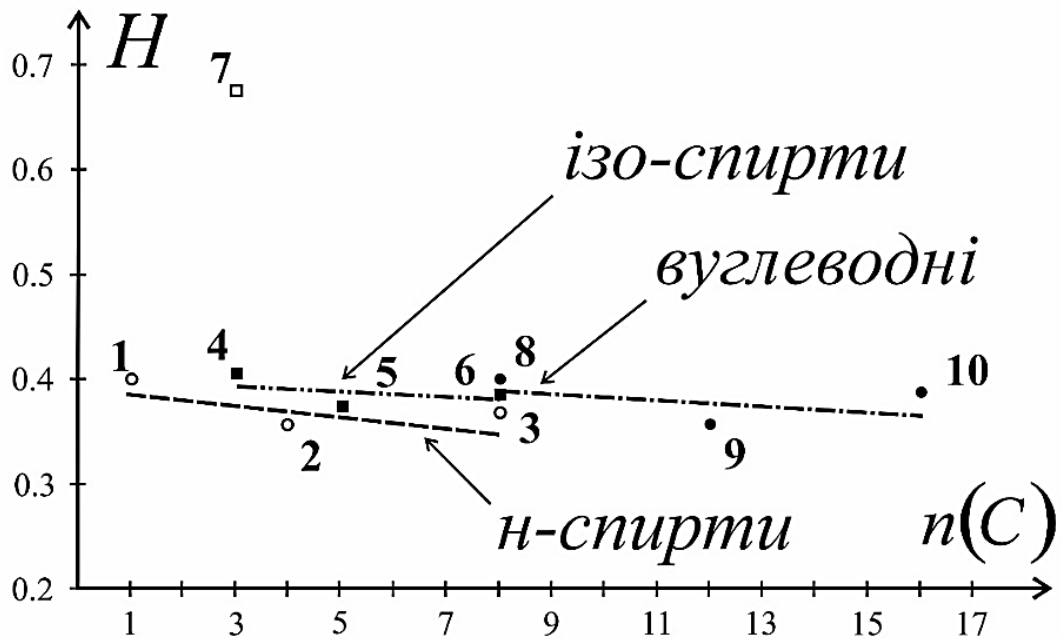


Рисунок 3.23 – Характер зміни показника Херста (H) амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті АЕ реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких рідких органічних речовин від їх $n(C)$

Незалежно від природи POP ($n(C)$) значення показників H і D_τ для дослідженого ряду легкозаймистих рідин перебувають у проміжках $H = 0,3 \div 0,4$ і $D_\tau = 1,55 \div 1,65$; при цьому чітко проявляється тенденція підвищення показника H і відповідно зниження показника D_τ для ізомерів спиртів (приблизно на 0,05 одиниць). За абсолютними значеннями показника H процес горіння досліджених POP є антиперсистентним (тимчасовим), а реакції високотемпературного окислення ацетону (C_3H_6O) – персистентним (довготривалим), але не динамічним. Тільки за $1 < H < 2$ процес горіння набуває динамічного характеру, проте реалізувати його можливо лише за умови сталості

маси РОР протягом часу горіння.

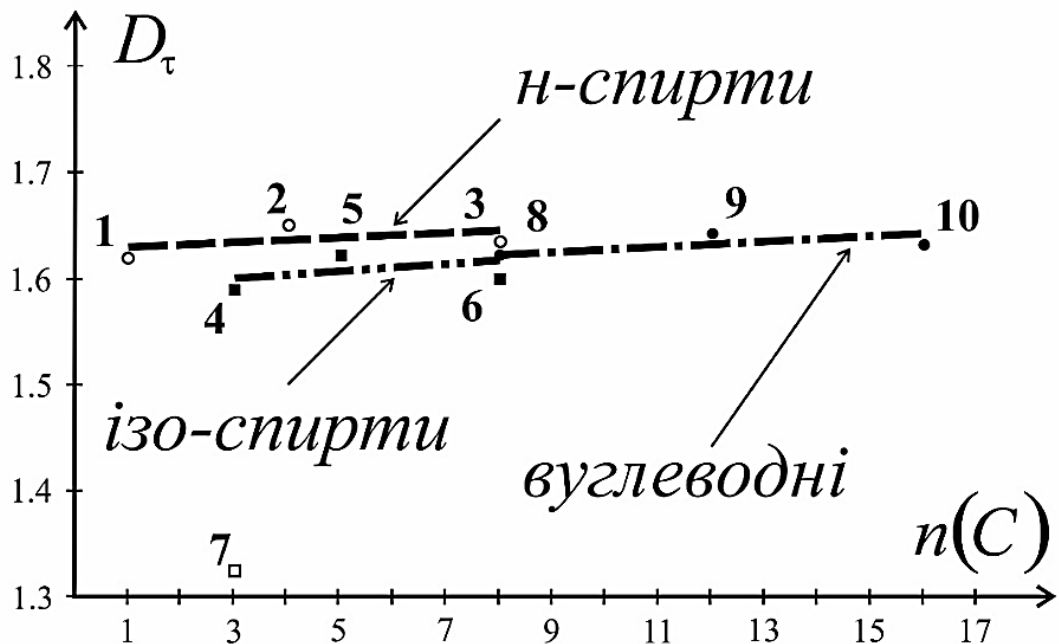


Рисунок 3.24 – Характер зміни показника фрактальної розмірності (D_τ) амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті АЕ реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких рідких органічних речовин від їх $n(C)$

Таким чином, за результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних зі масштабними пожежами РОР, встановлено, що динаміка процесу високотемпературного окиснення (горіння), тобто залежність кількості максимумів ($n(A_m(t))$ та $n(A_m(f))$) амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу при ефекті АЕ, визначається фізичними ($T_{\text{спал.}}$, $T_{\text{займ.}}$, $T_{\text{с.займ.}}$, ΔT , P) та фізико-хімічними термодинамічними параметрами (ΔH_0° , ΔH_τ°) процесу й описується лінійними залежностями від $n(C)$ і M органічних речовин.

Досліджено ефект «спалаху», тобто час первинного процесу горіння парів РОР, та встановлено однозначну залежність тривалості даного процесу ($\Delta\tau$) від парціального тиску парів над чистим розчинником та температурою спалаху

($T_{\text{спал.}}$) або займання ($T_{\text{займ.}}$). Встановлено, що чим більше P і менше $T_{\text{спал.}}$ ($T_{\text{займ.}}$), тим менше час «спалаху» $\Delta\tau$, тобто тривалість горіння парів органічних речовин.

Встановлено, що незалежно від природи досліджених органічних речовин ($n(C)=1\div 16$) значення показників H і D_τ залишаються постійними для дослідженого ряду легкозаймистих рідин ($H=0,3\div 0,4$; $D_\tau=1,55\div 1,65$). При цьому встановлено тенденцію підвищення показника H і відповідно зниження показника D_τ для ізомерів спиртів (приблизно на 0,05 одиниць). Практична сталість параметрів H і D_τ для органічних речовин з лінійною та ізомерною структурою C –каркасів молекул органічних речовин свідчить про відповідний рівень достовірності та надійності отриманих результатів щодо обробки акустичних сигналів при ефекті АЕ реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких органічних речовин, що дає змогу зменшити ступінь помилкових спрацьовувань акустичного пристрою виявлення на території міста джерел масштабних пожеж та встановлення природи пального матеріалу в осередку займання.

3.2 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї

Вогнепальною зброєю є механічний багаторазовий пристрій, призначений для ураження цілі снарядом, що вивільняє рухову енергію завдяки тиску газів, утворених під час згоряння порохового заряду (вибухової речовини) [177–180].

Виділяють такі ознаки вогнепальної зброї:

1) *Вогнепальність*. Здатність передавати снаряду кінетичну енергію за рахунок енергії газів, що утворюються під час згоряння порохового заряду. Зауважимо, що передачу кінетичної енергії снаряду можна реалізувати й іншими способами (наприклад, стисненим повітрям або електромагнітними прискорювачами); такі засоби належать до іншого класу озброєнь і не підпадають під визначення вогнепальної зброї.

2) *Наявність ствола.* Конструктивно це порожня трубка, призначена для спрямування снаряда та утримання вибухової речовини; під час пострілу один із кінців ствола герметично закривається, що забезпечує створення тиску газів для викиду снаряда.

3) *Наявність пристрою запалювання вибухової речовини.* Пристрій ініціювання може мати просту конструкцію (наприклад, отвір у стволі, куди підводять вогонь) або складний механізм (наприклад, ударно-спусковий механізм сучасної автоматичної зброї).

Таблиця 3.3 – Коротка (узагальнена) технічна характеристика револьверів

Параметр	Типові значення / приклади	Примітки
Калібр (поширені)	.22 LR; .32; .38 Special; .357 Magnum; .44 Magnum; .45 Colt	зазначені калібри охоплюють від малих до мисливських / магнум-сумісних варіантів
Ємність барабана	5–7 патронів (часто 6)	існують моделі з 5 (компактні) і з 7–8 (спеціальні) каморами
Маса (типова)	≈ 0,7–1,3 кг (типові служб/побутові моделі)	великі рамні револьвери важать більше; наведені значення – орієнтовні
Ефективна дальність	~ 25–75 м (звичайна); до ~ 100–150 м для потужних магнумів	сильна залежність від калібру, довжини ствола та вміння стрільця
Скорострільність (практична)	~6 пострілів / 15–20 с – залежить від режиму (одинакова дія / подвійний удар) та навичку	практичні темпи залежать від дії (single vs double action) і вміння оператора

4) *Достатня вражаюча дія снаряда.* Енергетична характеристика снаряда, яка визначає його здатність завдати людині або тварині небезпечні для життя чи смертельні ушкодження; зазвичай оцінюється питомою кінетичною енергією снаряда, що повинна дорівнювати або перевищувати орієнтовний поріг 0,5 Дж/мм².

5) *Достатня міцність конструкції.* Конструкція зброї повинна забезпечувати можливість не менш ніж двох послідовних пострілів без руйнування чи втрати працездатності.

Далі розглянемо основні типи вогнепальної зброї.

Револьвер (англ. *revolver* – «обертальний», від лат. *revolvere* – «обертати») – особиста багатозарядна неавтоматична стрілецька зброя з обертовим барабаном (циліндром), призначена для ураження цілі шляхом випуску снаряду з окремої камори барабана. Більшість класичних конструкцій мають шість камор у барабані, хоча існують модифікації з меншим або більшим числом зарядів. Коротку (узагальнену) технічну характеристику револьверів наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.4. – Типові технічні параметри пістолетів

Параметр	Типові значення / приклади	Примітки
Калібр (поширені)	9×19 мм (Parabellum); .45 ACP; .40 S&W; .380 ACP; .22 LR	охоплює штатні службові та цивільні варіанти
Маса (без уражаючих елементів /з повним магазином)	≈ 0,6–1,2 кг	легкі компактні – ~0,5–0,7 кг; повнорозмірні службові – ~0,8–1,2 кг
Ємність магазину	6–17+ патронів (типово 7–15)	залежить від конструкції (компакт / стандарт / подовжений магазин)
Ефективна (орієнтовна) дальність	≈ 25–70 м (практична); деякі зразки – до ~200 м	практична точність суттєво залежить від калібру, довжини ствола та вміння стрільця
Режими вогню	самозарядний (переважно); окремі – можливість автоматичного / вибіркового вогню	більшість цивільних і службових пістолетів – тільки самозарядні
Скорострільність (практична)	залежить від оператора; теоретичний циклічний для автоматичних – ~600–900 постр./хв	практичні темпи (цільова / контрольована стрільба) є набагато нижчими
Додаткові пристрої	приклад / плечовий упор, напрямні / рейки для кріплення прицілів, ліхтарів, лазерів	деякі пістолети мають інтегровані чи адаптовані шини / рельси (Picatinny/Weaver)

Пістолет (фр. *pistolet*) – особиста вогнепальна зброя, призначена для ураження цілі на дистанціях приблизно 50–70 м (окремі зразки забезпечують ефективну дію на відстанях до ~200 м). Сучасні пістолети, як правило, є самозарядними; частина конструкцій забезпечує також автоматичний режим вогню або режим вибіркового вогню. Для підвищення стійкості під час стрільби

окремі моделі можуть комплектуватися плечовим упором або прикладом (складним чи жорстким – дерев'яним або полімерним), а також мають конструктивні елементи для кріплення додаткових тактичних приладів. Типові технічні параметри пістолетів наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.5 – Типові технічні параметри пістолетів-кулеметів

Параметр	Типові значення / приклади	Примітки
Калібр (поширені)	9×19 мм Parabellum; .45 АСР; 7,62×25 мм Tokarev	більшість сучасних ПП використовують 9×19 мм; деякі історичні та спеціальні зразки – інші патрони
Ємність магазину	20–64 патрони (типові: 20–32)	барабанні магазини (прип. 50–64) зустрічаються в окремих моделях
Маса (без патронів)	≈ 2,5–4,5 кг (широкий діапазон залежно від конструкції)	компактні пістолети-кулемети – ближче до нижнього значення; важкі історичні – до верхнього
Довжина ствола	≈ 100–300 мм	корелює з ефективною дальністю та кулебійністю
Ефективна дальність	≈ 50–150 м	практично ефективні на ближніх / середніх дистанціях; залежить від калібру і довжини ствола
Скорострільність (теоретична)	≈ 500–1200 постр./хв	реальна практична скорострільність залежить від режиму вогню та контролю оператором
Режими вогню	автоматичний; деякі – чергами або вибіркового режиму	багато сучасних ПП мають селектор режимів
Конструктивні особливості	складні / знімні приклади, складані приклади, напрямні для приладдя	призначені для підвищення ергономіки та адаптації до тактичних завдань

Пістолет-кулемет – індивідуальна автоматична вогнепальна зброя, сконструйована під пістолетний патрон, яка поєднує портативність пістолета з можливістю ведення безперервного автоматичного вогню. Перші конструкції подібного типу з'явилися на початку ХХ століття (у деяких джерелах згадується розробка А. Ревеллі, 1915 р.). Широке поширення пістолети-кулемети одержали в період Другої світової війни. Сучасні зразки застосовуються у спеціальних підрозділах, органах внутрішніх справ, підрозділах повітряно-десантних військ,

екіпажах бойових машин тощо. Типові технічні параметри пістолетів-кулеметів наведено у табл. 3.5.

Автомат (від грец. *αὐτόματος* – «самодіючий») – індивідуальна автоматична стрілецька зброя, призначена для ураження живої сили противника. Для ведення рукопашного бою до автомата може кріпитися багнет-ніж.

Типові тактико-технічні параметри сучасних автоматів: калібр 5,45–7,62 мм; маса – приблизно 2,5–4,5 кг; темп стрільби ≈ 600 постр./хв і більше; практична (ефективна) дальність вогню ~ 400 –600 м, орієнтовна прицільна дальність – до 1000–1200 м.

Таблиця 3.6 – Типові тактико-технічні параметри автоматів

Параметр	Типові значення / приклади	Примітки
Калібр	5,45 мм – 7,62 мм	включає проміжні та малокаліберні бойові патрони
Маса (порожній, без боєкомплекту)	$\approx 2,5$ –4,5 кг	залежить від довжини ствола, матеріалів і оснащення (приціл, приклад)
Темп стрільби (теоретичний)	≈ 600 постр./хв і більше	практична скорострільність є нижчою; залежить від режиму вогню та контролю стрільця
Практична (ефективна) дальність вогню	≈ 400 –600 м	залежить від калібру, довжини ствола та боєприпасу
Прицільна дальність	до ≈ 1000 –1200 м (теоретично)	зазвичай прицільна дальність є більшою за практичну ефективну; залежить від оптики й підготовки стрільця
Тип набоїв	проміжний набій / малоімпульсний малий калібр	забезпечує баланс між віддачею, масою кулі та ефективністю на середніх дистанціях
Додаткове устаткування	багнет-ніж, приклад, оптичні / нічні приціли, напрямні для приладів	використовується для підвищення універсальності та адаптації до завдань

Автомати, як правило, розробляються під так званий проміжний набій, що займає проміжне положення між пістолетним і гвинтівковим патроном, або під малоімпульсні малокаліберні набої. Унаслідок широкого впровадження малокаліберних бойових патронів різниця між автоматом і автоматичною

гвинтівкою у практичному застосуванні значно зменшилась. Типові тактико-технічні параметри автоматів наведено у табл. 3.6.

У низці національних класифікацій зброї сучасні автоматичні індивідуальні комплекси часто позначають як *штурмові гвинтівки*.

Гвинтівка визначається як індивідуальна стрілецька зброя з нарізним каналом ствола, призначена для ураження цілі засобами вогневої дії, а також за необхідності – за допомогою багнета чи приклада. Після Другої світової війни в конструкціях військової та поліцейської зброї домінують автоматичні гвинтівки і карабіни; паралельно розвиваються спеціалізовані гілки – снайперські та спортивні гвинтівки.

Таблиця 3.7 – Класифікація гвинтівок за конструктивно-тактичними ознаками та типовими призначеннями

Клас / тип	Основні ознаки	Призначення / зауваження
Неавтоматична (магазинна) гвинтівка	нарізний канал, ручне перезарядження або магазинна подача; одиночна стрільба	точна стрільба на великі дистанції; полювання, спорт
Автоматична гвинтівка / штурмова гвинтівка	можливість автоматичного і одиночного режимів; розроблена під проміжний набій	тактичні і військові застосування; баланс між мобільністю й вогневою потужністю
Карабін	зменшена довжина ствола, компактніші габарити	бойове застосування в обмежених просторах, спецпідрозділи
Снайперська гвинтівка	підвищена точність, оптичні приціли, важкий ствол	дальні точні ураження
Спортивна гвинтівка	конструктивні елементи для точності (регульовані приклади, приціли)	змагання, тренування

Автоматична гвинтівка реалізує можливість ведення як безперервного автоматичного, так і одиночного (сліп- / семі-автоматичного) вогню, що забезпечує вищу практичну скорострільність у порівнянні з неавтоматичними конструкціями (з ручним перезарядженням). Крім того, автоматичні конструкції зменшують фізичне навантаження і стомлюваність стрільця під час інтенсивного вогневого застосування та покращують можливості підтримки візуального спостереження за цілями завдяки більшій стійкості платформи і швидшому

відновленню прицілювання після пострілу. Класифікацію гвинтівок за конструктивно-тактичними ознаками та типовими призначеннями наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.8 – Типові техніко-тактичні характеристики кулеметів за класами (орієнтовні значення)

Параметр	Типові значення / інтервал	Примітки
Калібр (поширені)	5,45×39 мм; 5,56×45 мм; 7,62×39 мм; 7,62×51 мм; 7,62×54R; 12,7×99 мм (крупнокаліберні)	легкі кулемети – як правило, під пістолетний / проміжний набій або стандартний гвинтівковий; важкі – під крупнокаліберні набої
Ємність живлення	стрічкове (метал / полімер), коробчасті магазини; типова довжина стрічки – від 50 патронів і більше	стрічкове живлення забезпечує тривалі черги і великий боєзапас у переносному форматі
Маса (без боєкомплекту)	≈ 4–15+ кг (легкі – 4–8 кг; загального призначення – 8–12 кг; важкі – >12 кг)	значення сильно залежить від калібру, системи охолодження та кріплення
Темп вогню (теоретичний)	≈ 600–1200 постр./хв (легкі / піхотні); ≈ 400–800 постр./хв (важкі / крупнокаліберні)	практична скорострільність є нижчою; застосовуються короткі черги для збереження прицільності та уникнення перегріву
Ефективна / прицільна дальність	зі встановленням на сошки: ≈ 300–800 м; з верстатом / триподом і крупнокаліберними – до ≈ 1500–2000 м	ефективність залежить від калібру, прицілів, умов і типу цілі
Охолодження	повітряне (повітряні канали, ребра), водяне (старі великі системи), розрахунок на короткі черги	охолодження є критичним для тривалого вогню (особливо для важких кулеметів)
Конструктивні особливості	сошки, верстатні кріплення, кришка для швидкої заміни стрічки, рукоятки, приціли	наявність кріплень / оптик істотно впливає на тактичне застосування

Кулемет – автоматична стрілецька зброя, призначена для ведення стійкого високошвидкісного вогню зі спеціальної опори (верстата, сошок, треноги або іншого кріплення). Використовується для ураження живої сили та матеріальних цілей на полях бою, а також – залежно від конструкції та калібру – для ураження повітряних або надводних об'єктів. Кулемети характеризуються здатністю до тривалого автоматичного вогню, підвищеною боєздатністю за рахунок великого

боєкомплекту й системи охолодження (позначеної або повітряною / водяною, або розрахунком на короткі черги), а також конструктивною адаптацією до стаціонарного або мобільного застосування (кріплення на верстаті, шасі бойових машин тощо). Типові техніко-тактичні характеристики кулеметів за класами (орієнтовні значення) наведено у табл. 3.8.

Вогнепальну зброю поділяють:

1) *за ступенем автоматичності* стрілецьку зброю класифікують на автоматичну, напівавтоматичну та неавтоматичну. В автоматичній зброї процес заряджання, устанавлення на бойове зведення та виймання гільзи виконується за рахунок енергії газів, що утворюються під час згоряння вибухової речовини; при утримуваному натисканні на спусковий орган відбувається послідовність пострілів (безперервний або черговий автоматичний вогонь). У напівавтоматичній зброї кожне натискання на спусковий орган викликає один постріл, після чого автоматично відбувається перезаряджання – цикл повторюється при наступному натисканні. У неавтоматичній (ручній) зброї операції перезаряджання та устанавлення затвора на бойове зведення виконуються вручну; для приведення в боєздатний стан, зокрема, необхідно відвести затвор назад, дослати його вперед і замкнути. До неавтоматичної групи належать револьвери, більшість мисливських рушниць, а також певні типи гвинтівок і карабінів; у сучасному спортивному й мисливському озброєнні все частіше зустрічаються напівавтоматичні конструкції;

2) *за цільовим призначенням* засоби стрілецької зброї класифікуються на бойову, мисливську, спортивну та багатоцільову. Бойова зброя призначена для ураження живої сили та техніки в бойових умовах і включає гвинтівки, карабіни, автомати, пістолети, револьвери тощо. Мисливська зброя сконструйована для добування тварин і птахів під час полювання; до неї належать рушниці, карабіни, штуцери. Спортивна зброя призначена для ураження мішеней під час змагань і тренувань (переважно малокаліберні гвинтівки та пістолети, а також спеціалізовані конструкції для стендової та таргетної стрільби). Багатоцільова зброя передбачає універсальність застосування – можливість використання для

полювання, самооборони, спортивної стрільби та інших цілей залежно від комплектації та модифікації;

3) *за способом виготовлення* класифікуються на заводську, кустарну, саморобну, перероблену. Заводська (промислова) зброя виготовляється на технічно оснащених промислових підприємствах відповідно до державних, галузевих або фірмових стандартів і технічної документації. Характеризується наявністю заводського маркування, серійних номерів, уніфікованих допусків за розмірами і матеріалами та документів виробника. Кустарна зброя виготовляється в майстернях кустарями з використанням промислового обладнання та технологічних прийомів; може базуватися як на оригінальних кресленнях, так і на практичних модифікаціях існуючих зразків. За рівнем виконання іноді наближається до заводської, що ускладнює ідентифікацію. Саморобна (хобі-/аматорська) зброя виготовляється індивідуально з підручних матеріалів, часто без застосування спеціалізованого обладнання та без дотримання стандартизованих технічних вимог. Може використовувати окремі деталі заводського походження, але загалом не відповідає нормам точності, міцності та маркування заводської продукції. Переробленою (модифікованою) зброєю є первісно заводська зброя, до конструкції якої внесено зміни, що призвели до відхилення від стандартних параметрів або до набуття додаткових функцій (наприклад, вкорочення або подовження ствола, зміна системи запалювання, переробка газовідвідної системи тощо). До переробленої також зараховують випадки, коли цивільні або господарські пристрої (газова, пневматична зброя, інструменти) модифіковані саморобно з набуттям властивостей вогнепальної зброї;

4) *за ступенем зарядження* зброю поділяють на однозарядну та багатозарядну. Однозарядна зброя – конструкції, в яких перед кожним пострілом виконується ручне зарядження одиничним набоем; до цієї групи належать одноствольні мисливські рушниці, окремі спортивні гвинтівки та пістолети. Багатозарядна зброя – конструкції, що забезпечують зберігання кількох набоїв у магазині, барабані або в інших елементах подачі і/або автоматичну подачу під

час перезарядження; сюди відносяться револьвери, магазинні гвинтівки і карабіни, пістолети, автомати, а також дво-, три- та чотириствольні рушниці;

5) за довжиною ствола зброю поділяють на довгоствольну, середньоствольну та короткоствольну. Довгоствольна зброя – конструкції з відносно великою довжиною ствола; належать мисливські рушниці, більшість гвинтівок і багато снайперських систем; характеризуються кращою балістичною стабільністю та більшою початковою швидкістю кулі/патрона. Середньоствольна зброя – проміжні за довжиною ствола конструкції (карабіни, деякі тактичні гвинтівки), що поєднують компактність і задовільні балістичні характеристики для бойового та оперативного застосування. Короткоствольна зброя – конструкції з коротким стволом (пістолети, револьвери, короткі карабіни/кабани), призначені переважно для близької дистанції та надання високої маневреності в обмеженому просторі; мають меншу прицільну дальність та іншу балістичну поведінку в порівнянні з довгоствольними зразками;

б) за кількістю стволів зброю поділяють на одноствольну, двоствольну та багатоствольну. Одноствольна зброя: містить один ствол; поширена конструкція в більшості сучасних пістолетів, револьверів, гвинтівок і карабінів. Забезпечує простоту конструкції, легкість технічного обслуговування та уніфіковану балістичну характеристику пострілу. Двоствольна зброя: має два стволи, що можуть бути розташовані горизонтально (біч-о-бік) або вертикально (один над іншим). Типові приклади – двоствольні мисливські рушниці (вертикалки, бокфлапи) та деякі спеціалізовані конструкції. Двоствольність забезпечує можливість швидкого другого пострілу без перезарядження, а також дає можливість використання різних набоїв у кожному стволі. Багатоствольна зброя: включає конструкції з трьома й більше стволами (наприклад, триствольні рушниці, багатоствольні пістолети-карабіни, оборонні установки малого калібру) або системи типу картечниць/ручних багатоствольних гармат. Багатоствольні рішення застосовуються для підвищення щільності вогню, комбінування типів набоїв або забезпечення резервного пострілу в умовах обмеженої можливості перезарядження;

7) *за характером обробки каналу ствола* вогнепальну зброю поділяють на нарізну, гладкоствольну та комбіновану. Нарізна зброя: внутрішні стінки каналу ствола мають гвинтоподібні поздовжні заглиблення – нарізи, які утворюють один або кілька витків від казенника до дульного зрізу. Межі між нарізами утворюють виступи – поля. Нарізи повідомляють кулі не лише поступального, а й обертального руху, що підвищує її стабільність у польоті та стандартизовано впливає на характер проникнення у перешкоду. Кількість нарізів у каналі зазвичай становить 4 або 6 (рідше – 8), вони можуть мати правий або лівий напрямок нахилу; величина кроку нарізів (відстань, за яку наріз робить повний оберт) визначає кут обертання кулі й узгоджується з калібром та конструкцією набою. Гладкоствольна зброя: канал ствола не має нарізів; типовими прикладами є більшість мисливських рушниць. Для покращення кучності дробового бою дульна частина гладкоствольного ствола може мати звуження – чок або напівчок; інколи на дульному зрізі таких стволів роблять короткі нарізи (т.зв. «парадокс»), що дає змогу використовувати як дробові, так і кулясті набої. Комбінована зброя: містить поєднання стволів із нарізним і гладким каналами (наприклад, мисливські комбінації), що забезпечує універсальність застосування під різні типи набоїв;

8) *за калібром* вогнепальну зброю поділяють на малокаліберну (до 6,5 мм), середньокаліберну (6,5–9,0 мм) та крупнокаліберну (понад 9,0 мм). У різних системах позначення калібр виражають по-різному: в Україні – у міліметрах (мм); у країнах англійської традиції зазвичай використовують дюймові позначення (наприклад, «.22», «.30», «.45»), тоді як для мисливських гладкоствольних рушниць є поширеним поняття калібр-гауґе (gauge) – кількість однакових свинцевих куль, виготовлених із 1 фунта (453,592 г), діаметр яких відповідає внутрішньому діаметру ствола;

9) *за способом заряджання* зброю поділяють на дульнозарядну та казнозарядну. Дульнозарядна – конструкції, у яких заряджання здійснюється через дульний зріз ствола; одним із суттєвих недоліків такої зброї є низька скорострільність через тривалі операції заряджання та перезаряджання.

Казнозарядна – конструкції, у яких зарядження виконується через казенну частину ствола; сучасні вогнепальні системи, як правило, є казнозарядними, що забезпечує підвищену скорострільність, зручність експлуатації та можливість використання уніфікованих боєприпасів.

В основу методу автоматичного виявлення застосування вогнепальної зброї та її типу покладено особливості АЧХ за характеристичними частотами акустичних сигналів від пострілів.

Розроблений у роботі [181] метод базується на дослідженнях АЧХ звукових хвиль від пострілів з вогнепальної зброї. Для проведення лабораторних досліджень застосовано лабораторну установку, функціональну схему та фото якої подано на рис. 3.25 і 3.26.

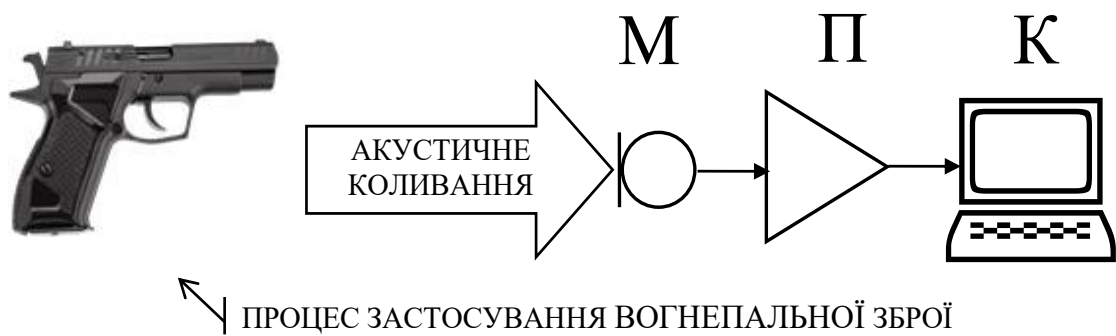


Рисунок 3.25 – Схема лабораторної установки для дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням

Під час експерименту було зібрано дані акустичних сигналів пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» 9 мм та автомата АК-74 калібру 5.45 мм як потенційно можливих пристроїв для здійснення терористичних актів.

Амплітудно-частотні характеристики трьох пострілів з кожного типу пристроїв (пістолет Макарова калібру 9 мм, травматичний пістолет «Форт-14Р» 9 мм та автомат АК-74 калібру 5.45 мм) наведено на рис. 3.27–3.29.

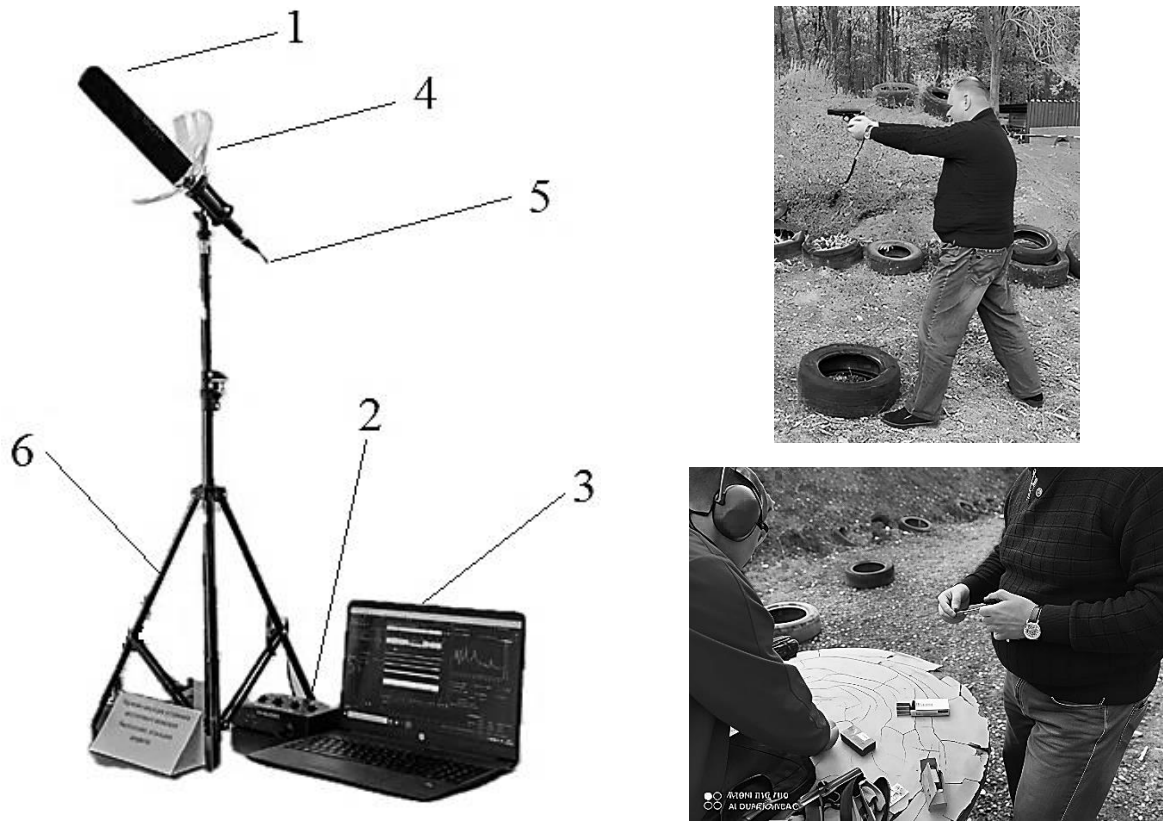


Рисунок 3.26 – Фото лабораторної установки та проведення експерименту щодо дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї: 1 – спрямований мікрофон; 2 – звукова карта; 3 – комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням; 4 – дифузор; 5 – звуковий кабель; 6 – штатив

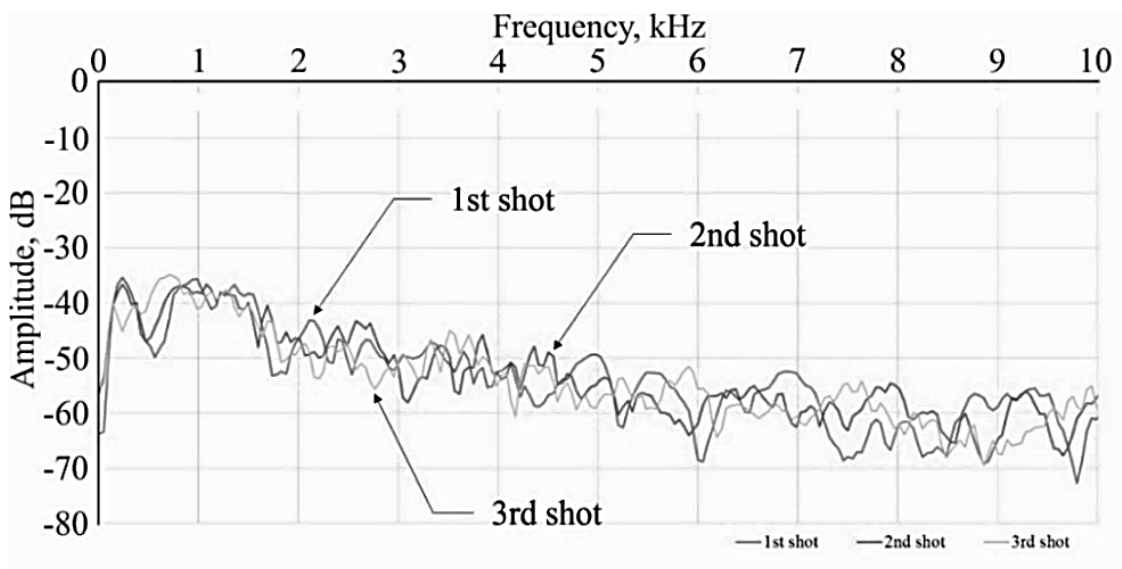


Рисунок 3.27 – Спектри пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

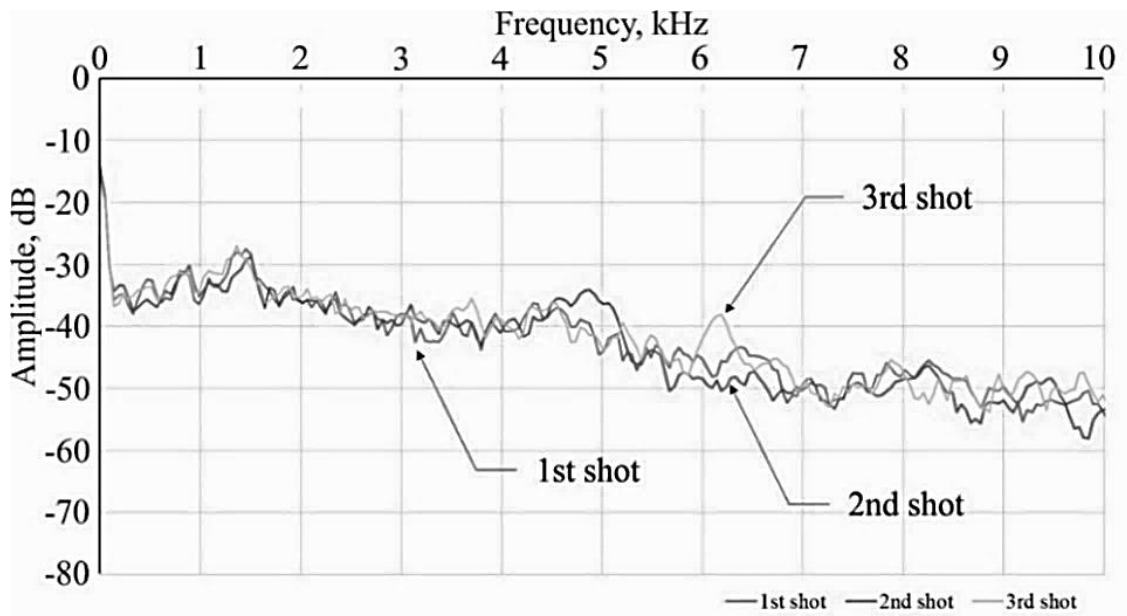


Рисунок 3.28 – Спектри пострілів із травматичного пістолета «Форт-14Р»

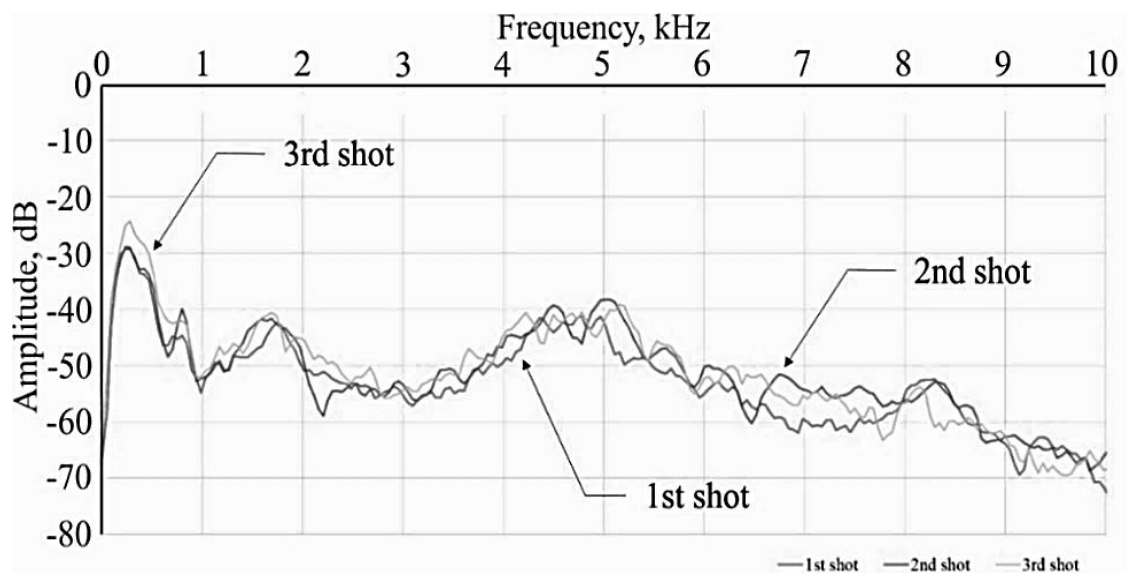


Рисунок 3.29 – Спектри пострілів з автомата АК-74 калібру 5.45 мм

За результатами порівняльного аналізу складено середню характеристику акустичного спектра пострілу для трьох типів вогнепальної зброї шляхом визначення характеристичних частот із максимальними значеннями амплітуд; результати обробки експериментальних даних наведено в табл. 3.9.

Для ідентифікації пострілу запропоновано наступний алгоритм, проілюстрований на рис. 3.30 і 3.31, а саме:

- 1) виділення «корисного» сигналу на фоні перешкод (фільтрування);
- 2) отримання частотного (спектрального) опису отриманого сигналу;

3) визначення характеристикних частот (частоти з амплітудою, що перевищує встановлене порогове значення (рис. 3.20) отриманого сигналу;

4) порівняння отриманих результатів з базою даних щодо ідентифікації вогнепальної зброї.

Таблиця 3.9 – Характеристичні частоти спектрів пострілів досліджуваних зразків вогнепальної зброї

Види зброї	№ пострілу	Характеристичні частоти, кГц					
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
ПМ 9 мм	1	0,4	1,2	2,9	4,1	7,2	10,6
	2	0,8	1,6	2,4	3,9	8,5	11,5
	3	0,4	1,3	3,0	4,0	9,5	12,5
АК-74 5.45 мм	1	1,1	1,8	2,5	5,9	8,8	16,3
	2	1,3	1,9	2,8	3,9	7,9	10,1
	3	1,7	3,2	5,4	8,2	9,9	14,3
Форт-14Р	1	0,9	1,5	2,7	7,2	7,2	10,5
	2	0,6	1,7	2,9	2,9	7,7	11,9
	3	0,8	1,9	3,4	3,4	8,0	14,7

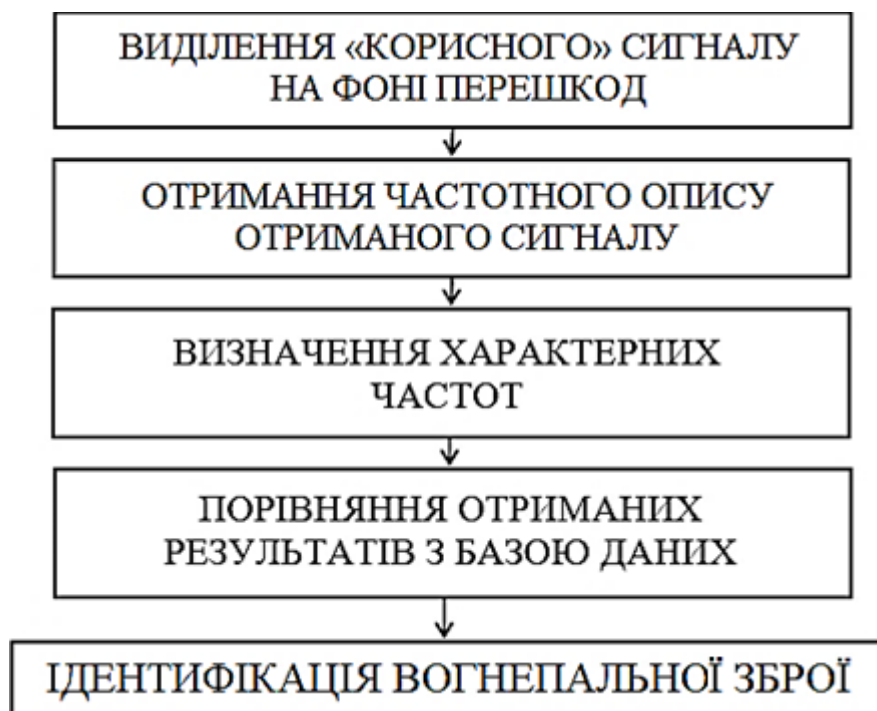


Рисунок 3.30 – Алгоритм ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів

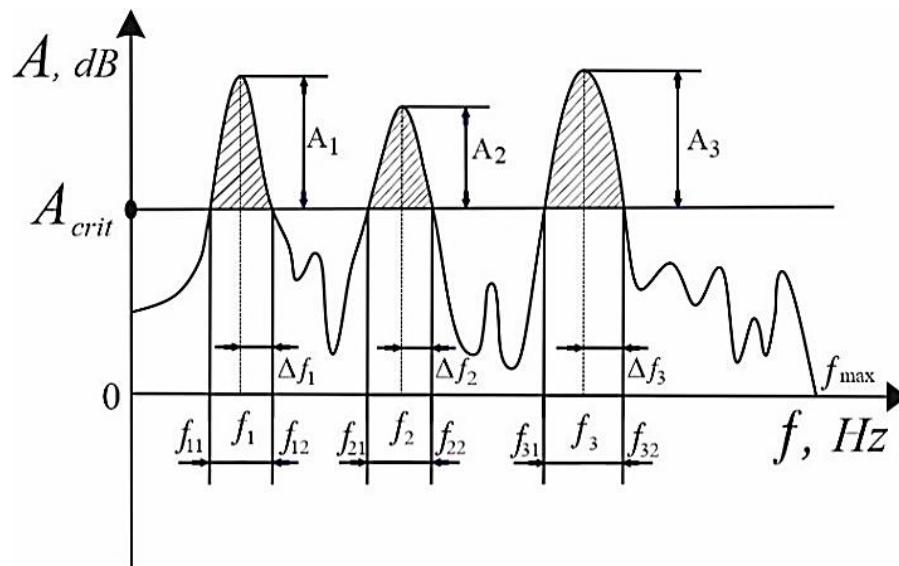


Рисунок 3.31 – Визначення характеристичних частот спектра пострілу та визначення енергії спектра на відповідних гармоніках: A_i – амплітуда i -ї гармоніки спектра; f_i – частота i -ї гармоніки спектра; Δf_i – допустимий діапазон колювання частоти i -ї гармоніки спектра прийнятого сигналу (див. табл. 3.3); A_{crit} – встановлене порогове значення для амплітуд гармонік спектра (визначається на основі статистичних даних прийнятих сигналів для різних типів зброї)

Під час експерименту для фільтрації сигналів використана порогова амплітуда, для визначення характеристичних частот, на яких амплітуда сигналу перевищує встановлене порогове значення. У разі позитивного результату частота зберігається, в іншому випадку вона відкидається. Цей процес повторюється для всього діапазону частот. Ідентифікація процесу використання вогнепальної зброї відбувається за рахунок встановлення певної кількості збігів між отриманим та еталонними спектрами. У випадку виявлення чотирьох або більше збігів можна вважати, що даний спектр відповідає з ймовірністю не менше 80 % еталонному. При цьому точність визначення становить 80 %, оскільки спектри можуть бути зміщені й амплітуди можуть відрізнятися.

Кількість частот, амплітуда яких перевищує встановлене порогове значення, визначається як:

$$K_{ex} = \left\{ A_s''(f) = 0 \mid \text{sign}(A_s''(f_i)) > 0 \right\}, \quad (3.1)$$

де $A_s(f)$ – функція огинаючої спектра прийнятого сигналу.

Для кожного типу зброї енергія спектра прийнятого сигналу, що перевищує порогове значення, визначається як:

$$E_{crit}(f) = \int_0^{f_{max}} A_{crit}(f) df, \quad (3.2)$$

де $A_{crit}(f)$ – функція огинаючої спектра, що перевищує порогове значення.

Процес ідентифікації зброї відбувається за умови:

$$E_{crit} \leq \int_{f_{1,1}}^{f_{1,2}} A_1(f) df + \int_{f_{2,1}}^{f_{2,2}} A_2(f) df + \dots + \int_{f_{n,1}}^{f_{n,2}} A_n(f) df. \quad (3.3)$$

Для згладжування спектра та забезпечення відповідної точності й надійності ідентифікації вогнепальної зброї за показником енергії спектра прийнятого сигналу, що перевищує порогове значення, у роботі використано вагову функцію вікна Хеммінга, яка допомагає зменшити спотворення, що виникають через розриви спектра сигналу, та має вигляд:

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos(2\pi n / N - 1), \quad (3.4)$$

де $w(n)$ – значення вікна Хеммінга для відліку n ; N – кількість відліків у сигналі; n – індекс відліку, $n = 1, 2, \dots, N - 1$.

Застосування вікна Хеммінга до сигналу $x(n)$ проводилось покомпонентним множенням кожного відліку на відповідне значення вікна, а саме: $x_n(n) = x(n) \cdot w(n)$, де $x_n(n)$ – значення вихідного сигналу для відліку n , який оброблено вікном Хеммінга, $x(n)$ – значення вхідного сигналу для відліку n .

При обробці отриманих акустичних сигналів пострілів з однієї і тієї самої

зброї спостерігаються зміщення (відхилення) акустичних спектральних характеристик (рис. 3.32). Ці зміщення виникають внаслідок факторів, таких як: зміни умов навколишнього середовища, невизначеності в методиках вимірювань, а також випадкові або систематичні помилки. При більш детальному визначенні акустичного спектра пострілів слід враховувати різні параметри, такі як маса кулі, кількість пороху в патроні, швидкість кулі при вильоті зі ствола, довжина та температура ствола тощо.

В результаті серії пострілів можна спостерігати, що спектри зсуваються у частотному діапазоні на незначну величину. Ми припускаємо, що допустиме відхилення Δf_i для ідентифікації спектрів дорівнює 5 % ($\Delta f_i = 0,05 f_i$).

Вплив зовнішніх факторів на акустичний спектр пострілу є важливим завданням дослідження. Це може бути корисним для визначення характеристик зброї за його особливостями акустичного спектра пострілу, а також для аналізу акустичного оточення в бойових умовах.

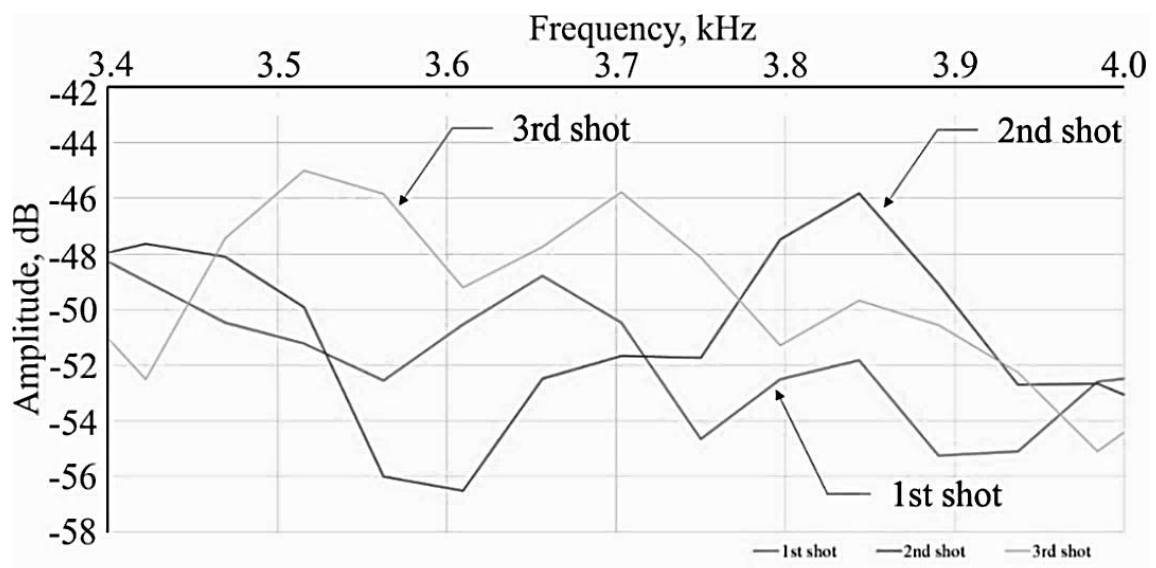


Рисунок 3.32 – Зміщення у спектральних характеристиках пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

Одним із найбільш значущих факторів, що впливає на відповідні характеристики спектрів звуку пострілів зі стрілецької зброї, є температура ствола. Під час пострілу пороховий заряд перетворюється на гази та високотемпературні продукти згоряння. Ці гази створюють сильний тиск,

необхідний для виштовхування кулі зі ствола. В результаті відбувається значне нагрівання ствола, що може суттєво впливати на характеристики звукового спектра.

За результатами ряду досліджень і аналізу спектрів можна відзначити, що акустичні параметри трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» й автомата АК-74 калібру 5,45 мм відрізняються. Проте на окремих частотних діапазонах спектра є певна схожість (рис. 3.33–3.35).

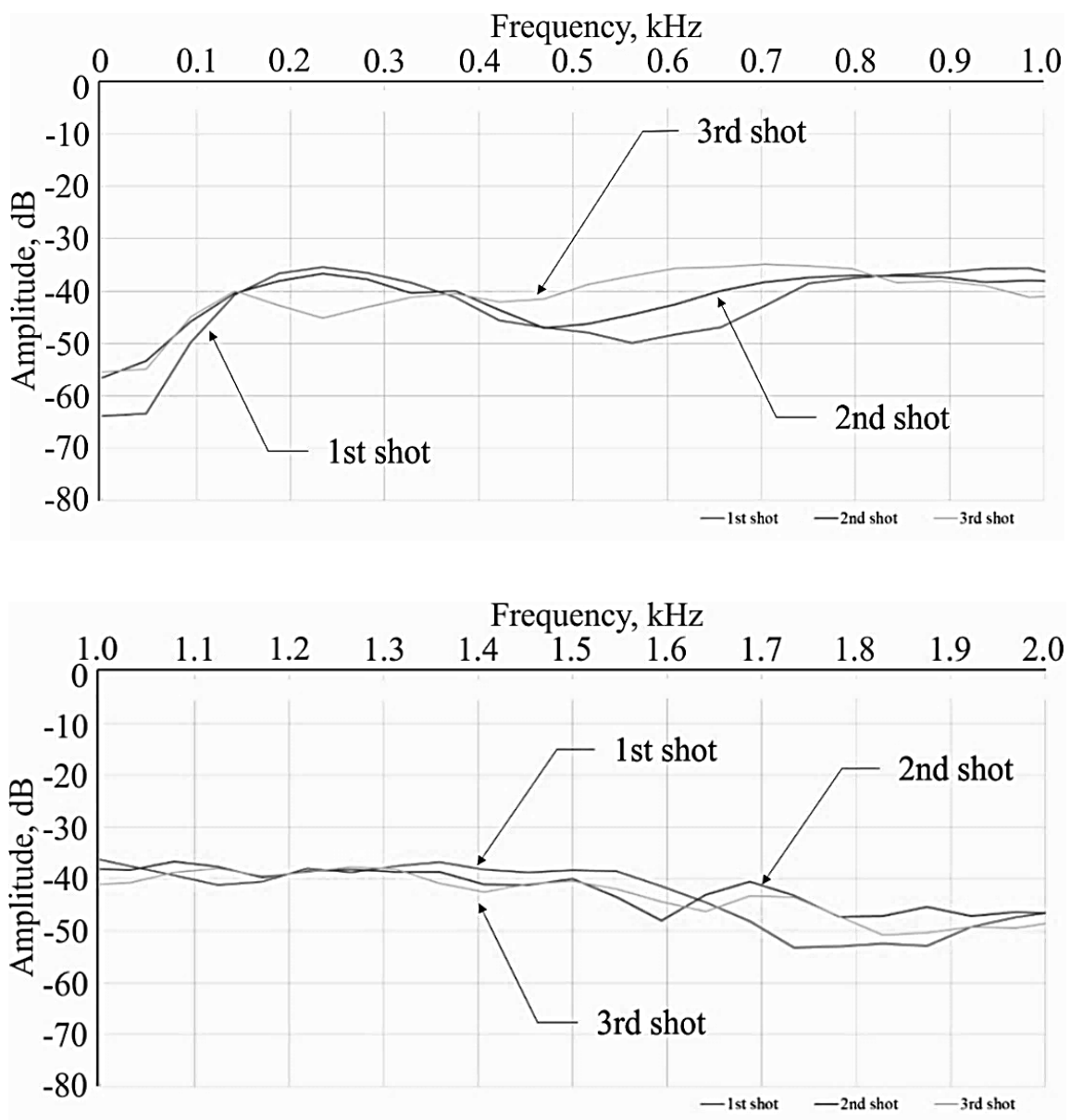


Рисунок 3.33 – Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

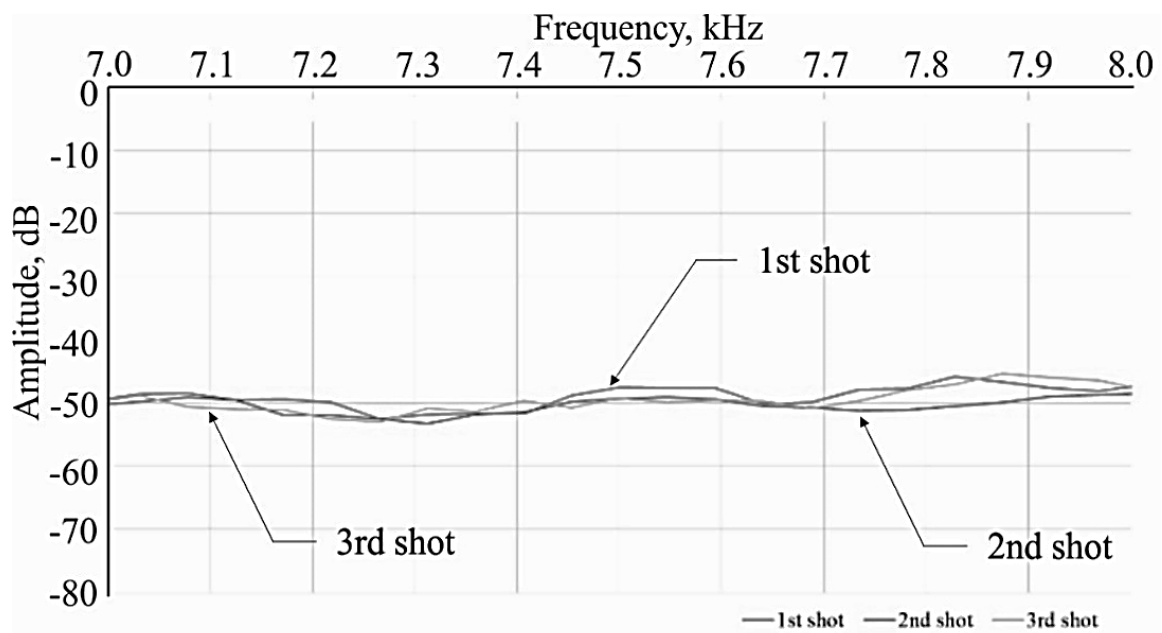
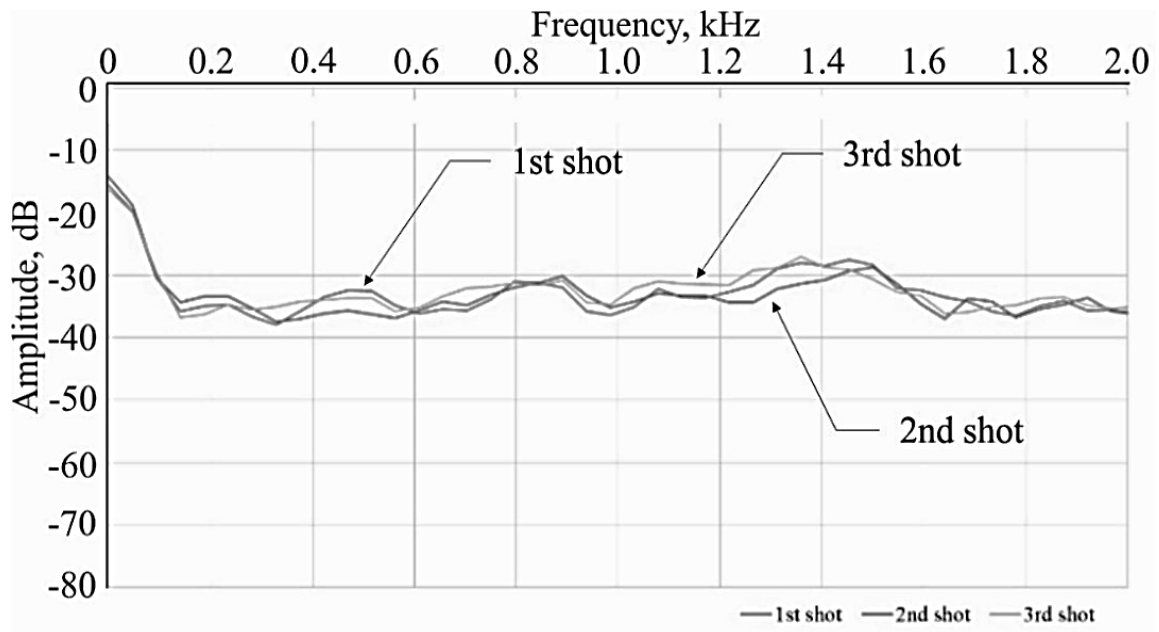


Рисунок 3.34 – Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів із травматичного пістолета «Форт-14Р»

Для підвищення точності ідентифікації акустичного спектра в роботі застосовано метод віднімання спектрів. Це передбачає порівняння спектра, отриманого в поточному експерименті, з еталонним спектром, який був отриманий експериментально після проведення серії з більше 50 пострілів. Так, для прикладу візьмемо три спектри пострілів зі стрілецької зброї (рис. 3.25), і порівняємо його з еталонним спектром, наведеним на рис. 3.26.

Достовірність результатів експерименту перевірялась методом критерію

Стьюдента, призначеного для оцінки статистичної значущості різниць між середніми значеннями вибірок, а також він враховує обмежений розмір вибірки та забезпечує більш точні оцінки значущості відмінностей. В установлених межах 5 % відхилення результати дослідження все ще вважаються достовірними. З урахуванням цього, в роботі введено максимально допустиме інтервальне значення S_p . В межах цих інтервалів амплітудно-частотні характеристики пострілів вважаються достовірними для подальшого аналізу та інтерпретації (рис. 3.37).

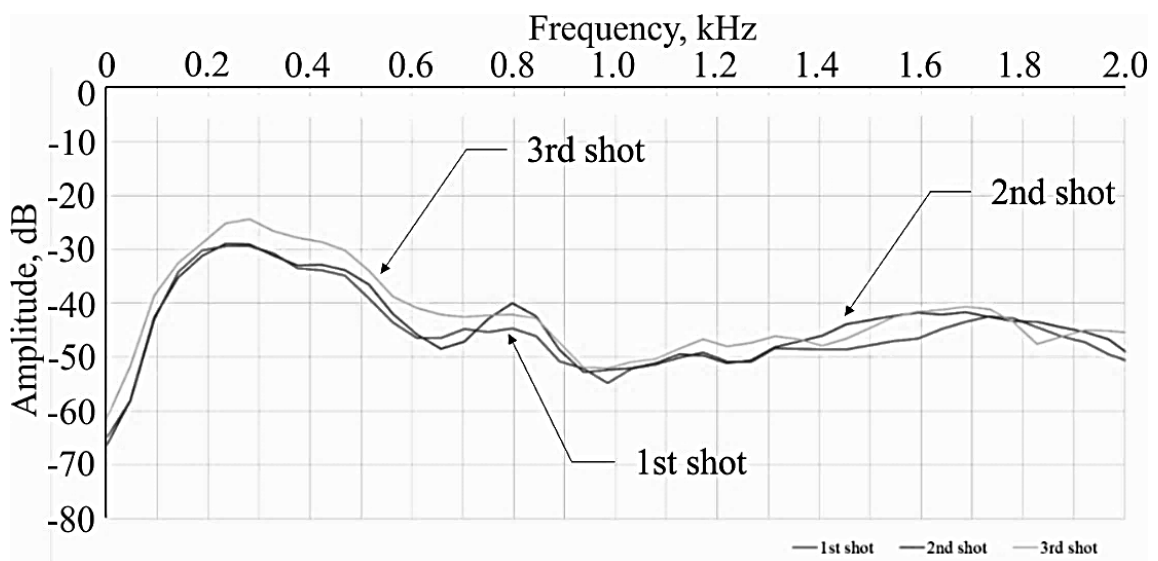
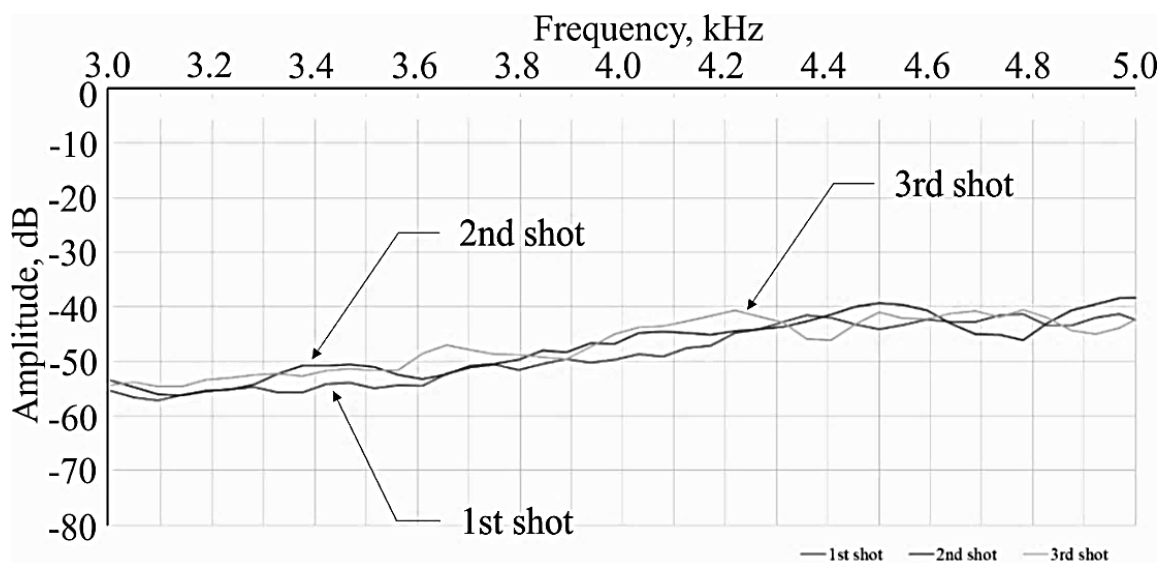


Рисунок 3.36 – Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів автомата АК-74 калібру 5,45 мм

Після застосування процедури віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів, результати наведено на рис. 3.38, можна зробити висновок, що лише один із представлених спектрів у разі застосування цього методу дає результат, що наближається до нуля. Це свідчить про те, що отриманий сигнал із високою ймовірністю 0,95 відповідає еталонному, а саме постріл з автомата АК-74 калібру 5,45 мм.

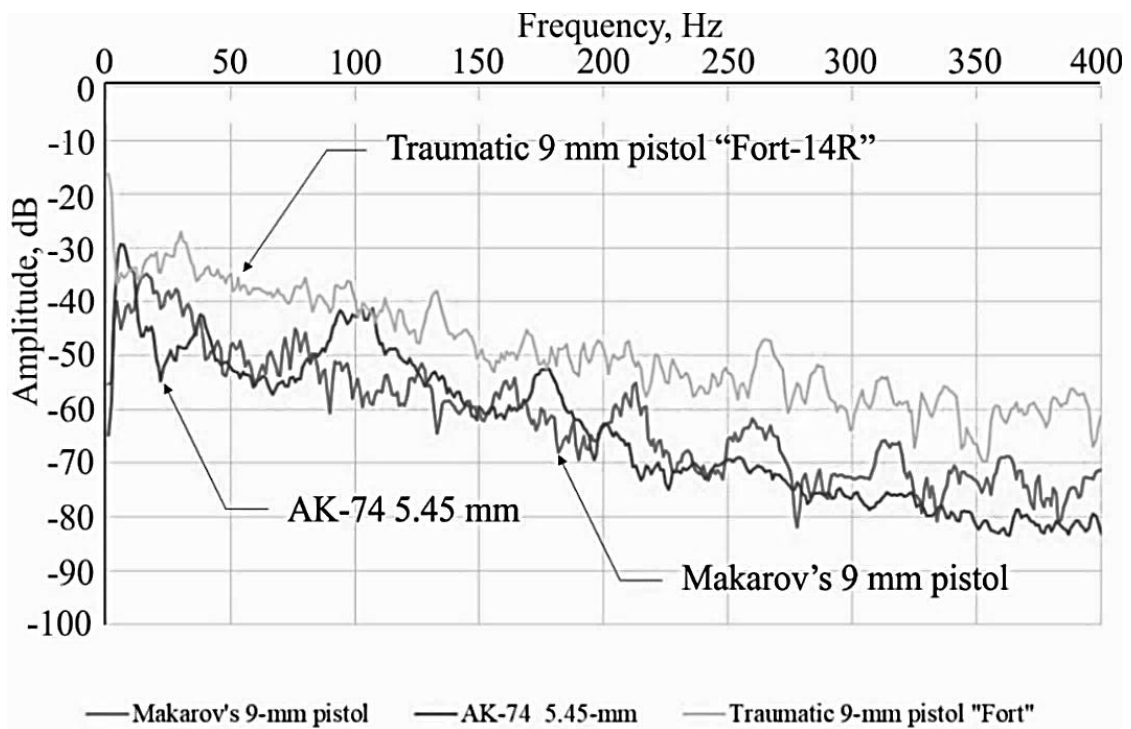


Рисунок 3.37 – Загальні АЧХ трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» та автомата АК-74 калібру 5,45 мм

Отримані результати дають змогу розробити функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу.

Функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу зображено на рис. 3.30.

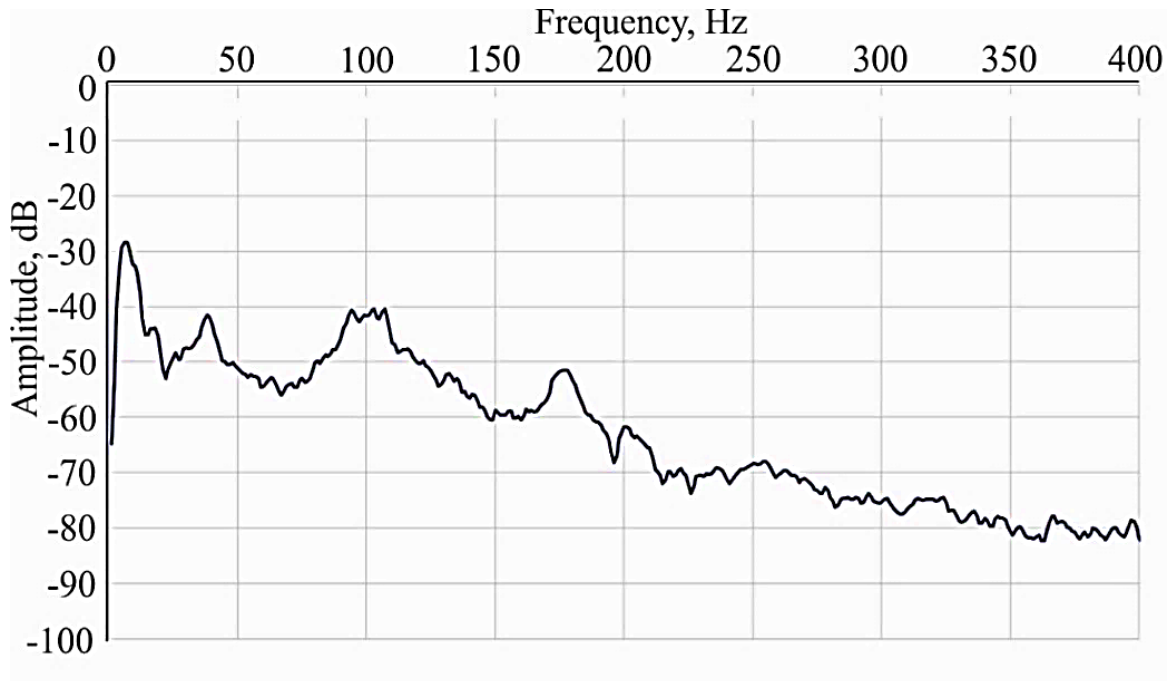


Рисунок 3.38 – АЧХ еталонного спектра пострілу

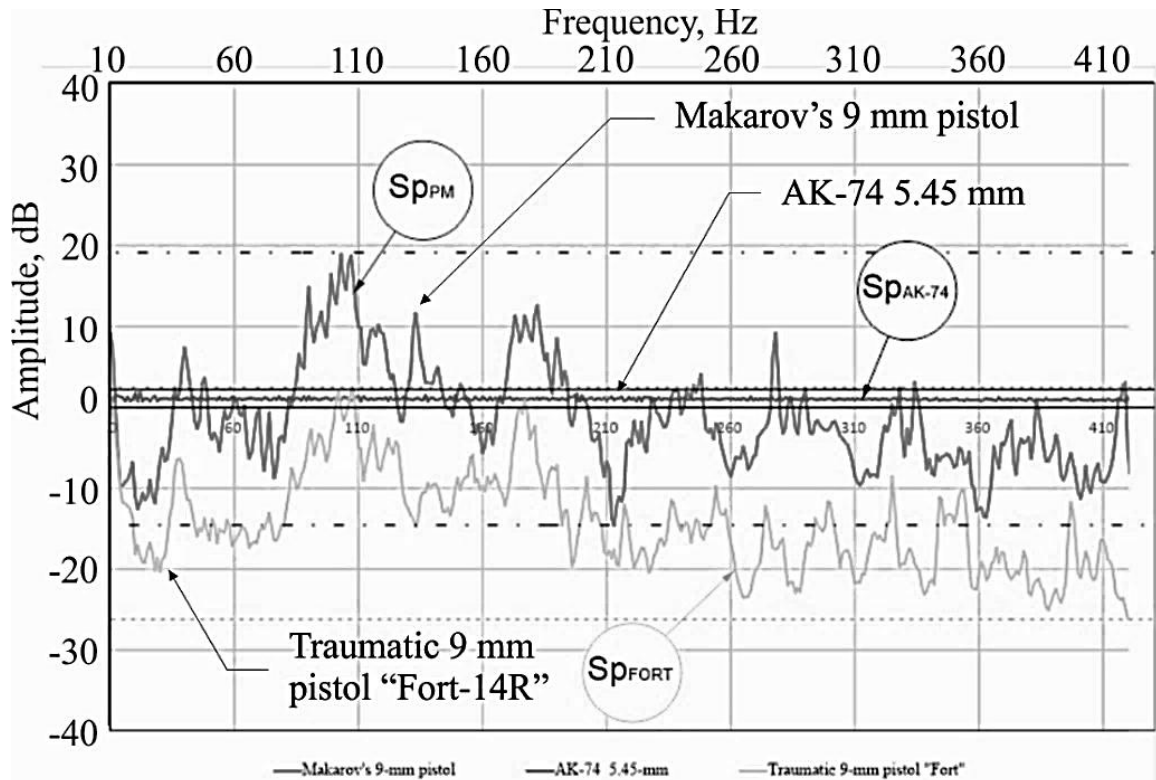


Рисунок 3.39 – Максимально допустиме значення S_p пострілів

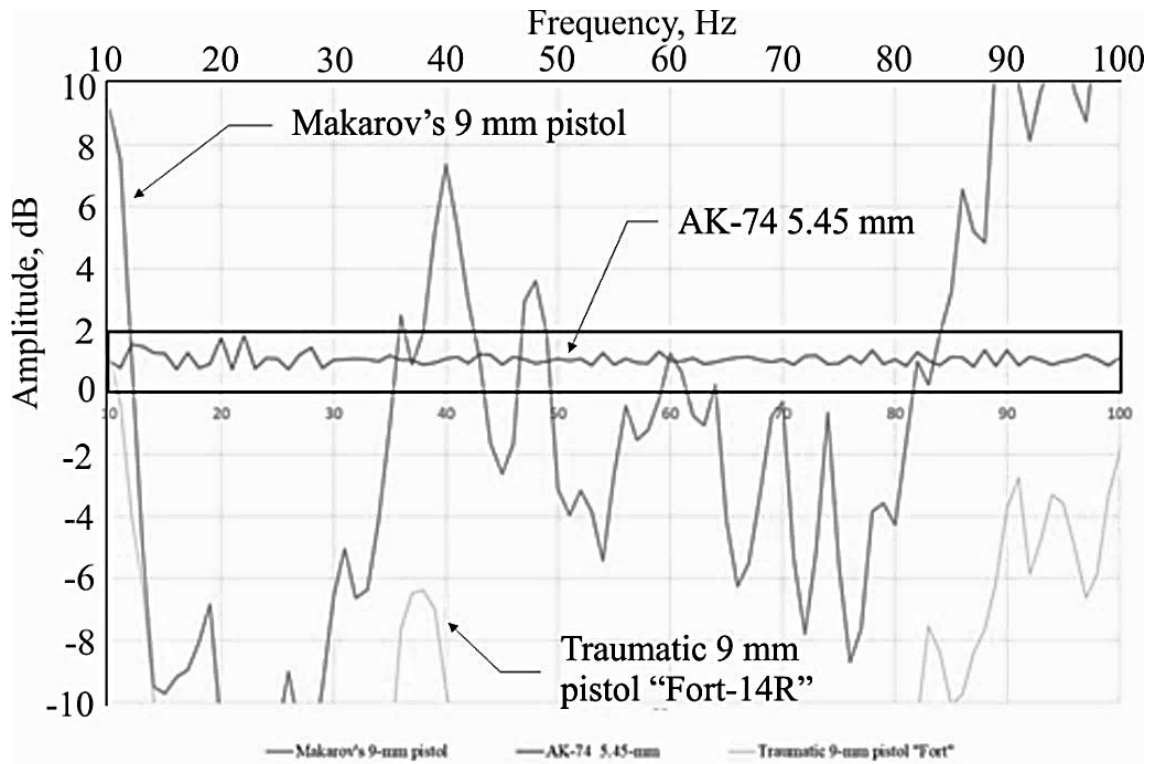


Рисунок 3.40 – Результати віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів

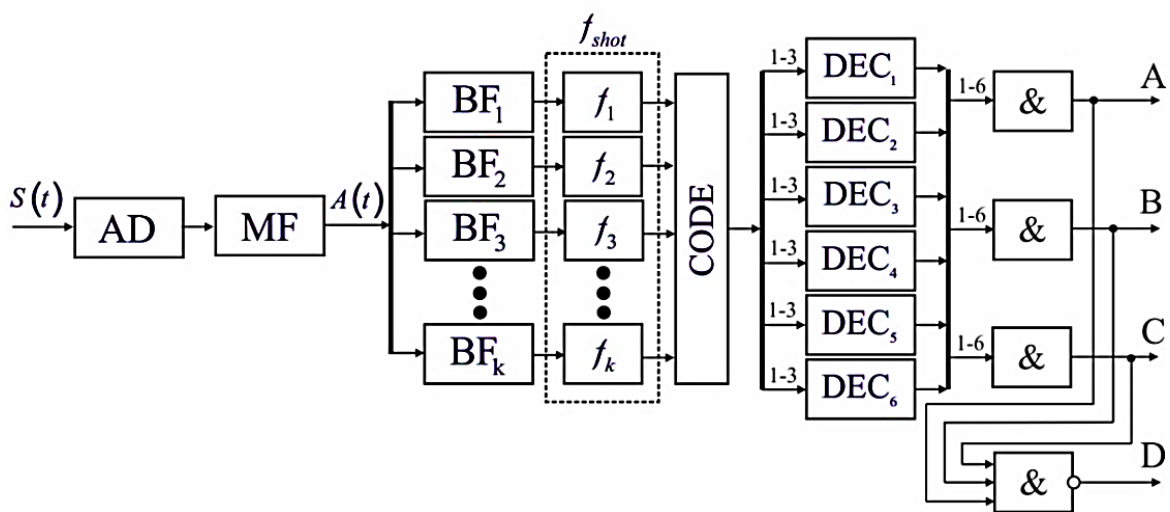


Рисунок 3.41 – Функціональна схема ідентифікації вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу: $S(t)$ – вхідний акустичний сигнал, амплітуда якого змінюється у часі t ; AD – акустичний датчик; MF – медіанний фільтр; BF_k – смугові фільтри, де k – кількість смугових фільтрів; f_{shot} – блок характеристичних частот пострілів; DEC – декодер; $\&$ – логічний елемент «Кон'юнкція»

Реальний аналоговий акустичний сигнал від пострілу вогнепальної зброї надходить до акустичного датчика у вигляді: $S(t) = A(t) + n(t)$, де $A(t)$ –

прийнятий корисний акустичний сигнал від пострілу вогнепальної зброї, $n(t)$ – прийнятий шум. Цей сигнал проходить попередню обробку шляхом фільтрації шуму $n(t)$ за допомогою фільтра MF.

Виділення характеристичних частот (f_i , де $i=1, \dots, k$) прийнятого корисного акустичного сигналу $A(t)$ здійснюється шляхом використання смугових фільтрів BF_k . Набір частот f_i формується з експериментальних даних для кожного типу вогнепальної зброї шляхом визначення спектральних гармонік з максимальними значеннями амплітуд (за умов максимальної енергії спектра). Результати аналізу експериментальних даних формують базу даних – блок характеристичних частот пострілів (f_{shot}), які є специфічними для конкретної зброї і дозволяють ідентифікувати її тип. Блок кодування (*CODE*) переводить сигнали на частотах f_i у двійковий код, з кількістю розрядів k . Результати кодування сигналів пострілів із пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» 9 мм та автомата АК-74 калібру 5.45 мм подано у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Комбінації двійкового коду відповідно до характеристичних частот спектрів пострілів досліджуваних зразків вогнепальної зброї

Вид зброї	Канал	Резонансна частота смугового фільтра, кГц																	
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	f_{17}	f_{18}
		0.6	0.8	1.3	1.5	1.7	2.3	2.8	3.0	3.6	4.0	4.5	6.0	7.7	8.4	8.9	11.6	12.3	13.6
		Двійковий код																	
ПМ 9 мм	А	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
АК-74 5.45 мм	В	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Форт-14Р	С	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0

Процес ідентифікації вогнепальної зброї базується на аналізі 18-розрядного коду за 6 групами по 3 розрядів (рис. 3.29), шляхом застосування декодерів (*DEC*)

та логічних елементів «Кон'юнкція». Залежно від результатів аналізу, в каналах *A*, *B* та *C* з'являється відповідна комбінація сигналів, що відображає особливості зафіксованого пострілу. У разі відсутності в цих каналах сигналів на рівні логічної «1» в каналі *D* з'являється сигнал, який свідчить, що прийнятий акустичний сигнал не відповідає відомим зразкам вогнепальної зброї. Таким чином, підхід дає можливість розробити засіб автоматичного визначення типу вогнепальної зброї, функціонування якого спирається на кодування гармонік прийнятого акустичного сигналу на характеристичних частотах та порівняння отриманих результатів із базою даних двійкових кодів для різних видів зброї.

Перспективою реалізації представленого у роботі підходу є розробка, на його основі, геоінформаційної системи акустичного моніторингу НС терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різних типів вогнепальної зброї. Для цього передбачається виконання таких процедур: 1) розміщення по території міста наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору; 2) збір та систематизація інформації про стан акустичного простору міста; 3) ідентифікація фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу; 4) моделювання розвитку НС терористичного характеру на території міста; 5) розробка та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС терористичного характеру на території міста, а також мінімізації їх наслідків.

Таким чином, за результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї, удосконалено метод ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів. Застосування удосконаленого методу для дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» та автомата АК-74 калібру 5,45 мм дозволило з ймовірністю 95 % ідентифікувати тип вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом. Розроблено функціональну схему

ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу.

3.3 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати сьогодні становлять одну з найбільш динамічно розвинутих категорій засобів повітряної мобільності та дистанційного спостереження. Вони визначають нові підходи до ведення розвідувальних, інформаційно-аналітичних та бойових операцій, а також набули значного поширення у цивільних сферах – від моніторингу інфраструктури до картографування та рятувальних робіт. БПЛА являють собою повітряні платформи, здатні виконувати польоти без екіпажу на борту, керовані дистанційно або функціонуючі автономно на основі програмних алгоритмів.

За даними джерел [182–193] типовий комплекс БПЛА включає літальний апарат, наземну станцію керування, засоби телеметричного та радіозв'язку, навігаційні системи та корисне навантаження. Структурні елементи інтегруються в єдину систему, що забезпечує збір, обробку та передачу інформації, а також виконання спеціалізованих завдань: розвідувальних, ударних, комунікаційних чи радіоелектронних.

Корисне навантаження БПЛА може включати електрооптичні та інфрачервоні камери (EO/IR), радіолокаційні станції, засоби радіоелектронної боротьби, лазерні далекоміри, ретранслятори зв'язку, а також бойові уражальні елементи. Набір корисного навантаження визначає призначення БПЛА та сферу його застосування.

Класифікацію БПЛА з орієнтовними технічними параметрами подано у табл. 3.11. Так, у міжнародній практиці виділяють чотири основні категорії: надлегкі БПЛА (масою до 2 кг), легкі (2–25 кг), середні (25–150 кг) та важкі (понад 150 кг). Класифікація за масою визначає можливості щодо тривалості польоту, висоти, дальності застосування та величини корисного навантаження.

Таблиця 3.11 – Класифікація БПЛА за розмірами / призначенням та типові технічні характеристики

Клас / тип	Маса (орієнтовно)	Тривалість польоту	Радіус дії / дальність	Тип корисного навантаження	Типове призначення
Мікро (micro UAS)	< 2 кг	5–60 хв	до кількох км	мікрокамери, датчики	близькодія, інспекції, HLS
Малі / міні (mini UAS)	2–25 кг	0.5–3 год	десятки км	камери HD, ІЧ, мала корисна вага	розвідка, інспекції, навчання
Тактичні (tactical)	25–150 кг	3–24 год	десятки – сотні км	ЕО/IR, РЛС, вантажі до сотень кг	тактична розвідка, цільова адреса (або цільова область / цільовий об'єкт), підтримка підрозділів
MALE (Medium Altitude, Long Endurance)	150–1 500 кг	десятки годин	сотні км	РЛС, великі сенсори, корисні вантажі	стратегічна/оперативна розвідка
HALE / стратегічні	> 1 500 кг	доби	сотні – тисячі км	великі РЛС, ELINT, озброєння	стратегічна розвідка, довготривалі патрулі
Літаки (fixed-wing)	різна	від хвилин до діб	короткі – дуже великі	ефективні для аерофотозйомки / вантажу	дальня розвідка, доставка
Роторні / мультикоптери	малий – середній	10–120 хв	до десятків км (лінійна)	ЕО/IR, вантажі малої маси	огляд периметрів, інспекції, доставка на короткі дистанції
Гібридні (VTOL)	малий – середній	0.5–10 год	десятки – сотні км	комбіновані сенсори	операції в обмеженому просторі + дальність
Loitering munitions / ударні дрони	малий – середній	10 хв – кілька год	десятки – сотні км	боєприпаси / камера	штурмові / ударні місії

БПЛА умовно поділяють на апарати надкороткого радіуса дії (до 5 км), короткого (5–25 км), середнього (25–150 км) та великого радіуса дії (150–1000 км і більше). Дальність польоту визначає тактичну роль дрона: від тактичних розвідників та FPV-апаратів до оперативно-тактичних і стратегічних платформ.

Тривалість польоту коливається від кількох десятків хвилин (для дронів-камікадзе та FPV) до 24 і більше годин для апаратів класу MALE та HALE. Висока тривалість польоту забезпечує можливість тривалого спостереження, моніторингу та виконання стратегічних завдань.

За типом аеродинамічної схеми найпоширенішими є мультикоптери (квадро-, гекса- і октокоптери), апарати літакового типу, «літаючі крила» та апарати комбінованих схем (конвертоплани). Кожна схема має власні переваги: мультикоптери забезпечують високу керованість та вертикальний зліт, тоді як апарати літакового типу характеризуються більшим часом польоту та економічністю.

За функціональним призначенням БПЛА поділяють на розвідувальні, ударні, баражуючі боєприпаси (loitering munitions), апарати радіоелектронної боротьби, ретранслятори, логістичні та спеціалізовані цивільні. Військові апарати забезпечують розвідку, цілевказання, коригування вогню, нанесення ударів, радіоелектронне придушення та збір розвідувальної інформації (ISR).

Сучасні БПЛА виконують широкий спектр завдань, серед яких: ведення повітряної розвідки та спостереження у видимому та інфрачервоному діапазонах; коригування артилерійського вогню та цілевказання у режимі реального часу; нанесення високоточного ураження; забезпечення ретрансляції зв'язку для підрозділів; здійснення радіотехнічної розвідки та перехоплення сигналів; проведення радіоелектронної боротьби; моніторинг об'єктів інфраструктури та критично важливих систем; участь у пошуково-рятувальних операціях.

Основними перевагами БПЛА є відсутність ризику для особового складу, низька вартість експлуатації, висока мобільність, здатність працювати у

складних або небезпечних умовах та можливість розгортання у стислий термін. Додатково БПЛА забезпечують прихованість та значну точність збирання інформації. Разом із тим, дрони мають низку обмежень, серед яких залежність від каналів зв'язку та GPS-навігації, вразливість до засобів радіоелектронної боротьби, обмежений корисний вантаж, а також значну чутливість до погодних умов для апаратів легкого класу.

Головними тенденціями розвитку БПЛА є підвищення рівня автономності за рахунок застосування алгоритмів штучного інтелекту, формування роїв дронів, зменшення помітності, інтеграція супутникових систем зв'язку, а також розвиток багатоцільових мультиплатформ та модульних систем. Особливого значення набуває масове застосування маловартісних FPV-дронів та баражуючих боєприпасів, що суттєво змінюють характер сучасних військових операцій.

Широке поширення БПЛА створює новий спектр ризиків для ОКІ, які є ключовими для функціонування держави, економіки та безпеки населення. З огляду на мобільність, малопомітність, низьку вартість та можливість дистанційного керування, БПЛА стають інструментом, здатним завдати шкоди об'єктам енергетичного, транспортного, інформаційно-комунікаційного, оборонного та промислового секторів.

БПЛА можуть застосовуватися для прямого ураження інфраструктурних об'єктів шляхом доставки вибухових пристроїв, скидання боєприпасів або здійснення ударів у режимі «камікадзе». Такі атаки є особливо небезпечними для об'єктів енергетики, нафтогазового комплексу, систем водопостачання, транспортних вузлів та засобів зв'язку. Навіть малогабаритні апарати здатні спричинити пошкодження обладнання, руйнування елементів інфраструктури, зупинку технічних процесів та виникнення вторинних аварій.

БПЛА обладнуються високоточними електрооптичними, тепловізійними, інфрачервоними та радіолокаційними сенсорами, що дає можливість здійснювати детальне спостереження за ОКІ. Високоякісна розвідувальна інформація може використовуватись для планування диверсій, ракетних і

артилерійських ударів, а також для збору даних про переміщення, охорону та конфігурацію критичних об'єктів. Таким чином, БПЛА значно підвищують розвідувальні можливості противника.

Сучасні БПЛА можуть бути оснащені засобами радіоелектронної боротьби, здатними здійснювати придушення або перехоплення каналів зв'язку ОКІ, впливати на системи навігації, створювати перешкоди для радіорелейного та супутникового зв'язку. Окрему загрозу становлять дрони, інтегровані з кіберзасобами: вони можуть використовуватися для впровадження шкідливого програмного забезпечення через бездротові мережі, зчитування даних або порушення роботи автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП).

Влучання БПЛА у технологічне обладнання, резервуари з паливом, трансформаторні підстанції або газові комунікації може викликати пожежі, вибухи, витік небезпечних речовин та інші НС техногенного характеру. Особливо вразливими є об'єкти хімічної промисловості, нафтобази, електростанції та об'єкти магістральної інфраструктури.

Навіть незначні за масштабом атаки БПЛА можуть створювати значні вторинні наслідки: тривалі перебої в роботі систем енергопостачання, зупинку критичного виробництва, порушення транспортних потоків, зниження обсягів надання медичних та комунальних послуг. Атаки на ОКІ здатні призвести до соціальної напруги, порушення безпеки населення та дестабілізації міст та регіонів. Регулярна присутність БПЛА у зоні розташування КІ створює додаткове психологічне навантаження на персонал та населення, підвищує рівень стресу, знижує ефективність роботи та може використовуватися як інструмент інформаційно-психологічного тиску.

Зростання кількості загроз для ОКІ, пов'язаних із використанням БПЛА, зумовлює необхідність комплексної трансформації системи їх безпеки. Традиційні системи охорони, що базуються на відеоспостереженні, фізичній охороні та класичних методах периметрового контролю, вже не забезпечують належного рівня захищеності в умовах поширення малорозмірних, маневрових

та малопомітних БПЛА. Фактичний розвиток засобів повітряної розвідки та атакувальних платформ на основі БПЛА диктує потребу у впровадженні інноваційних технологій моніторингу повітряного простору та автоматизованих систем оцінки загроз.

Удосконалення систем безпеки ОКІ відбувається у двох взаємопов'язаних напрямках: модернізація інженерно-технічної інфраструктури та розвиток інтелектуальних алгоритмів обробки даних. Перший напрям охоплює інтеграцію багатосенсорних платформ – радіолокаційних станцій малої дальності, тепловізійних камер, акустичних масивів, систем радіочастотної розвідки, а також оптико-електронних станцій з можливістю цілодобового спостереження. Другий напрям ґрунтується на застосуванні методів штучного інтелекту, машинного навчання, нечіткої логіки та когнітивного моделювання для підвищення точності виявлення, класифікації та прогнозування дій БПЛА у зоні відповідальності ОКІ.

Сучасні методи виявлення та ідентифікації БПЛА демонструють високий рівень технологічної диференціації й поділяються на чотири основні групи: радіочастотні, радіолокаційні, оптико-електронні та акустичні. Радіочастотні методи використовуються для перехоплення й аналізу сигналів управління або телеметрії БПЛА, що дає можливість встановити факт присутності апарата навіть без його візуального виявлення. Радіолокаційні технології забезпечують виявлення цілей у складних погодних умовах, однак потребують спеціальних алгоритмів фільтрації для відокремлення малорозмірних БПЛА від птахів чи сторонніх об'єктів. Оптико-електронні системи, оснащені алгоритмами комп'ютерного зору, забезпечують точну ідентифікацію типу БПЛА за його формою, тепловим контуром та особливостями поведінки. Акустичні комплекси визначають БПЛА за характером шуму його двигуна та гвинтової групи, що є особливо ефективним у міських умовах, де радіолокаційний контроль ускладнений наявністю великої кількості відбиттів.

Комплексне поєднання цих методів утворює багатоканальні системи виявлення, здатні забезпечувати стійкий контроль повітряного простору та

підвищувати точність ідентифікації. Важливою тенденцією розвитку є інтеграція даних від різнорідних сенсорів у єдиний інформаційно-аналітичний простір, що дає змогу реалізувати адаптивне управління загрозами, автоматизовану реакцію на інциденти та оперативне залучення засобів радіоелектронної протидії або фізичного перехоплення БПЛА.

Базуючись на цих уявленнях, авторами в основу розвитку методу автоматизованої ідентифікації різних типів БПЛА покладено особливості АЧХ акустичних сигналів при польоті БПЛА. Цей підхід дає можливість виділити ключові характеристики сигналу, що є унікальними для кожного типу БПЛА.

Запропонований у роботі [194] метод ідентифікації було реалізовано шляхом проведення експериментів із використанням різних типів БПЛА. Для цього акустичні дані реєструвалися за допомогою спеціально створеної та описаної у розділі 3.2 лабораторної установки (рис. 3.42 і 3.43).



Рисунок 3.42 – Схема лабораторної установки для аналізу АЧХ акустичних коливань процесу польоту різних типів БПЛА: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням

Під час експерименту було зібрано дані акустичних сигналів від трьох БПЛА (DJI Mavic 3t, FPV 7inch ProDrone та Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK) в різних умовах, як потенційно можливих, що здійснюють розвідувальні операції.

При цьому були враховані різні умови експерименту, такі як: зміна висоти польоту, швидкість, вплив зовнішніх факторів, таких як вітер і рівень фонових шумів. Отримані дані є інформацією для визначення алгоритмів автоматичного розпізнавання та моніторингу БПЛА у повітряному просторі держави.



Рисунок 3.43 – Фото, зроблене під час проведення експерименту щодо дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел НС, пов'язаних із застосуванням БПЛА

Кожен БПЛА має унікальні характеристики акустичних спектрів, які дозволяють розпізнавати його серед інших об'єктів. Отримання характеристик здійснюється шляхом обробки сигналу. Спочатку сигнал фільтрується для виділення корисного сигналу, після чого застосовується вікно Хеммінга для згладжування спектра. Далі сигнал очищається від шумів, що дає змогу відокремити характерні частоти, відповідні конкретному типу БПЛА. Подібний підхід було використано авторами в роботі [181] при ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів. Цей підхід також було використано при виявленні та класифікації БПЛА, АЧХ яких наведено на рис. 3.44–3.46.

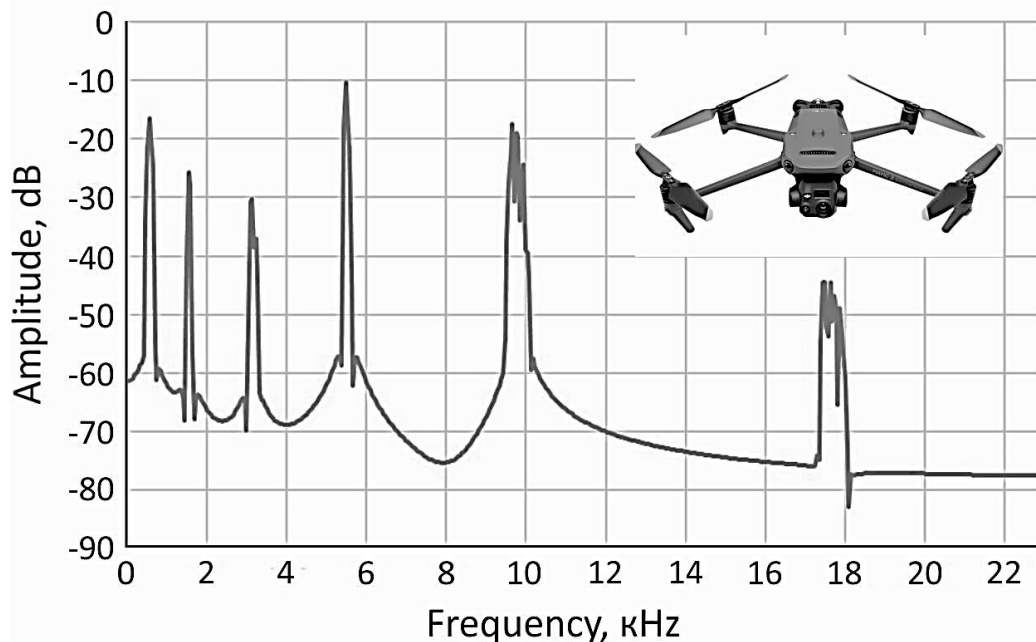


Рисунок 3.44 – Спектр акустичного сигналу польоту БПЛА типу DJI Mavic 3t

Зображені на рис. 3.44–3.46 спектральні характеристики вказують на їх унікальність та можливість розробки достовірного експрес-методу ідентифікації різних типів БПЛА за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів, які утворюються у процесі польотів дронів.

З метою визначення характеристичних частот акустичних сигналів від досліджуваних зразків БПЛА на рис. 3.47 подано сумарний графік АЧХ цих моделей БПЛА. На графіку відображено залежність амплітуди від частоти для

кожної моделі, що дає змогу оцінити їх унікальні акустичні характеристики. Також на графіку продемонстровано, як частотні характеристики різних моделей мають спільні характеристичні частотні діапазони. Це дозволяє їх ефективно ідентифікувати та класифікувати за унікальними спектральними ознаками. Використання таких даних може бути важливим для завдань ідентифікації БПЛА в реальних умовах.

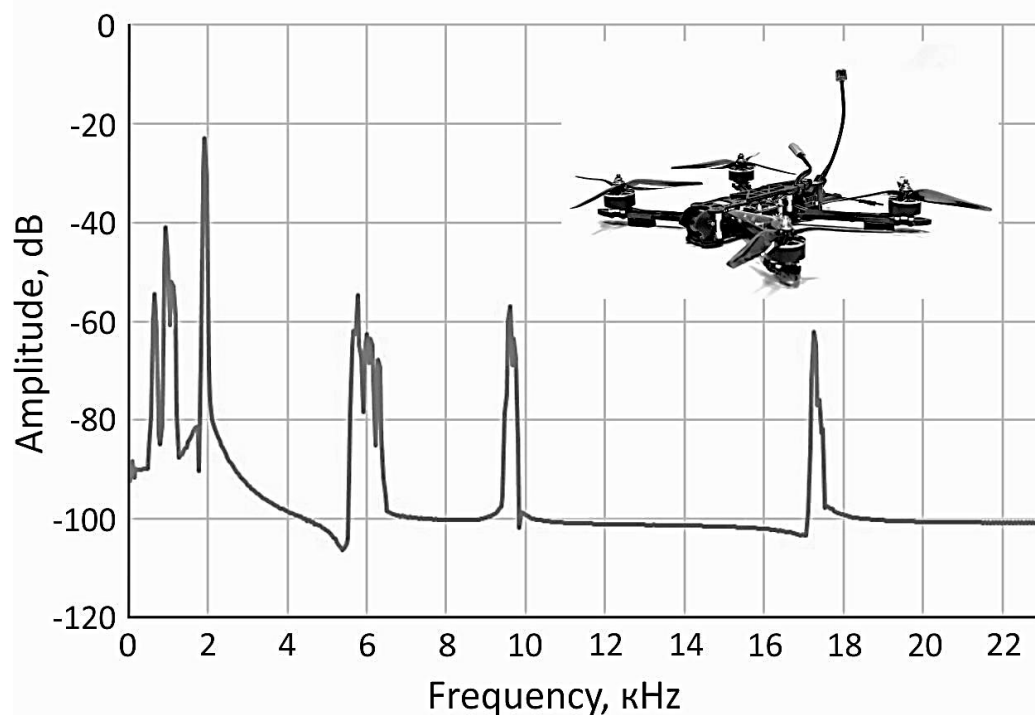


Рисунок 3.45 – Спектр акустичного сигналу польоту БПЛА типу FPV 7inch ProDrone

Метод визначення характерних частот акустичного сигналу базується на застосуванні кластерного аналізу. Його сутність полягає у знаходженні груп схожих частотних характеристик сигналу у вибірці даних для різних типів БПЛА, так званих кластерів, які характеризуються наступними основними властивостями: щільність, дисперсія, розмір, форма та віддільність. Під щільністю мається на увазі властивість, яка дозволяє визначити кластер як скупчення точок у просторі даних, відносно щільне у порівнянні з іншими областями простору, що містять або малу кількість точок, або не містять їх взагалі. Дисперсія характеризує міру розсіювання точок у просторі відносно центра кластера. Розмір кластера тісно пов'язаний з дисперсією. Форма кластера

визначається положенням точок у просторі. При зображенні кластерів у вигляді різних форм виникає необхідність визначення «зв'язаності» точок у кластері у вигляді відносної міри відстані між ними. Міри відстані зазвичай не обмежені зверху та залежать від вибору шкали (масштабу) вимірів. Віддільність характеризує міру перекриття кластерів і наскільки далеко один від одного вони розташовані у просторі. При визначенні міри відстані однією з найбільш відомих відстаней є евклідова відстань.

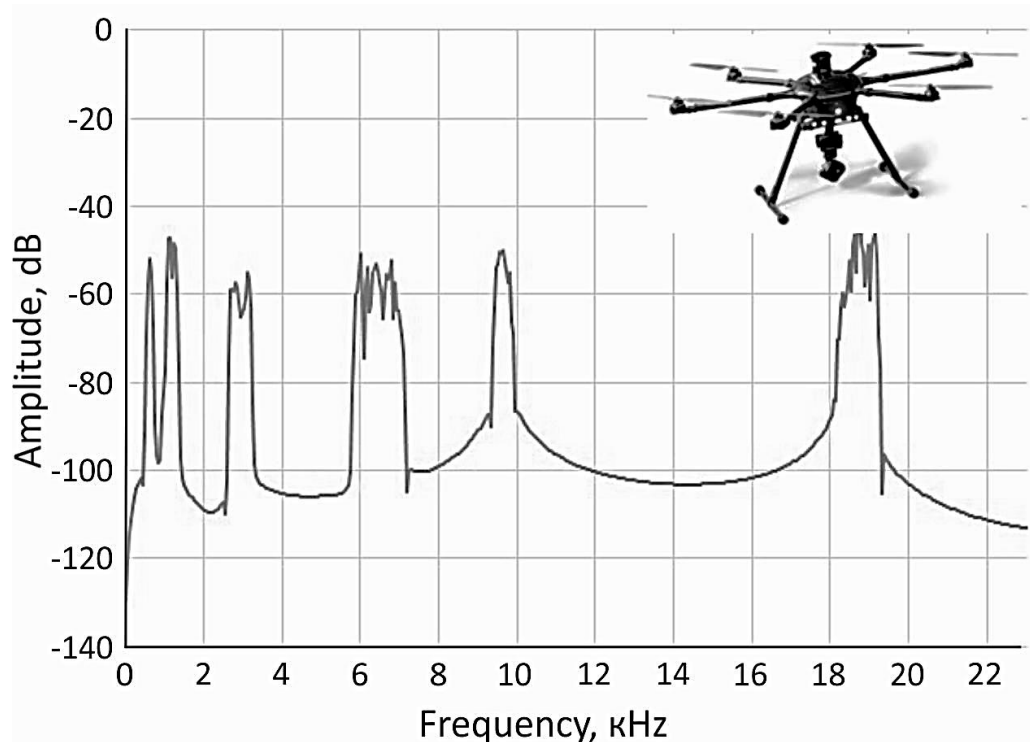


Рисунок 3.46 – Спектр акустичного сигналу польоту БПЛА типу Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK

Відомі методи кластерного аналізу можна розподілити на дві групи – ієрархічні та неієрархічні методи. Суть ієрархічної кластеризації полягає у послідовному об'єднанні менших кластерів у великі, так звані агломеративні методи, або в розділенні великих кластерів на менші, так звані дивізімні методи.

Використання методу Варда як одного з широко використовуваних агломеративних методів, при ієрархічній кластеризації основних гармонік спектрів акустичних сигналів, які є найбільш характерними для різних типів БПЛА, дозволило нам виділити унікальні акустичні особливості кожного БПЛА.

Перевага методу Варда полягає в тому, що він відрізняється від усіх інших агломеративних методів, оскільки використовує методи дисперсійного аналізу для оцінки відстані між кластерами. Метод мінімізує суму квадратів дисперсії для кластерів, які можуть бути сформовані на кожному кроці.

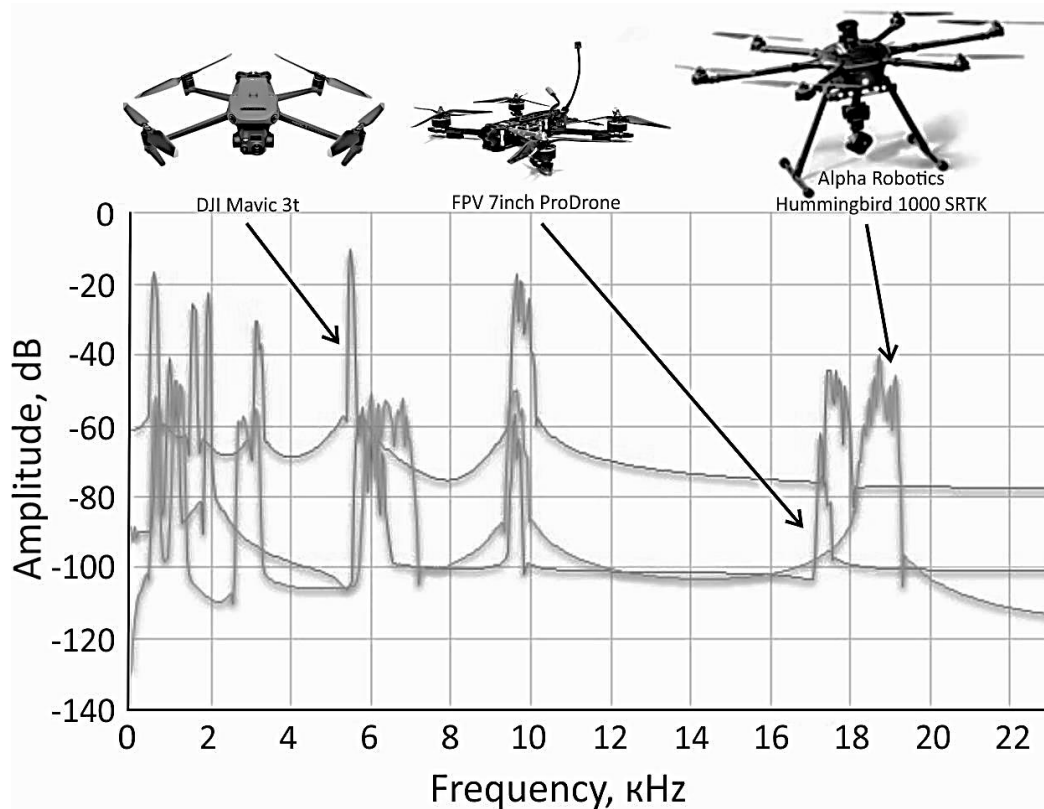


Рисунок 3.47 – Спектри акустичних сигналів польотів трьох БПЛА: DJI Mavic 3t; FPV 7inch ProDrone; Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK

Аналіз даних був виконаний з використанням програмного забезпечення *ORANGE DATA MINING*, що забезпечує візуалізацію та класифікацію великих обсягів даних. Аналіз вибірок включав по 512 точок АЧХ акустичних сигналів від кожного БПЛА. Результати кластеризації частотних гармонік за амплітудою зображено у вигляді дендрограми на рис. 3.47.

Подані на рис. 3.48 результати кластеризації дали змогу на рівні 20 одиниць евклідової відстані об'єднати гармоніки АЧХ акустичних сигналів польотів досліджуваних БПЛА у чотири кластери. До першого кластера увійшли гармоніки з однаковими рівнями амплітуд, які є характерними для усіх трьох БПЛА. Контроль складових цього кластера дозволить ідентифікувати факт появи

в зоні, що потребує захисту, БПЛА. До другого, третього та четвертого кластерів увійшли гармоніки, які є індивідуальними для кожного типу БПЛА. Так, до другого кластера увійшли гармоніки, які є характерними для АЧХ акустичних сигналів польоту БПЛА типу DJI Mavic 3t. До третього кластера увійшли гармоніки, які є характерними для АЧХ акустичних сигналів польоту БПЛА типу FPV 7inch ProDrone. До четвертого кластера увійшли гармоніки, які є характерними для АЧХ акустичних сигналів польоту БПЛА типу Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK. Контроль складових другого, третього та четвертого кластерів дасть можливість ідентифікувати тип БПЛА, що з'явився в зоні, що потребує захисту.

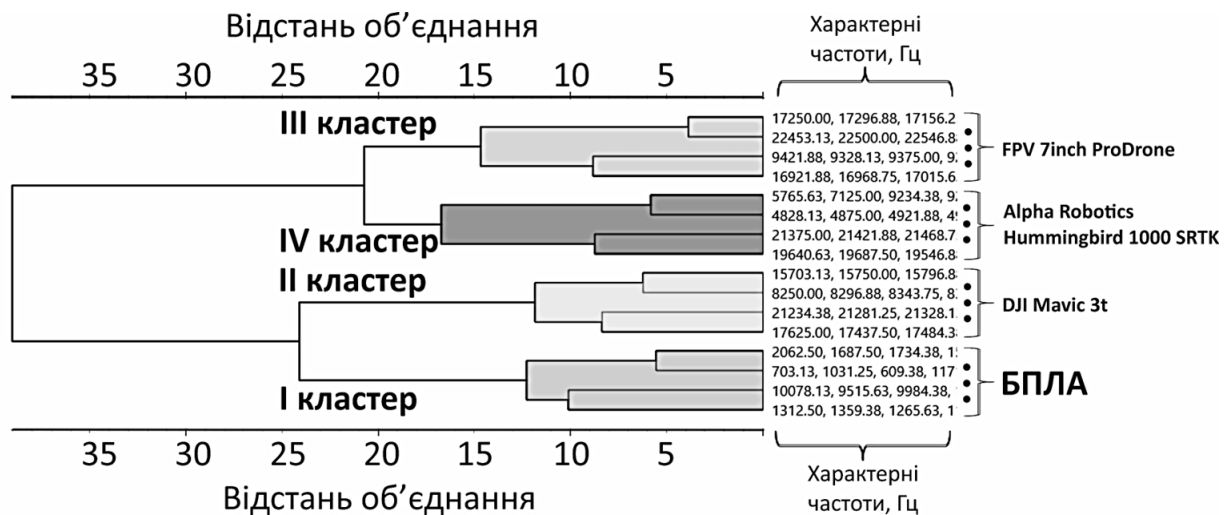


Рисунок 3.48 – Дендрограма кластеризації гармонік АЧХ акустичних сигналів польотів досліджуваних БПЛА

За результатами кластерного аналізу розроблено керуючий алгоритм удосконаленого методу виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів БПЛА. Схема подана на рис. 3.49.

Описаний алгоритм передбачає виконання наступних процедур:

- 1) моніторинг акустичного простору зони, що потребує захисту, за допомогою системи наземних автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек;
- 2) фільтрація шумів та посилення «корисного» сигналу;
- 3) частотний аналіз «корисного» сигналу;
- 4) виявлення БПЛА шляхом порівняння гармонік АЧХ прийнятого сигналу зі складовими I кластера. Залежно

від кількості збігів визначається ймовірність виявлення/невиявлення БПЛА;

5) ідентифікація виявленого БПЛА шляхом одночасного порівняння гармонік АЧХ прийнятого сигналу із складовими II, III та IV кластерів. Залежно від кількості збігів визначається ймовірність ідентифікації/неідентифікації БПЛА;

6) розробка, за результатами виявлення інциденту застосування БПЛА та ідентифікації його типу, пропозицій для прийняття антикризових рішень, спрямованих встановлення режимів функціонування ЄДСЦЗ та виконання її складовими задач за призначенням, спрямованих на запобігання виникненню НС або її ліквідацію та мінімізацію наслідків.

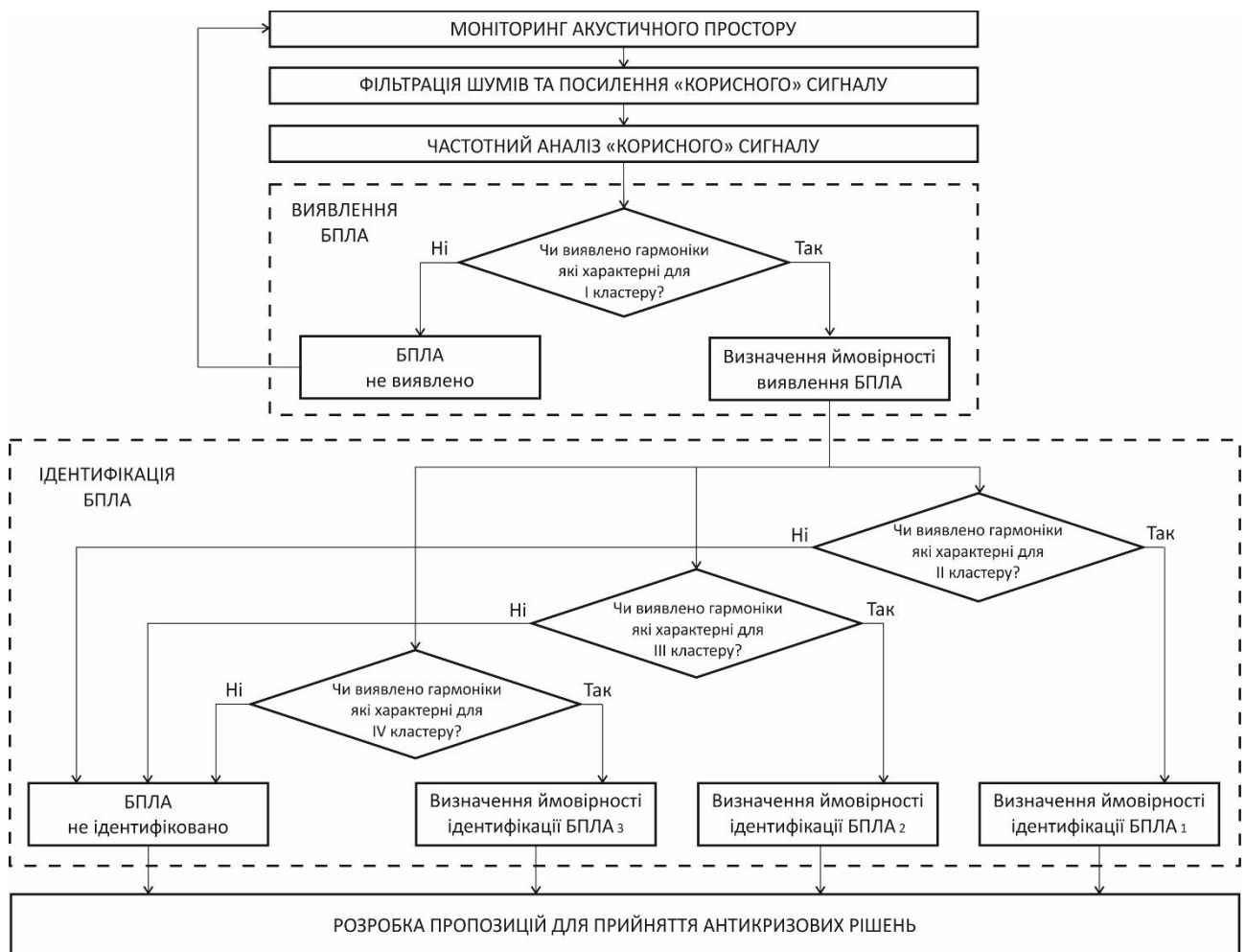


Рисунок 3.49 – Алгоритм виявлення та ідентифікації за АЧХ акустичних сигналів БПЛА

Для реалізації поданого на рис. 3.49 алгоритму виявлення та ідентифікації за АЧХ акустичних сигналів БПЛА застосовано метод вейвлет-аналізу для

проведення частотного аналізу «корисного» сигналу. Цей метод дозволяє отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектра для різних моделей БПЛА. Перехід до вейвлет-перетворення пов'язаний з тим, що час для аналізу акустичних сигналів від БПЛА є значно довшим порівняно з тривалістю звуків пострілів, що забезпечує більш детальну та якісну обробку даних.

Тому в основу автоматичного виявлення БПЛА та визначення їх типів у роботі покладено аналіз частотно-часових характеристик акустичних сигналів від БПЛА, що дає змогу ідентифікувати літальні апарати в реальних умовах та сприяє підвищенню ефективності систем моніторингу інцидентів із застосуванням БПЛА як джерел масштабних НС.

У практичному застосуванні виділено дві основні переваги вейвлетів для аналізу сигналів від різних моделей БПЛА, а саме високі часову і частотну роздільні здатності. Математично це можна виразити як:

$$C_x = (a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3.5)$$

де $C_x = (a, b)$ – материнський (вихідний) вейвлет; $x(t)$ – вхідний акустичний сигнал від БПЛА; $\psi(t)$ – материнська вейвлет-функція (частіше використовують Морле або Мексиканську шляпку); a – масштаб, пов'язаний з частотою (чим більшим є масштаб, тим нижчою є частота); b – параметр зсуву в часі.

Однією з ключових умов забезпечення відповідної достовірності ідентифікації БПЛА є раціональний час аналізу вхідного акустичного сигналу. Після проведення авторами численних досліджень із використанням різних типів БПЛА раціональний час для ідентифікації був визначений на рівні 15 с. Протягом цього інтервалу літальний апарат зазвичай виконує одну чи кілька характерних дій (наприклад, маневрує, змінює швидкість, курс або висоту). У бойовому режимі час ідентифікації може змінюватися залежно від активності

апарата, тоді як у розвідувальному режимі, за умов стабільного положення, після певного періоду часу відбувається корекція його розташування у просторі, і він переходить до роботи зі збільшеною потужністю.

Як приклад, на рис. 3.50 наведено відклики на акустичному спектрі БПЛА типу FPV 7inch ProDrone. У зазначеному діапазоні виділяються середні значення з максимальними амплітудами частот: $f_1 = 0,65$ кГц; $f_2 = 2,5$ кГц; $f_3 = 6$ кГц; $f_4 = 10$ кГц та $f_5 = 17$ кГц. Якщо амплітуда в цих діапазонах частот перевищує задане значення ($Magnitude_1 = 1$), запускається операція підрахунку відліків протягом 15 с з їх накопиченням.

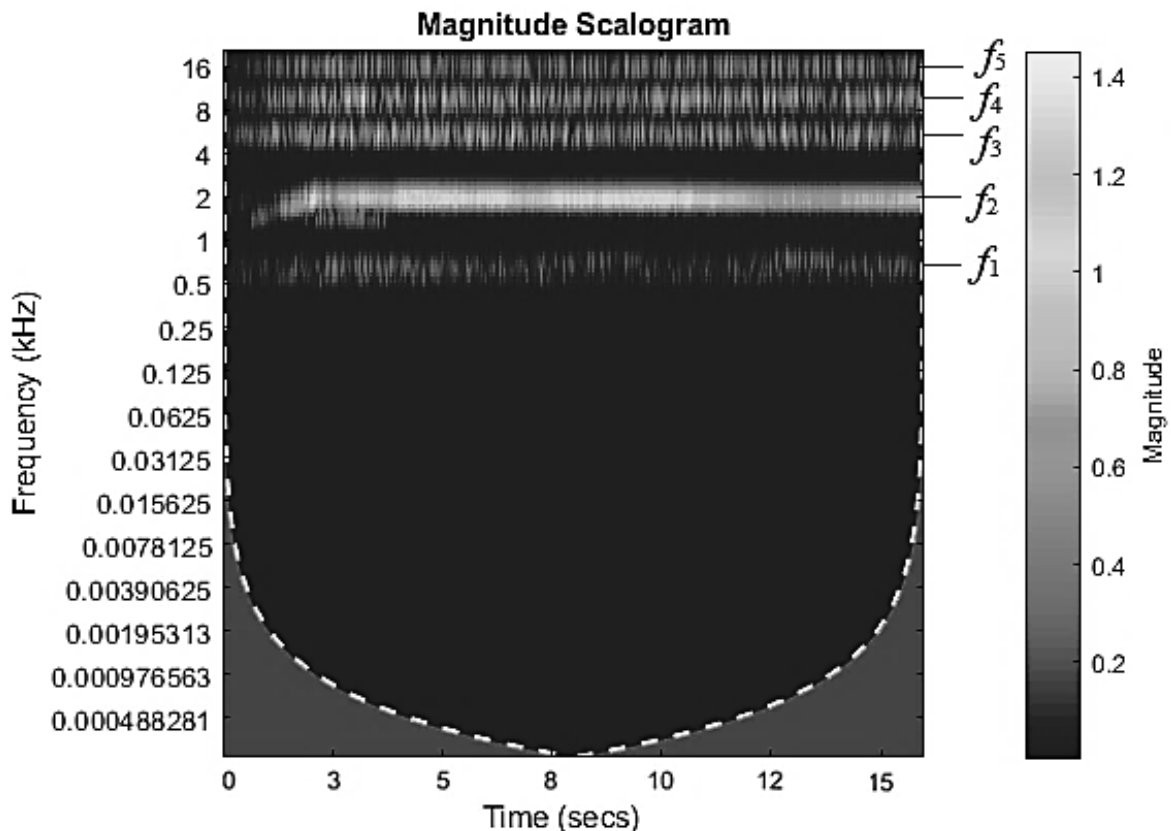


Рисунок 3.50 – Скалограма частотно-часової характеристики акустичного сигналу безпілотного літального апарата типу FPV 7inch ProDrone

Для ефективної реалізації процедури виявлення та ідентифікації за АЧХ акустичних сигналів БПЛА, шляхом застосування метод вейвлет-аналізу для проведення частотного аналізу «корисного» сигналу, повинні виконуватися такі умови:

1) якщо відліки характерних частот акустичного сигналу повторюються протягом 15 с більше 200 разів, то з імовірністю 90 % можна стверджувати, що ця частота належить сигналу відповідного БПЛА;

2) якщо відліки характерних частот акустичного сигналу повторюються протягом 15 с менше 200 разів, то процедура автоматично повертається до моніторингу акустичного простору.

Таким чином, за результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних із застосуванням БПЛА, удосконалено метод автоматичного виявлення БПЛА та визначення їх типів на основі акустичних сигналів, який поєднує кластерний аналіз і вейвлет-аналіз. Застосування удосконаленого методу для трьох експериментальних моделей БПЛА – Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK, DJI Mavic 3t та FPV 7inch ProDrone – дало змогу з імовірністю до 90 % точно ідентифікувати тип БПЛА за їх акустичним сигналом. Розроблено алгоритм виявлення та ідентифікації за АЧХ акустичних сигналів БПЛА, який базується на методі вейвлет-аналізу. Цей метод дає можливість отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектра БПЛА.

Висновки по розділу 3

1. За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо виявлення та ідентифікації джерел НС, пов'язаних із масштабними пожежами целюлозовмісних матеріалів, показано необхідність технічної реалізації пристроїв контролю за територією міста на нових фізико-технічних методах аналізу властивостей середовища загоряння, спрямованих на практично миттєвий контроль хвильових факторів небезпеки на етапі зародження та прояву джерел загорянь. Запропоновано контроль джерела загоряння проводити за спектральними характеристиками акустичних коливань, що генеруються

джерелом загоряння в результаті прояву ефекту АЕ при протіканні окисно-відновної реакції горіння різних (твердих, рідких та газоподібних) речовин і матеріалів.

Прикладними результатами проведених досліджень є такі: а) розроблено та створено установку для вимірювання спектрів акустичної емісії з високою чутливістю, для широкого частотного діапазону (5Гц–25кГц); б) розроблено комплексну методику та алгоритм фільтрації спектра фону із загальної акустичної спектрограми для визначення характеристичних гармонік прояви реакції горіння; в) показано стійку залежність АЧХ акустичної емісії процесу горіння від природи і хімічного складу целюлозовмісних матеріалів; г) виконані дослідження особливостей процесу горіння різних целюлозовмісних матеріалів методом АЕ однозначно вказують на високу ефективність виявлення джерел НС, пов'язаних із масштабними пожежами.

2. За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних із масштабними пожежами рідких органічних речовин, встановлено, що динаміка процесу високотемпературного окиснення (горіння), тобто залежності кількості максимумів амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу при ефекті АЕ, визначається фізичними та фізико-хімічними термодинамічними параметрами процесу.

Досліджено ефект «спалаху», тобто час первинного процесу горіння парів РОР, та встановлено однозначну залежність тривалості зазначеного процесу від парціального тиску парів над чистим розчинником та температурою спалаху або займання. Встановлено, що чим більше парціальний тиск парів і менше температура спалаху (займання), тим менше час «спалаху», тобто тривалість горіння парів органічних речовин.

Встановлено, що незалежно від природи досліджених органічних речовин значення показників Херста і фрактальної розмірності залишаються постійними для дослідженого ряду легкозаймистих рідин. При цьому встановлено тенденцію

підвищення показника Херста і відповідно зниження показника фрактальної розмірності для ізомерів спиртів. Практична сталість параметрів Херста і фрактальної розмірності для органічних речовин із лінійною та ізомерною структурою *C* –каркасів молекул органічних речовин свідчить про відповідний рівень достовірності та надійності отриманих результатів щодо обробки акустичних сигналів при ефекті АЕ реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких органічних речовин, що дає можливість зменшити ступінь помилкових спрацьовувань акустичного пристрою виявлення на території міста джерел масштабних пожеж та встановлення природи пального матеріалу в осередку займання.

3. За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї, удосконалено метод ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів. Застосування удосконаленого методу для дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» та автомата АК-74 калібру 5,45 мм дозволило з імовірністю 95 % ідентифікувати тип вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом. Розроблено функціональну схему ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу.

4. За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних із застосуванням БПЛА, удосконалено метод автоматичного виявлення БПЛА та визначення їх типів на основі акустичних сигналів, який поєднує кластерний аналіз і вейвлет-аналіз. Застосування удосконаленого методу для трьох експериментальних моделей БПЛА – Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK, DJI Mavic 3t та FPV 7inch ProDrone – дало змогу з імовірністю до 90 % точно ідентифікувати тип БПЛА за їх акустичним сигналом. Розроблено алгоритм виявлення та ідентифікації за

АЧХ акустичних сигналів БПЛА, який базується на методі вейвлет-аналізу. Цей метод дає можливість отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектра БПЛА.

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ «SMART CITY» ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МІСЦЕВОГО РІВНЯ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ

4.1 Когнітивне моделювання особливостей функціонування критичної інфраструктури в умовах загроз та оцінка ефективності акустичного моніторингу для запобігання надзвичайним ситуаціям місцевого рівня

4.1.1 Аналіз причинно-наслідкових взаємозв'язків між елементами функціональної системи гіпотетичного об'єкта критичної інфраструктури

Захищеність державного суверенітету, територіальної цілісності, демократичного конституційного ладу та інших національних інтересів України від реальних та потенційних загроз є важливою задачею в умовах нерівномірного розподілу по території держави КІ, з низкою життєвоважливих функцій та/або послуг, порушення яких призводить до негативних наслідків для національної безпеки України, зокрема: урядування та надання найважливіших публічних (адміністративних) послуг; енергозабезпечення (у тому числі постачання теплової енергії); водопостачання та водовідведення; продовольче забезпечення; охорона здоров'я; фармацевтична промисловість; виготовлення вакцин, сталі функціонування біолабораторій; інформаційні послуги; електронні комунікації; фінансові послуги; транспортне забезпечення; оборона, державна безпека; правопорядок, здійснення правосуддя, тримання під вартою; цивільний захист населення та територій, служби порятунку; космічна діяльність, космічні технології та послуги; хімічна промисловість; дослідницька діяльність [67–70]. Класифікацію ОКІ та характеристик небезпек для цих об'єктів наведено в табл. 4.1 і 4.2.

Захист КІ як одна зі складових національної безпеки України включає види діяльності, що виконуються перед або під час створення, функціонування, відновлення і реорганізації ОКІ, а також спрямовані на своєчасне виявлення, запобігання і нейтралізацію загроз безпеці цих об'єктів, а також мінімізацію та ліквідацію наслідків у разі їх реалізації [195–198].

Таблиця 4.1 – Класифікація об'єктів критичної інфраструктури

Галузь (сектор)	Типові об'єкти	Основні функції	Можливі наслідки порушення функціонування
Енергетика	АЕС, ТЕС, ГЕС, підстанції, електромережі, об'єкти нафтогазової інфраструктури, трубопроводи	забезпечення населення та економіки енергією, газом, паливом	зупинка промисловості, порушення енергопостачання, дестабілізація економіки та обороноздатності
Транспорт і логістика	залізничні вузли, аеропорти, морські та річкові порти, автошляхи, мости, метрополітен	забезпечення перевезення людей, вантажів і військової логістики	переривання постачань, ізоляція регіонів, зниження мобільності військових і цивільних
Інформаційно-комунікаційна інфраструктура	центри обробки даних, мережі зв'язку, інтернет-канали, телекомунікаційні вузли, системи супутникового зв'язку	забезпечення інформаційного обміну, управління, зв'язку	порушення комунікацій, неможливість координації дій, втрата управління
Фінансово-економічна система	банківські установи, платіжні системи, фондові біржі, податкові сервіси	забезпечення фінансових операцій, обігу коштів, стабільності економіки	економічний колапс, зупинка розрахунків, зниження довіри до державних інститутів
Водопостачання та водовідведення	насосні станції, водогони, очисні споруди, резервуари	забезпечення населення питною водою, санітарна безпека	відсутність води, санітарно-епідемічна небезпека, загроза життю населення
Охорона здоров'я	лікарні, центри екстреної допомоги, системи постачання медичних засобів, лабораторії	надання медичної допомоги, реагування на надзвичайні ситуації	зростання смертності, неможливість лікування поранених, епідемії

Продовження таблиці 4.1

Галузь (сектор)	Типові об'єкти	Основні функції	Можливі наслідки порушення функціонування
Харчова безпека та аграрний сектор	склади продовольства, елеватори, підприємства харчової промисловості, аграрна техніка	забезпечення населення продовольством	дефіцит продуктів, голод, соціальна напруга
Житлово-комунальне господарство	системи теплопостачання, газопостачання, каналізаційні мережі, об'єкти ЖКГ	підтримання життєдіяльності населення	масові перебої в теплі, воді, електриці, гуманітарна криза
Оборонно-промисловий комплекс	військові підприємства, арсенали, склади боєприпасів, ремонтні бази	виробництво, зберігання і ремонт озброєння та техніки	зниження обороноздатності, втрати техніки, витік секретної інформації
Державне управління	органи державної влади, центри прийняття рішень, системи управління надзвичайними ситуаціями	координація дій у кризових ситуаціях, підтримання порядку	параліч управління державою, дестабілізація політичної системи
Екологічна інфраструктура	очисні споруди, утилізаційні комплекси, системи моніторингу довкілля	контроль стану навколишнього середовища, запобігання екологічним катастрофам	забруднення довкілля, екологічна криза, шкода здоров'ю населення

Таблиця 4.2 – Характеристика небезпек для об'єктів критичної інфраструктури

Тип небезпеки	Джерело (внутрішня / зовнішня)	Опис	Характерні прояви	Наслідки для об'єктів критичної інфраструктури
Природні	зовнішня	зумовлені природними процесами або стихійними явищами, що не контролюються людиною	землетруси, зсуви, повені, буревії, пожежі природного походження тощо	руйнування конструкцій, втрата енергопостачання, порушення транспортних і комунікаційних мереж
Техногенні	внутрішня / зовнішня	виникають унаслідок збоїв у роботі обладнання, технологічних процесів, або аварій на суміжних об'єктах	вибухи, витoki небезпечних речовин, пожежі, аварії на енергетичних або хімічних підприємствах	зупинка технологічних процесів, екологічне забруднення, загибель персоналу, руйнування споруд
Організаційно-управлінські (внутрішні)	внутрішня	пов'язані з людським фактором, неефективним управлінням чи порушеннями регламентів безпеки	помилки персоналу, низька кваліфікація, відсутність контролю, недотримання процедур	порушення функціонування систем, збільшення ризику аварій і втрат
Соціальні	внутрішня / зовнішня	виникають унаслідок протиправних дій окремих осіб або груп	терористичні акти, саботаж, масові заворушення, злочинні посягання	пошкодження обладнання, людські втрати, дестабілізація ситуації, паніка
Військові	зовнішня	викликані застосуванням військової сили або засобів ураження противника	артилерійські, ракетні, авіаційні удари, атаки БПЛА, використання РЕБ	руйнування об'єктів, порушення управління, тривала зупинка критичних систем

Продовження таблиці 4.2

Тип небезпеки	Джерело (внутрішня / зовнішня)	Опис	Характерні прояви	Наслідки для об'єктів критичної інфраструктури
Кібернетичні	внутрішня / зовнішня	спрямовані на несанкціонований вплив на інформаційні системи або мережі керування	кібератаки, віруси, злом SCADA-систем, витік або блокування даних	зупинка автоматизованих систем, порушення керування, втрата даних і контролю
Економічні	внутрішня / зовнішня	впливають на стабільність фінансування, постачання ресурсів або логістику	інфляція, санкції, дефіцит палива, зрив поставок, відтік кадрів	порушення постачання ресурсів, зниження ефективності функціонування, ризик зупинки об'єктів
Екологічні	внутрішня / зовнішня	виникають унаслідок забруднення навколишнього середовища або змін клімату	забруднення повітря, води, ґрунтів, деградація екосистем	зниження стійкості інфраструктури, пошкодження систем водопостачання, загроза здоров'ю населення

Одним з актуальних напрямів підвищення ефективності забезпечення безпеки ОКІ є розробка адекватних моделей, спрямованих на підвищення ефективності прийнятих антикризових рішень в умовах багатокритеріальності й невизначеності при управлінні процесами запобігання виникненню НС на різного роду ОКІ [199, 200].

Для забезпечення ефективного функціонування ОКІ, безперебійної роботи кожного елемента технологічного процесу та успішного виконання всіх завдань необхідно приділити особливу увагу організації загальної безпеки об'єкта. КІ та її ресурси постійно перебувають під загрозою атак різного характеру: соціальних, техногенних, природних і воєнних. Такі атаки можуть спричинити серйозні наслідки, зокрема порушення роботи життєвоважливих компонентів об'єкта, загрозу життю та здоров'ю персоналу, несанкціонований доступ до інформаційних ресурсів, збоїв у технологічних процесах або навіть повне порушення роботи системи. Для запобігання подібним ризикам необхідно ретельно аналізувати вплив потенційних загроз, оцінювати міцність взаємозв'язків між компонентами системи та виділяти найбільш критичні з них.

Розв'язання цього завдання є можливим завдяки методам статистичного аналізу, таким як дисперсійний і кореляційно-регресійний аналіз. Однак їх застосування потребує значних обчислювальних ресурсів, наявності повної статистичної інформації та тривалого часу для обробки даних. У зв'язку з цим доцільно використовувати когнітивний підхід, який дає змогу вирішувати задачі зі складною або неповною формалізацією. Цей підхід сприяє візуалізації досліджуваної системи чи проблеми, роботі з нечіткою, неповною інформацією, а також врахуванню суб'єктивних експертних оцінок. Він дає змогу створювати гнучкі моделі, здатні адекватно реагувати на зміни та ефективно відображати реальну ситуацію [201, 202].

Враховуючи вищезазначені переваги когнітивного моделювання, проведемо на його основі дослідження функціонування гіпотетичного ОКІ та впливу загроз на рівень захищеності об'єкта. Схема взаємозв'язків між складовими функціонування ОКІ подана на рис. 4.1.

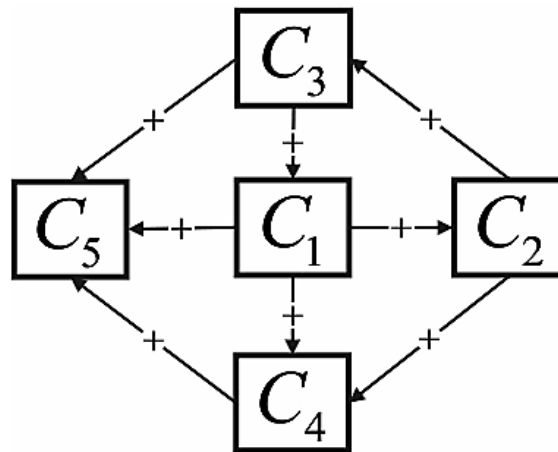


Рисунок 4.1 – Схема взаємозв'язків між складовими повсякденного функціонування гіпотетичного ОКІ

На основі проведеного в роботі опитування експертів було визначено пріоритетні концепти системи та ступінь впливу взаємозв'язків між ними в технологічному процесі. Цей процес ОКІ складається з таких елементів:

1) концепт C_1 – обладнання. Обладнання забезпечує завантаження виробничої потужності відносно максимального рівня. Це основа системи КІ, яка підтримує виконання ключових технологічних і виробничих процесів. Відсутність належного обладнання робить функціонування системи неможливим;

2) концепт C_2 – фінансування. Фінансування забезпечує можливість придбання ресурсів, підтримку обладнання та наймання персоналу. Це критичний елемент стабільного функціонування, що безпосередньо впливає на матеріальну базу об'єкта;

3) концепт C_3 – ресурси. До ресурсів належать паливо-мастильні матеріали, сировина, енергія та технології. Вони потрібні для обслуговування та безперервної роботи обладнання. Ефективність виробництва значною мірою залежить від наявності цих ресурсів;

4) концепт C_4 – персонал. Персонал є важливим елементом для виконання завдань об'єкта. Його чисельність і кваліфікація безпосередньо впливають на

підтримку працездатності обладнання та процесів. Помилки персоналу можуть вплинути на продуктивність та безпеку;

5) концепт C_5 – продукція. Продукція характеризується обсягом виробництва та випуском кінцевого продукту, наприклад, енергетичних ресурсів у випадку енергетичних об'єктів. Це кінцевий результат діяльності об'єкта, що має вирішальне значення для забезпечення потреб споживачів і стабільності системи.

ОКІ функціонує як збалансована система, де кожен компонент тісно пов'язаний з іншими. Для забезпечення стійкості функціонування ОКІ важливо підтримувати достатній рівень фінансування, якість ресурсів і кваліфікацію персоналу. Зміни або збої в одному з елементів можуть вплинути на всю систему, зокрема на можливість виробництва продукції. Такий підхід до опису системи дає змогу виявляти критичні точки, які потребують уваги для забезпечення безперебійного функціонування об'єкта. У дослідженні метод експертних оцінок був інтегрований із використанням нечітких когнітивних карт (НКК). Це дозволило врахувати не лише кількісні, але й якісні аспекти взаємозв'язків, які важко формалізувати традиційними математичними методами. Експертні дані було використано для побудови графічної моделі технологічного процесу, де вузли відображають концепти, а зв'язки між ними показують характер і силу взаємного впливу.

4.1.2 Когнітивне моделювання ефективності прийняття рішень із запобігання виникненню надзвичайної ситуації на об'єкті критичної інфраструктури

З метою виявлення загальних взаємозв'язків блоків технологічного процесу дослідимо умови функціонування ОКІ за допомогою методу НКК. Метод використання НКК будується на основі математичного апарату знакових та зважених графів, які дозволяють формалізувати взаємодію основних позитивних та негативних зворотних впливів, що існують між підсистемами. При побудові таких моделей можна використовувати неповну, нечітку і навіть суперечливу інформацію. Когнітивні карти дають можливість дати попередню

якісну оцінку наслідків прийнятих рішень. За допомогою когнітивних карт можна вибрати таку множину рішень, яка переведе систему у сприятливу ситуацію. У цьому під ситуацією розуміється безліч чинників зі змінними, які описують ступінь впливу чинників один на одного. Когнітивні карти дають загальну якісну картину розвитку НС як результат спільної взаємодії різних факторів (як внутрішніх, так і зовнішніх) на певному відрізку часу. При цьому самі фактори можуть змінюватись у часі. На основі когнітивних карток можна аналізувати та прогнозувати стратегію розвитку складних систем, виникнення кризових ситуацій.

Моделювання виконано з використанням програмного забезпечення *MENTAL MODELER*, яке реалізує методи когнітивного моделювання, базуючись на принципах когнітивних карт причинно-наслідкових взаємозв'язків. Основна ідея полягає у поданні системи як мережі концептів (елементів) і взаємозв'язків між ними, які можуть бути кількісно оцінені. Кожен концепт C_i має числове значення $A_i(t)$, яке визначає його стан у момент часу t . Значення змінюється в результаті впливу інших концептів:

$$A_i(t+1) = f\left(A_i(t) + \sum_{j=1}^n w_{ji} A_j(t)\right), \quad (4.1)$$

де $A_i(t)$ – значення i концепту в момент часу t ; $A_j(t)$ – значення j концепту в момент часу t ; w_{ji} – вага взаємозв'язку між j та i концептами (показує силу впливу від -1 до 1); $f(x)$ – функція активації (обмежує значення концепту в межах від -1 до 1).

В роботі застосовано причинно-наслідкову мережу ОКІ з відповідними значеннями ваги взаємозв'язків. Вага взаємозв'язків визначає тип і силу впливу одного концепту на інший: $w_{ji} > 0$ – позитивний вплив (зростання одного концепту призводить до збільшення іншого); $w_{ji} < 0$ – негативний вплив

(зростання одного концепту зменшує значення іншого); $w_{ji} = 0$ – відсутність впливу.

Сформований перелік концептів C_1-C_5 дає можливість оцінити силу взаємного впливу між кожною парою концептів шляхом аналізу даних, отриманих у результаті експертного опитування. Для цього використовують нечітку лінгвістичну шкалу, яка являє собою впорядковану множину лінгвістичних термінів, що відображають оцінки ймовірних наслідків впливу одного концепту на інший, а саме:

$$W_{ij} = \{ \text{не впливає, слабка, сильна} \}, \quad (4.2)$$

де W_{ij} – інтенсивність взаємодії.

Кожному з цих термінів відповідає певний числовий діапазон: значення з інтервалу $[0; 1]$ застосовуються для додатних взаємозв'язків, а значення з інтервалу $[-1; 0]$ – для від'ємних. Причому $W_{ij} = [0,7; 1,0]$ – позитивна сильна; $W_{ij} = [0,3; 0,7]$ – позитивна середня; $W_{ij} = [0; 0,3]$ – позитивна слабка; $w_{ij} = 0$ – не впливає; $W_{ij} = [0; -0,3]$ – негативна слабка; $W_{ij} = [-0,3; -0,7]$ – негативна середня; $W_{ij} = [-0,7; -1,0]$ – негативна сильна.

Загрози, що впливають на ОКІ, мають комплексний характер і охоплюють широкий спектр потенційних впливів. При одержанні інформації про можливе виникнення НС, управління об'єктом переводять ОКІ у режим аварійного стану, коли стан об'єкта вимагає вживання негайних заходів щодо недопущення виникнення аварійної чи НС. В умовах аварійного режиму роботи ОКІ враховуються зовнішні та внутрішні фактори, які відображені на концептуальній моделі на рис. 4.2 у вигляді зовнішніх стрілок [203].

У результаті проведення аналізу можливих загроз безпеці ОКІ було сформовано перелік зовнішніх та внутрішніх загроз $C_1^u - C_{11}^u$, а саме: C_1^u – фінансові загрози (макроекономічні чинники, такі як рівень інфляції в державі та

співвідношення заробітної плати до прожиткового мінімуму тощо); C_2^u – природні загрози (геофізичні, геологічні, метеорологічні та гідрологічні НС, а також ситуації, пов’язані з пожежами у природних екологічних системах та медико-біологічними факторами тощо); C_3^u – техногенні загрози (аварії та катастрофи на транспорті, витoki небезпечних хімічних або радіоактивних речовин, руйнування будівель і споруд, збій в електроенергетичних системах, аварії на очисних спорудах та в нафтогазовій промисловості тощо); C_4^u – соціальні загрози (акти насильства, захоплення ОКІ, терористичні акти, викрадення людей, а також захоплення заручників тощо); C_5^u – загрози застосування БПЛА (загрози, пов’язані з використанням БПЛА для розвідувальних цілей або проведення атак на ОКІ тощо); C_6^u – інформаційні загрози (витoki інформації, кібератаки та інші дії, пов’язані з порушенням інформаційної безпеки); C_7^u – неякісне виконання службових обов’язків (неефективне використання методів стимулювання праці персоналу, недбале виконання обов’язків тощо); C_8^u – порушення режимів технологічного процесу (зношеність або несправність обладнання, порушення режимів технологічного процесу та неефективне управління персоналом тощо); C_9^u – пожежні загрози (недотримання вимог пожежної безпеки, необережне поводження з вогнем, порушення правил монтажу та експлуатації обладнання, а також недосконалість систем пожежної сигналізації та пожежогасіння); C_{10}^u – загрози виробничого травматизму (неправильно організована праця, відсутність засобів захисту чи спеціального одягу, а також порушення трудової дисципліни тощо); C_{11}^u – загрози застосування вогнепальної зброї (бойові дії та терористичні акти із використанням зброї).

В концептуальній схемі на рис. 4.2 наведено, що, крім концептів C_i^u , ще додано концепти C_i^G , що характеризують наслідки різного характеру, а саме: C_1^G – соціальні збитки; C_2^G – матеріальні збитки; C_3^G – екологічні збитки.

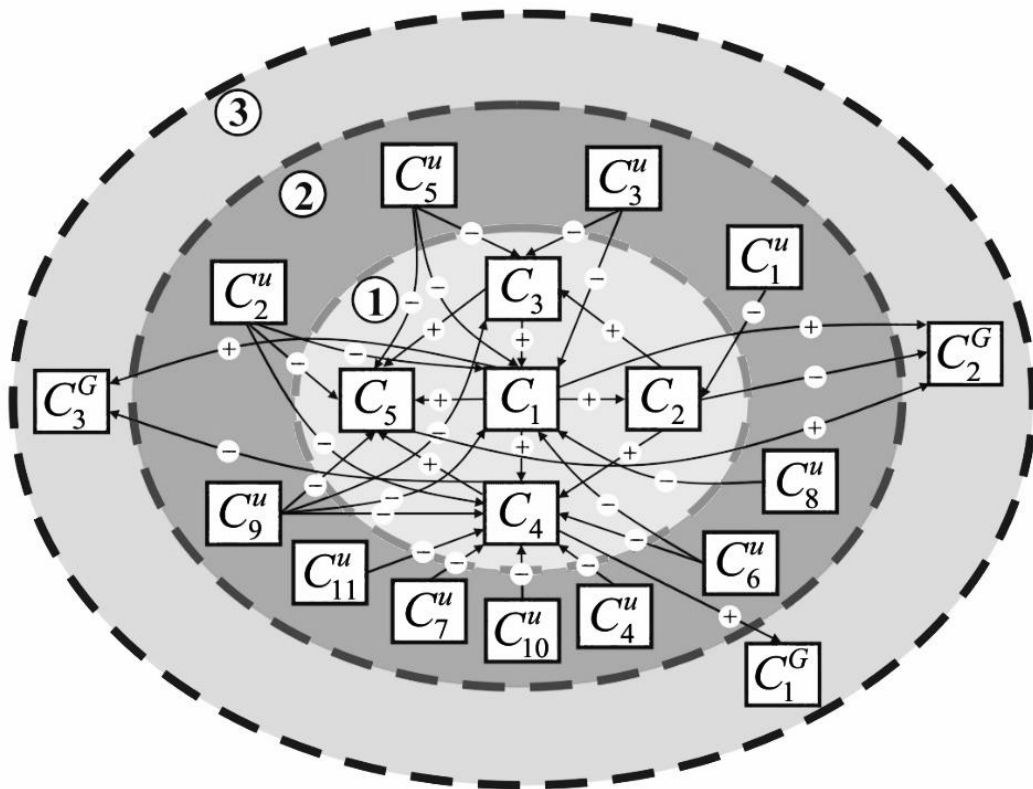


Рисунок 4.2 – Концептуальна схема дослідження методом НКК рівня захищеності гіпотетичного ОКІ. Концепти об’єднані у три групи: 1 – складові повсякденного функціонування; 2 – складові зовнішніх та внутрішніх загроз; 3 – наслідки від небезпек

Для проведення аналізу НКК слід врахувати всі опосередковані взаємовпливи між концептами. З цією метою, на основі створеної когнітивної карти, у роботі проведено аналіз основних системних показників на основі матриці суміжності $W = [C_i / C_j]_{n \times n}$. Так, при наближенні значень змінних до відповідного інтервалу $[-0,7; -1,0]$ стан ОКІ суттєво змінюється, змінюються зв’язки, деякі концепти втрачають свою значущість. Для визначення таких змін параметрів проаналізовано модель причинно-наслідкових взаємозв’язків стану ОКІ при загрозі виникнення аварійної ситуації та виявленні найвагомшої загрози з відповідними значеннями змінних в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану. Результати подано у табл. 4.3.

Проаналізувавши значення даних показників, можна визначити, що в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану найвагомішими концептами досліджуваної системи загроз є: C_5^u – загрози застосування БПЛА;

C_9^u – пожежні загрози; C_{11}^u – загрози застосування вогнепальної зброї. Також доцільно зазначити, що найменший вплив на умови функціонування ОКІ мають такі концепти як C_1^u та C_7^u .

Таблиця 4.3 – Значущість впливу концептів зовнішніх та внутрішніх загроз на функціонування гіпотетичного ОКІ в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану

Component	Indegree	Outdegree	Centrality
C_1^u – фінансові загрози	0,00	0,30	0,30
C_2^u – природні загрози	0,00	1,10	1,10
C_3^u – техногенні загрози	0,00	0,80	0,80
C_4^u – соціальні загрози	0,00	0,45	0,45
C_5^u – загрози застосування БПЛА	0,60	1,65	2,25
C_6^u – інформаційні загрози	0,00	0,80	0,80
C_7^u – неякісне виконання службових обов'язків	0,00	0,30	0,30
C_8^u – порушення режимів технологічного процесу	0,00	0,60	0,60
C_9^u – пожежні загрози	0,70	2,45	3,15
C_{10}^u – загрози виробничого травматизму	0,00	0,60	0,60
C_{11}^u – загрози застосування вогнепальної зброї	0,50	0,67	1,17

При цьому значення, які наведено в табл. 4.3, не мають одиниць виміру, оскільки вони є безрозмірними показниками, що обчислюються у відносних одиницях. Вони відображають характеристики моделі функціонування (у режимах повсякденного та аварійного функціонування) ОКІ, побудованої за допомогою *MENTAL MODELER*, і стосуються взаємозв'язків між компонентами цієї моделі: Indegree (вхідний ступінь) – кількість взаємозв'язків, що спрямовані до певного компонента; Outdegree (вихідний ступінь) – кількість взаємозв'язків, що виходять від певного компонента; Centrality (центральність) – показник, що характеризує значущість компонента в моделі на основі його взаємозв'язків.

4.1.3 Дослідження сценаріїв впливу загроз на рівень безпеки об'єкта критичної інфраструктури

Для прогнозування розвитку НС визначимо відносну зміну концептів системи методом сценарного аналізу під впливом найвагоміших факторів за їх максимального значення. Сценарний аналіз дає змогу спрогнозувати розвиток досліджуваної ситуації, визначити, оцінити та зменшити невизначеність, пов'язану із впливом ключових концептів, які впливають на захищеність ОКІ. Це, у свою чергу, допомагає формувати ефективні рішення із запобігання НС на ОКІ. При цьому метод побудови сценаріїв дозволив авторам найбільш детально дослідити вплив основних загроз, які є характерними для уведеного в державі правового режиму воєнного стану, на рівень безпеки ОКІ в умовах невизначеності та динамічних змін вхідних даних.

Сценарій 1. Аналіз зміни стану функціонування ОКІ за умови максимального збільшення значення концепту C_5^u – загрози застосування БПЛА, до яких належать дії, пов'язані з використанням БПЛА для атак, спостереження або доставки шкідливих засобів, що можуть завдати шкоди ОКІ та обслуговуючому персоналу. БПЛА здатні нести вибухові пристрої, засоби радіоелектронної боротьби, а також використовуватися для несанкціонованого моніторингу або збору даних. Загроза полягає у високій маневреності, непомітності та можливості обійти традиційні системи захисту.

Згідно даних рис. 4.3 у досліджуваній системі концепт C_5^u безпосередньо впливає на такі ключові показники: C_5 – продукція, з максимальним значенням у системі (-0,78); C_4 – персонал (-0,54); C_1 – обладнання (-0,46), C_3 – ресурси (-0,41); C_2 – фінансування (-0,39).

Гістограма демонструє, що ураження об'єкта за допомогою БПЛА призводить до таких наслідків, як: C_1^G – соціальні збитки (-0,36); C_2^G – матеріальні збитки (-0,49). Тому загроза БПЛА призводить до значного погіршення функціонування ОКІ, зокрема у виробничій, фінансовій та

безпековій сферах, що потребує впровадження додаткових заходів для посилення захисту та зменшення рівня негативних наслідків.

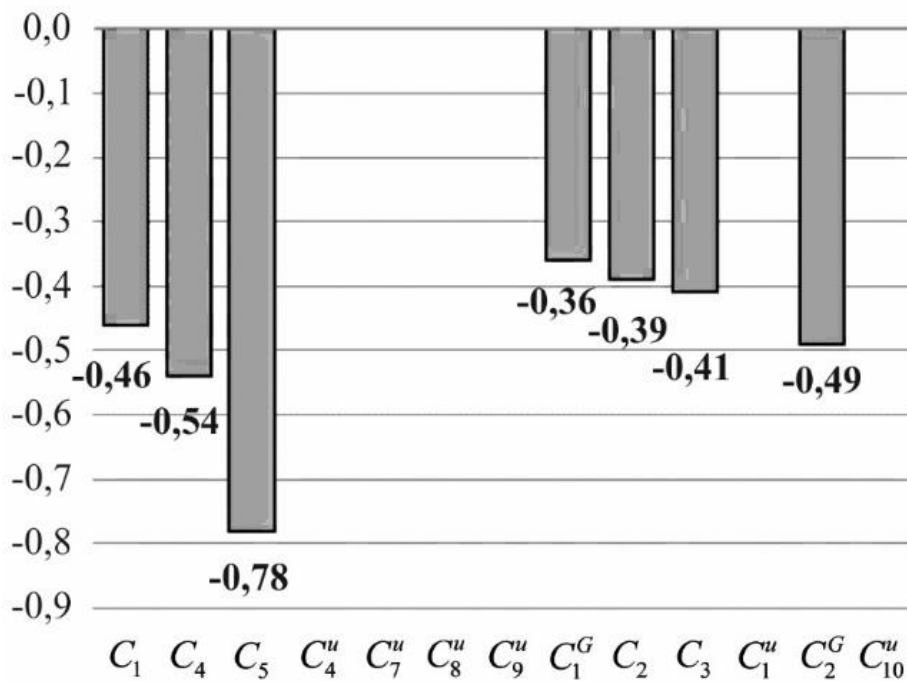


Рисунок 4.3 – Гістограма реакції стану функціонування гіпотетичного ОКІ на максимально негативні зміни концепту C_5^u – загрози застосування безпілотних літальних апаратів

Сценарій 2. Дослідження ступеня зміни концептів функціонування ОКІ за максимального збільшення негативного впливу на них концепту C_{11}^u – загрози застосування вогнепальної зброї.

Згідно даних рис. 4.4 застосування вогнепальної зброї під час терористичних актів на ОКІ становить значну загрозу як для фізичної безпеки об'єкта, так і для його функціональної працездатності. Напади із застосуванням вогнепальної зброї можуть бути спрямовані на знищення ключових елементів інфраструктури, завдання шкоди персоналу та створення хаосу, що призводить до зупинки критично важливих процесів.

За умов максимального збільшення значення концепту C_{11}^u – загрози застосування вогнепальної зброї, система функціонування ОКІ зазнає суттєвих негативних змін. Найбільше зниження спостерігається у концептах

C_4 – персонал (-0,58) та C_5 – продукція (-0,34). Також спостерігається зниження концептів C_1^G – соціальні збитки на 0,39 та C_2^G – матеріальні збитки на 0,23.

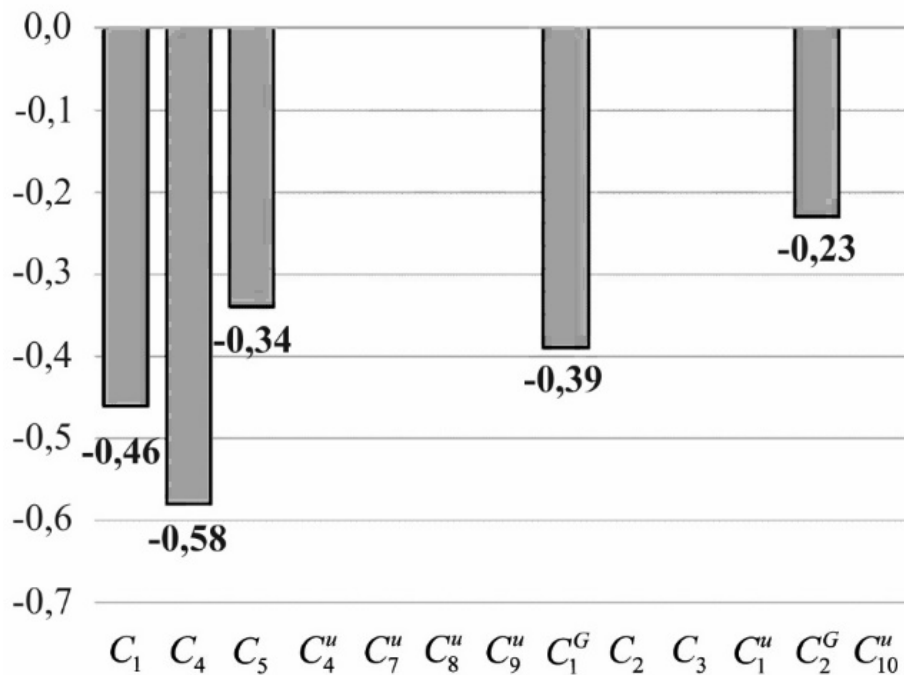


Рисунок 4.4. – Гістограма реакції стану функціонування гіпотетичного ОКІ на максимально негативні зміни концепту C_{11}^u – загрози застосування вогнепальної зброї

Загалом, ці зміни вказують на необхідність термінового посилення захисних заходів для мінімізації ризиків та забезпечення стійкості ОКІ перед загрозами терористичних актів. Першочергову увагу слід приділити захисту персоналу, оскільки людський ресурс є ключовим елементом, від якого залежить ефективність функціонування ОКІ та можливість швидкого відновлення після інциденту.

Сценарій 3. Аналіз зміни концептів функціонування ОКІ за умови максимального збільшення значення концепту C_9^u – пожежні загрози.

Згідно даних рис. 4.5 пожежні загрози на ОКІ становлять серйозну небезпеку для функціональної стійкості об'єктів та безпеки персоналу як у повсякденному режимі роботи, так і в режимі НС. Пожежі можуть виникати через технічні несправності, людський фактор або зовнішні впливи, такі як

терористичні атаки чи природні катастрофи. Наслідки пожеж включають фізичне пошкодження обладнання, зупинку робочих процесів, перебої в електропостачанні та передачі даних, що може спричинити масштабний збій в роботі цілих міст, регіонів чи галузей.

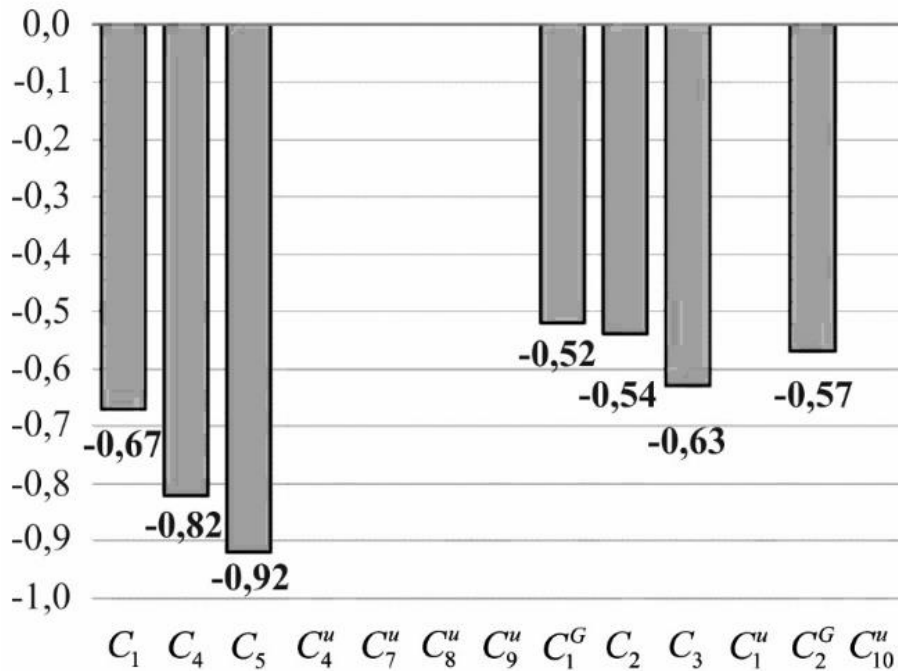


Рисунок 4.5. – Гістограма реакції стану функціонування гіпотетичного ОКІ на максимально негативні зміни концепту C_9^u – пожежні загрози

У результаті пожежної загрози спостерігається значне погіршення ключових показників функціонування ОКІ. Дослідивши отриману гістограму, можна зробити висновок, що найбільше зниження фіксується для концептів: C_5 – продукція (-0,92), що вказує на критичний вплив пожеж на виробничі процеси та загальну продуктивність системи; C_4 – персонал (-0,82), що свідчить про значну загрозу для життя та здоров'я персоналу, а також потенційні втрати серед робочої сили; C_1 – обладнання (-0,67), що відображає руйнування та пошкодження важливих технічних ресурсів і обладнання; C_2 – фінансування (-0,54); C_3 – ресурси (-0,63), що вказує на дефіцит ресурсів, необхідних для

відновлення після пожежі. Спостерігається зниження концептів C_1^G – соціальні збитки на 0,52 та C_2^G – матеріальні збитки на 0,57.

4.1.4 Дослідження впливу впровадження системи акустичного моніторингу на рівень захисту об'єкта критичної інфраструктури

Для підвищення рівня захищеності ОКІ пропонується ввести, згідно даних рис. 4.6, відповідні показники: C_1^R – система акустичного моніторингу джерел пожежної небезпеки; C_2^R – система акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї; C_3^R – система акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням БПЛА. Запропонована система базується на акустичному моніторингу джерел та має низку значних переваг. Акустичні системи забезпечують аналіз стану ОКІ у режимі реального часу. В цієї системи є своя база даних зі збереженими характерними частотами відповідних загроз. Якщо у системі не виявилось таких загроз, вона буде оновлювати свої дані для розширення своїх можливостей щодо ідентифікації загроз НС.

На рис. 4.6 концепти об'єднано у чотири групи: 1 – складові повсякденного функціонування; 2 – складові зовнішніх та внутрішніх загроз; 3 – наслідки від небезпек; 4 – елементи системи акустичного моніторингу.

У разі максимально-негативного впливу ($W_{ij} = [-0,7; -1,0]$) концептів $C_1^R \rightarrow C_9^u$, $C_2^R \rightarrow C_{11}^u$ та $C_3^R \rightarrow C_5^u$ відбувається позитивна реакція технологічного процесу. Взаємодія між зазначеними концептами у випадку загрози аварійної ситуації сприяє посиленню їхніх зв'язків. Підвищення сили взаємозв'язків між елементами системи сприяє зниженню ймовірності виходу з ладу відповідного блоку технологічного процесу, забезпечуючи його стійкість і адаптивність до впливу зовнішніх та внутрішніх загроз. На рис. 4.7 зображено гістограму реакції концептів зовнішніх/внутрішніх загроз, а відповідно і концептів повсякденного функціонування ОКІ, від впровадження системи акустичного моніторингу.

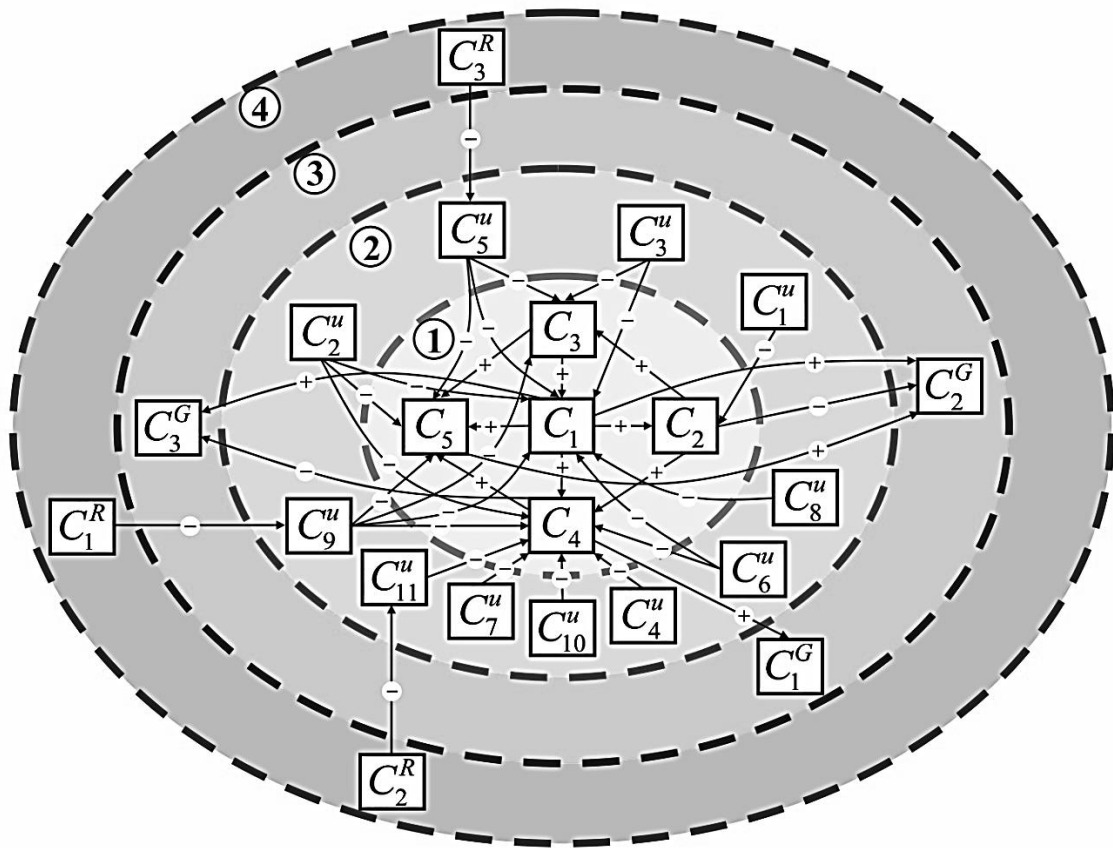


Рисунок 4.6 – Концептуальна схема дослідження методом нечітких когнетивних карт ефективності впровадження на гіпотетичному ОКІ системи акустичного моніторингу

Порівняльний аналіз даних рис. 4.7, отриманих до та після впровадження системи акустичного моніторингу, свідчить про підвищення рівня безпеки ОКІ для кожного з розглянутих концептів. Зокрема, спостерігається значне зниження рівня ризиків та покращення показників безпеки за такими напрямками.

1. Впровадження системи акустичного моніторингу джерел пожежної небезпеки (рис. 4.8): C_5 – продукція: зниження ризиків з -0,92 до -0,52, підвищення безпеки на 43,48 %; C_4 – персонал: зниження ризиків з -0,82 до -0,36, підвищення безпеки на 56,1 %; C_1 – обладнання: зниження ризиків з -0,67 до -0,24, підвищення безпеки на 64,18 %; C_3 – ресурси: зниження ризиків з -0,63 до -0,23, підвищення безпеки на 63,5 %; C_2 – фінансування: зниження ризиків з -0,54 до -0,21, підвищення безпеки на 61,1 %; C_1^G – соціальні збитки: зниження ризиків з -0,52 до -0,24, підвищення безпеки на 53,85 %; C_2^G – матеріальні

збитки: зниження ризиків з -0,57 до -0,34, підвищення безпеки на 40,35 %.
Визначено, що загальний рівень захищеності ОКІ підвищиться на 54,0 %.

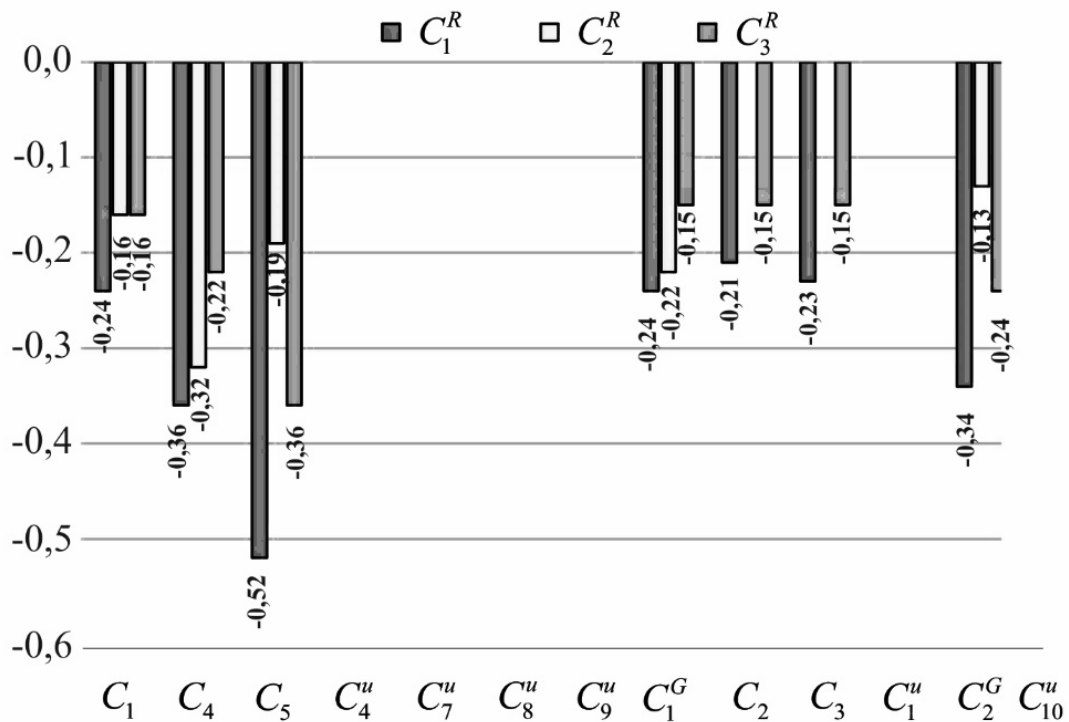


Рисунок 4.7 – Гістограма реакції концептів зовнішніх/внутрішніх загроз та повсякденного функціонування гіпотетичного ОКІ від впровадження системи акустичного моніторингу: C_1^R – моніторингу джерел пожежної небезпеки; C_2^R – моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї, C_3^R – моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням БПЛА

2. Впровадження системи акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї (рис. 4.9): C_4 – персонал: зниження ризиків з -0,58 до -0,32, підвищення безпеки на 44,83 %; C_1 – обладнання: зниження ризиків з -0,46 до -0,16, підвищення безпеки на 65,22 %; C_5 – продукція: зниження ризиків з -0,34 до -0,19, підвищення безпеки на 44,12 %; C_1^G – соціальні збитки: зниження ризиків з -0,39 до -0,22, підвищення безпеки на 43,59 %; C_2^G – матеріальні збитки: зниження ризиків з -0,23 до -0,13, підвищення безпеки на 48,5 %. Визначено, що загальний рівень захищеності ОКІ підвищиться на 44,0 %.

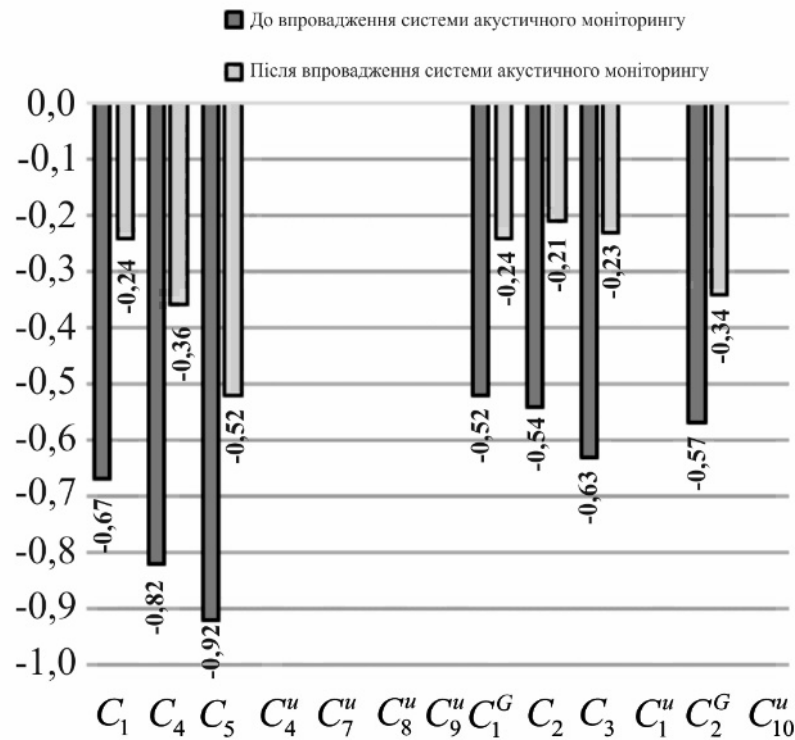


Рисунок 4.8 – Порівняльна гістограма рівня загроз для концептів гіпотетичного ОКІ до та після впровадження системи акустичного моніторингу джерел пожежної небезпеки

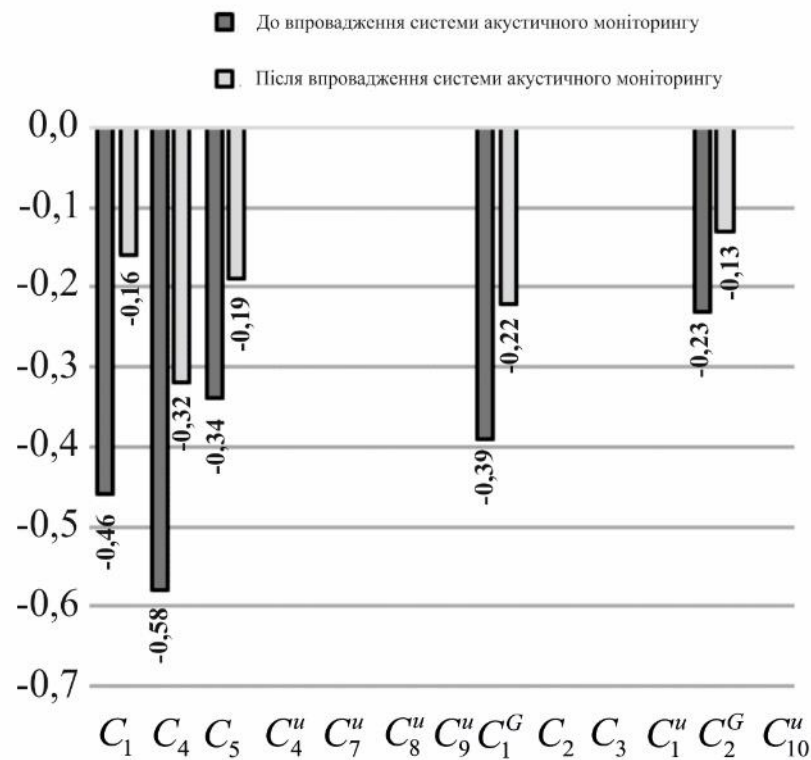


Рисунок 4.9 – Порівняльна гістограма рівня загроз для концептів гіпотетичного ОКІ до та після впровадження системи акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї

3. Впровадження системи акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням БПЛА (рис. 4.10): C_5 – продукція: зниження ризиків з -0,78 до -0,36, підвищення безпеки на 53,85 %; C_4 – персонал: зниження ризиків з -0,54 до -0,22, підвищення безпеки на 59,26 %; C_1 – обладнання: зниження ризиків з -0,46 до -0,16, підвищення безпеки на 65,22 %; C_3 – ресурси: зниження ризиків з -0,41 до -0,15, підвищення безпеки на 63,4 %; C_2 – фінансування: зниження ризиків з -0,39 до -0,15, підвищення безпеки на 61,5 %; C_1^G – соціальні збитки: зниження ризиків з -0,49 до -0,24, підвищення безпеки на 51,0 %; C_2^G – матеріальні збитки: зниження ризиків з -0,36 до -0,15, підвищення безпеки на 58,3 %. Визначено, що загальний рівень захищеності ОКІ підвищиться на 59,0 %.

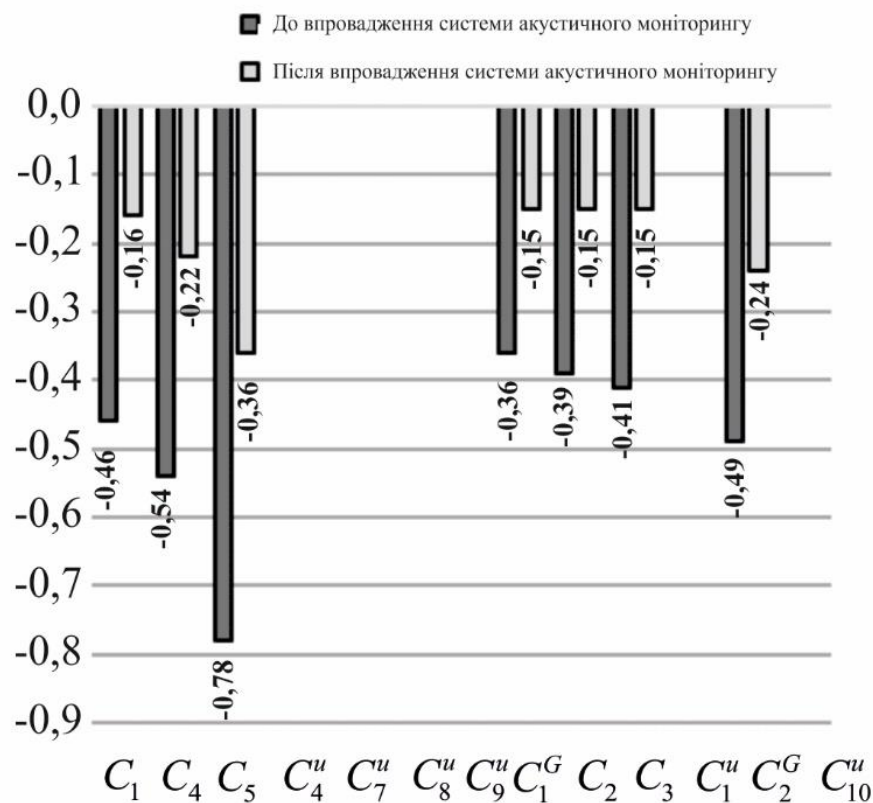


Рисунок 4.10 – Порівняльна гістограма рівня загроз для концептів гіпотетичного ОКІ до та після впровадження системи акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням БПЛА

Аналіз отриманих результатів дає змогу сформувати науково обґрунтований план організації заходів, спрямованих на підвищення рівня захищеності систем, які функціонують у межах ОКІ. Такий підхід забезпечує можливість своєчасного прийняття рішень для запобігання, локалізації або мінімізації впливу потенційних загроз. Для цього пропонується в якості методу отримання даних про стан функціонування ОКІ застосування акустичного методу моніторингу, який забезпечує оперативне виявлення загроз у режимі реального часу та дає змогу враховувати динамічну зміну умов у зовнішньому та внутрішньому середовищах. Важливим аспектом є врахування специфіки взаємодії компонентів ОКІ із зовнішнім середовищем, що дає можливість підвищити ефективність системи безпеки та адаптувати її до сучасних ризиків і загроз, які є характерними для уведеного в державі правового режиму воєнного стану.

Таким чином, розроблено когнітивну модель функціонування ОКІ в умовах впливу різного роду загроз, де ключові компоненти системи поділено на чотири групи. Складові повсякденного функціонування враховують взаємозв'язки між показниками рівня фінансування, ресурсного забезпечення, станом технологічного обладнання, якістю продукції, а також чисельністю і кваліфікацією персоналу. Складові зовнішніх та внутрішніх загроз об'єднали різні види ризиків (фінансові, природні, техногенні, соціальні, застосування БПЛА, застосування вогнепальної зброї, інформаційні, пожежні тощо) та враховують ступінь їх впливу на рівень нормального функціонування об'єкта. Наслідки від цих небезпек об'єднали соціальні, матеріальні та екологічні збитки. Четверта група об'єднала елементи системи акустичного моніторингу джерел НС. Проведено структурно-топологічний аналіз побудованих НКК та встановлено, що ці карти є адекватними для оцінки впливу зовнішніх та внутрішніх загроз, а також застосування системи акустичного моніторингу джерел небезпек. Для кожної із запропонованих когнітивних моделей визначено концепти, які мають найвищу структурну значущість. Зокрема, проаналізувавши значення складових побудованих НКК, визначено, що в умовах уведення в

державі правового режиму воєнного стану найвагомішими концептами досліджуваної системи загроз є загрози застосування БПЛА, пожежні загрози та загрози застосування вогнепальної зброї.

Проведено сценарне моделювання максимального негативного впливу найвагоміших концептів системи загроз на рівень безпеки ОКІ. Встановлено, що ці загрози безпосередньо впливають на ключові показники повсякденного функціонування та призводять до таких значних наслідків, як соціальні та матеріальні збитки. Ці зміни вказують на необхідність посилення захисних заходів для мінімізації ризиків та забезпечення стійкості ОКІ особливо перед загрозами, які виникають в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану. За результатами проведеного сценарного моделювання позитивного впливу результатів впровадження системи акустичного моніторингу (яка сприяє своєчасному виявленню та ідентифікації пожежних загроз, атак із застосуванням БПЛА та вогнепальної зброї) на показники зовнішніх та внутрішніх загроз на нормальне функціонування ОКІ встановлено підвищення рівня захисту КІ на 40–50 %.

4.2 Розробка керуючого алгоритму реалізації концепції «Smart City» щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору

При розробці керуючого алгоритму реалізації концепції «Smart City» щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору дотримані принципи поетапності дій відповідних етапів системи безпеки міста та її зворотних зв'язків. При цьому за кожний окремий етап відповідають різні служби та виконавці, однак їх взаємодія координується загальним координаційним центром.

Структура розробленого керуючого алгоритму складається із п'яти етапів (рис. 4.11).

Першим етапом алгоритму є проведення моніторингу акустичного простору міста як потенційної зони НС місцевого рівня, що передбачає реєстрацію потенційно небезпечної події на території міста. Моніторинг

здійснюється за допомогою розподілених акустичних датчиків, які фіксують АЧХ звукових сигналів у реальному часі. Ці пристрої розміщуються у просторі як горизонтально (в різних географічних точках), так і вертикально (на певних висотах).

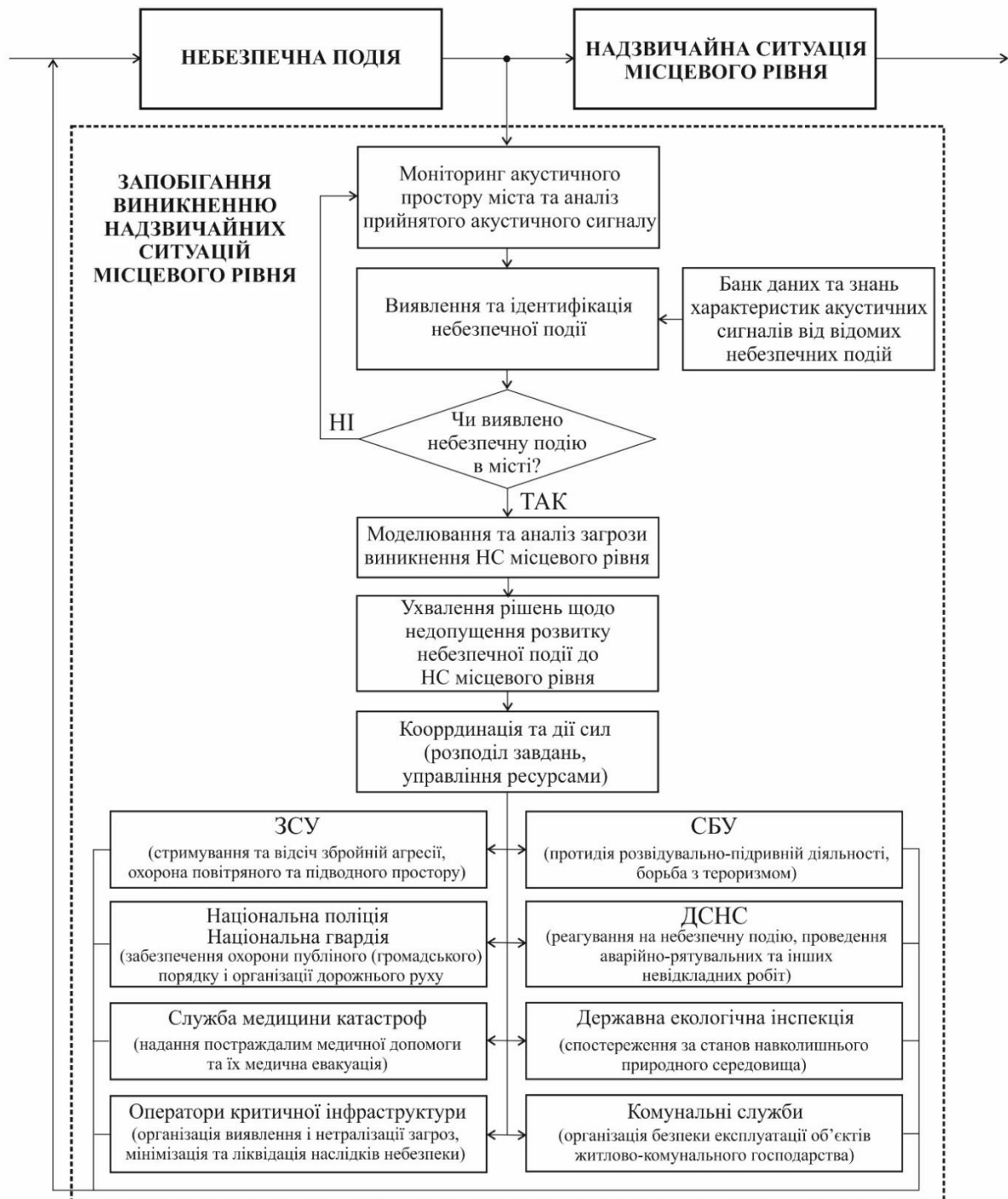


Рисунок 4.11 – Керуючий алгоритм реалізації концепції «Smart City» щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору

Моніторинг акустичного простору міста є основною складовою системи запобігання НС місцевого рівня. Завдяки сучасним технологіям, система моніторингу працює у режимі реального часу, безперервно збираючи та обробляючи акустичні дані.

Первинна обробка інформації може здійснюватися як у централізованому місці, так і розподілено – залежно від характеристик системи моніторингу та властивостей міста, де функціонує системи безпеки міста. Отримані дані аналізуються та систематизуються для оцінки рівня небезпеки на території міста. Автоматизовані засоби обробки інформації пришвидшують цей процес і дозволяють створювати електронні бази даних у режимі реального часу.

Другим етапом алгоритму є ідентифікація небезпечної події. Отримана засобами контролю первинна інформація передається до центру інформаційних технологій, де отримані акустичні дані проходять аналіз, представлений у третьому розділі монографії, із використанням ШІ та алгоритмів обробки сигналів. Програмні модулі порівнюють прийняті АЧХ звукових сигналів із базою даних, що дає змогу ідентифікувати джерело небезпечної події за «корисним» акустичним сигналом на фоні шуму.

Третій етап алгоритму – моделювання та аналіз загрози виникнення НС місцевого рівня, що є критичною фазою у запобіганні НС. На цьому етапі використовується поєднання аналітичних методів та комп'ютерного моделювання для оцінки ймовірності розвитку події. Головна мета цього процесу – визначити потенційні сценарії розвитку НС, оцінити їх наслідки та розробити відповідні заходи у ході ймовірного реагування.

Четвертим етапом алгоритму є ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС місцевого рівня. Так, оцінка ризиків визначає рівень загрози для населення та КІ міста, що дає змогу ухвалювати своєчасні рішення щодо запобігання або мінімізації наслідків подій на території міста. Ці рішення ухвалюються у процесі функціонування в місті ситуаційного центру. Перспективи створення таких центрів обумовлено рішенням Ради національної безпеки і оборони України, яка вирішила

розширити та у подальшому розвинути єдину мережу ситуаційних центрів, до складу якої мають входити Головний ситуаційний центр України, Урядовий ситуаційний центр, ситуаційні центри органів сектору безпеки і оборони, ситуаційні центри центральних органів виконавчої влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, обласних, Київської та Севастопольської міських державних адміністрацій, а також резервні та рухомі ситуаційні центри [12, 74–78, 204–208].

Експерти ситуаційного центру, що приймають рішення, задають критерії для прогнозування розвитку НС місцевого рівня та формування варіантів рішень на основі відповідних розрахунків. Після аналізу запропонованих варіантів особа, відповідальна за прийняття рішення, може обрати оптимальний варіант або скоригувати критерії для уточнення прогнозу. Метою таких рішень є запобігти ескалації небезпеки або, якщо катастрофа є неминучою, мінімізувати її наслідки. Затверджене рішення передається до системи виконання, яка формалізує його та доводить до виконавців, що безпосередньо впливають на джерела небезпек у місті.

Координація дій відповідних служб міста є завершальним (п'ятим) етапом алгоритму запобігання виникненню НС місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору. Вона передбачає чітку взаємодію між різними службами для ефективного розподілу завдань і ресурсів. Автоматизована система оповіщення негайно передає інформацію про потенційну загрозу відповідним службам. Якщо аналіз показує, що подія має високий ризик ескалації до НС місцевого рівня, активуються відповідні служби та відбувається розподіл обов'язків між ними для забезпечення оперативного реагування та координації дій [209, 210].

Основні служби міста об'єднують підрозділи Збройних Сил України, Служби безпеки України, Міністерства внутрішніх справ України, Національної гвардії України, Національної поліції України, Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, операторів КІ та комунальні служби, функції яких

взаємопов'язані у мирний час, а також в особливий період, у тому числі в умовах воєнного стану, в умовах НС та під час виникнення кризових ситуацій.

Збройні Сили України (ЗСУ) є військовим формуванням, на яке відповідно до Конституції України покладаються оборона України, захист її суверенітету, територіальної цілісності та недоторканності. ЗСУ забезпечують стримування та відсіч збройній агресії проти України, охорону повітряного простору держави та підводного простору в межах територіального моря України, у випадках, визначених законом, беруть участь у заходах, спрямованих на боротьбу з тероризмом [211].

Служба безпеки України (СБУ) є державним органом спеціального призначення з правоохоронними функціями, що забезпечує державну безпеку, здійснюючи з неухильним дотриманням прав і свобод людини і громадянина: протидію розвідувально-підривній діяльності проти України; боротьбу з тероризмом; контррозвідувальний захист державного суверенітету, конституційного ладу і територіальної цілісності, оборонного і науково-технічного потенціалу, кібербезпеки, економічної та інформаційної безпеки держави, ОКІ; охорону державної таємниці [212].

Національна поліція України є центральним органом виконавчої влади, що забезпечує громадську безпеку і порядок, охорону прав і свобод людини, інтересів суспільства і держави, протидію злочинності, а також надає визначені законом послуги з допомоги особам, які з особистих, економічних, соціальних причин або внаслідок НС потребують такої допомоги [213].

Національна гвардія України є військовим формуванням із правоохоронними функціями, призначеним для виконання завдань із захисту та охорони життя, прав, свобод і законних інтересів громадян, суспільства і держави від злочинних та інших протиправних посягань, охорони громадського порядку та забезпечення громадської безпеки, а також у взаємодії з іншими органами – із забезпечення державної безпеки і захисту державного кордону України, припинення терористичної діяльності, діяльності незаконних

воєнізованих або збройних формувань, організованих злочинних груп та організацій [214].

ДСНС є центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сферах ЦЗ, захисту населення і територій від НС, запобігання їх виникненню, ліквідації наслідків НС, проведення аварійно-рятувальних робіт, пожежогасіння, пожежної та техногенної безпеки, роботи рятувальних служб під час аварій, а також гідрометеорологічної діяльності [215, 216].

Державна служба медицини катастроф є особливим видом державної аварійно-рятувальної служби, основним завданням якої є надання безоплатної медичної допомоги постраждалим від НС техногенного та природного характеру, рятувальникам та особам, які беруть участь у ліквідації наслідків НС.

Не менш важливу роль відіграють оператори КІ – юридичні особи будь-якої форми власності та/або фізичні особи – підприємці, що на правах власності, оренди або на інших законних підставах здійснюють управління ОКІ та відповідають за його поточне функціонування. При цьому охороною ОКІ є комплекс режимних, інженерних, інженерно-технічних та інших заходів (крім заходів із захисту інформації та кіберзахисту ОКІ), які організовуються і проводяться суб'єктами національної системи захисту КІ з метою запобігання та/або недопущення чи припинення протиправних дій (актів несанкціонованого втручання) на ОКІ.

Допоміжну функцію виконують комунальні служби, які контролюють безпеку житлово-комунального господарства, здійснюють ремонтні роботи та забезпечують функціонування систем водопостачання, каналізації, теплопостачання та електропостачання у разі НС [217–219].

У процесі виконання службами міста функцій щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня що впливає на джерела небезпек, які виникли на території міста. Зміни стану функціонування міста та зміни стану безпеки в ньому викликать зміни у величинах вимірюваних параметрів, що фіксуються пристроями акустичного контролю. Надалі ці зміни будуть

відпрацьовані, а подальше моделювання покаже ефективність виконання прийнятого рішення – алгоритм замкнувся.

Таким чином, розроблено керуючий алгоритм запобігання виникненню НС місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору, який передбачає виконання п'яти процедур: 1) моніторинг акустичного простору міста (за допомогою системи наземних автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек) та аналіз прийнятого акустичного сигналу (шляхом фільтрації шумів та частотного аналізу «корисного» сигналу); 2) виявлення та ідентифікація небезпечної події (шляхом порівняння АЧХ прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

Показано, що основні служби міста об'єднують підрозділи ЗСУ, СБУ, Міністерства внутрішніх справ України, Національної гвардії України, Національної поліції України, ДСНС, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, операторів КІ та комунальні служби, функції яких взаємопов'язані у мирний час, а також в особливий період, у тому числі в умовах воєнного стану, в умовах НС та під час виникнення кризових ситуацій.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено когнітивну модель функціонування ОКІ в умовах впливу різного роду загроз, де ключові компоненти системи поділено на чотири групи. Складові повсякденного функціонування враховують взаємозв'язки між показниками рівня фінансування, ресурсного забезпечення, станом технологічного обладнання, якістю продукції, а також чисельністю і кваліфікацією персоналу. Складові зовнішніх та внутрішніх загроз об'єднали різні види ризиків (фінансові, природні, техногенні, соціальні, застосування БПЛА, застосування вогнепальної зброї, інформаційні, пожежні тощо) та

враховують ступінь їх впливу на рівень нормального функціонування об'єкта. Наслідки від цих небезпек об'єднали соціальні, матеріальні та екологічні збитки. Четверта група об'єднала елементи системи акустичного моніторингу джерел НС. Проведено структурно-топологічний аналіз побудованих НКК та встановлено, що ці карти є адекватними для оцінки впливу зовнішніх та внутрішніх загроз, а також застосування системи акустичного моніторингу джерел небезпек. Для кожної із запропонованих когнітивних моделей визначено концепти, які мають найвищу структурну значущість. Зокрема, проаналізувавши значення складових побудованих НКК, визначено, що в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану найвагомішими концептами досліджуваної системи загроз є загрози застосування БПЛА, пожежні загрози та загрози застосування вогнепальної зброї.

Проведено сценарне моделювання максимального негативного впливу найвагоміших концептів системи загроз на рівень безпеки ОКІ. Встановлено, що ці загрози безпосередньо впливають на ключові показники повсякденного функціонування та призводять до таких значних наслідків, як соціальні та матеріальні збитки. Ці зміни вказують на необхідність посилення захисних заходів для мінімізації ризиків та забезпечення стійкості ОКІ особливо перед загрозами, які виникають в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану. За результатами проведеного сценарного моделювання позитивного впливу результатів впровадження системи акустичного моніторингу (яка сприяє своєчасному виявленню та ідентифікації пожежних загроз, атак із застосуванням БПЛА та терористичних дій) на показники зовнішніх та внутрішніх загроз на нормальне функціонування ОКІ встановлено підвищення рівня захисту критичної інфраструктури на 40–50 %.

2. Розроблено керуючий алгоритм реалізації концепції «Smart City» щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору, який передбачає виконання п'яти процедур: 1) моніторинг акустичного простору міста (за допомогою системи наземних

автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек) та аналіз прийнятого акустичного сигналу (шляхом фільтрації шумів та частотного аналізу «корисного» сигналу); 2) виявлення та ідентифікації небезпечної події (шляхом порівняння АЧХ прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

Показано, що основні служби міста об'єднують підрозділи ЗСУ, СБУ, Міністерства внутрішніх справ України, Національна гвардія України, Національна поліція України, ДСНС, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, операторів КІ та комунальні служби, функції яких взаємопов'язані у мирний час, а також в особливий період, у тому числі в умовах воєнного стану, в умовах НС та під час виникнення кризових ситуацій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В монографії вирішено важливу науково-практичну задачу у галузі інформаційних технологій для сфери цивільного захисту, а саме підвищення ефективності концепції «Smart City» із підтримки прийняття рішень щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня, шляхом впровадження системи акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст джерел небезпек.

1. Запобігання виникненню НС місцевого рівня пов'язане з розробкою комплексу ефективних правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання рівня безпеки функціонування цивільної та КІ міста, проведення оцінки рівнів ризику виникнення на території міста небезпечних подій різного характеру, а також завчасне реагування на них, особливо за умов уведення в Україні правового режиму воєнного стану. Ефективність реалізації цих заходів спирається на дані моніторингу, експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу небезпечних подій в умовах невизначеності вхідної інформації. В цих умовах одним із напрямів раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль простору міста у акустичному діапазоні. Міжнародний досвід у правовій та технічній площині свідчить про перспективи застосування засобів акустичного моніторингу для виявлення джерел небезпечних подій.

2. Розроблено (за стандартом IDEF0) структурно-функціональну модель стратегічного розвитку системи безпеки міста, з урахуванням нормативно-правової бази України та наявності в державі відповідних механізмів (ресурсів). Модель складається з контекстної діаграми функціонування міста з подальшою трирівневою декомпозицією процесів управління людськими ресурсами, розвитку міської інфраструктури, забезпечення належного соціально-економічного рівня життєдіяльності населення та підтримання необхідного рівня безпеки життєдіяльності. Зазначені процеси забезпечують взаємозв'язки між вхідними

(соціальні, енергетичні, фінансові, транспортні та матеріально-технічні) потоками, вхідними (фінансові, природні, техногенні, соціальні, військові та інформаційні) загрозами для нормального функціонування міста та вихідними потоками, які характеризуються соціально-демографічними та фінансово-економічними показниками, а також вихідними потоками, які характеризуються рівнями економічної, соціальної, інформаційної, екологічної, науково-технічної, військової небезпеки та рівнем виникнення НС у місті. Результати моделювання забезпечують комплексне вирішення задачі реалізації ефективних заходів запобігання виникненню НС місцевого рівня, маючи за мету розробку міської системи оперативного моніторингу і прогнозування НС на основі спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації небезпечних подій, з подальшою розробкою рішень щодо управління службами безпеки та комунальними службами міста.

3. Проведено експериментальні дослідження можливостей акустичного методу для ідентифікації джерел НС місцевого рівня, які пов'язані з масштабними пожежами целюлозовмісних матеріалів та рідких органічних речовин, а також із застосуванням вогнепальної зброї та БПЛА. З цією метою розроблено вимірювальну схему, з багатовимірною обробкою експериментальних даних шляхом поєданого використання спектрального, фрактального, кластерного і вейвлет аналізів АЧХ прийнятих акустичних сигналів від небезпечних подій. Результати виконаних експериментів укладаються в довірчі інтервали, розраховані за критерієм Стюдента з надійністю 0,95, та свідчать про відповідний рівень достовірності та надійності акустичного методу щодо виявлення та ідентифікації джерел НС місцевого рівня.

4. Розроблено когнітивну модель функціонування ОКІ міста в умовах впливу різного роду загроз, де ключові компоненти системи поділено на чотири групи: 1) складові повсякденного функціонування; 2) складові зовнішніх та внутрішніх загроз; 3) наслідки від небезпечних подій; 4) елементи системи акустичного моніторингу джерел НС. За результатами проведеного сценарного

моделювання впливу результатів впровадження системи акустичного моніторингу на показники зовнішніх та внутрішніх загроз на нормальне функціонування ОКІ встановлено підвищення рівня захисту КІ міста на 40–50 %.

За результатами проведених досліджень розроблено керуючий алгоритм реалізації концепції «Smart City» щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня за умов функціонування міської системи оперативного акустичного моніторингу небезпечних подій в місті і прогнозування НС місцевого рівня, який передбачає виконання п'яти процедур: 1) моніторинг акустичного простору міста (за допомогою системи наземних автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек) та аналіз прийнятого акустичного сигналу (шляхом фільтрації шумів та частотного аналізу «корисного» сигналу); 2) виявлення та ідентифікації небезпечної події (шляхом порівняння АЧХ прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левчук К.О., Романюк Р.Я. Сталий розвиток міста як ключовий фактор розвитку економіки України. *Математичне моделювання*. 2022. 1(46). 131–140. <http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/258455/255221>
2. Назаренко Ю., Сирбу О. Стратегія розвитку міст: удосконалення підходів. Приклад Києва. <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/stattya-strategiyi-rozvytku-mist.pdf>
3. Пінь А.М. Концепція розвитку міста в контексті розвитку інноваційного управління. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2018. 4(132). 114–118. [http://ird.gov.ua/sep/sep20184\(132\)/sep20184\(132\)_114_PinA.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20184(132)/sep20184(132)_114_PinA.pdf)
4. Чуль О.М. Концепція розбудови міст в рамках розвитку креативної економіки: методологічний та практичний аспект. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3348>
5. Жирак Р.М. Феномен життєстійкості як складова розвитку урбоєкосистем. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2022. 64. 179–193. URL: <http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/267479/263335>
6. Планування і забудова територій: ДБН Б.2.2-12:2018. Київ. Міністерство комунального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. 187. https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf
7. Про національну безпеку України: Закон України від 21 червня 2018 року № 2469-VIII. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19>
8. Про засади внутрішньої і зовнішньої політики: Закон України від 01 липня 2010 року № 2411-VI. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2411-17#Text>
9. Про правовий режим надзвичайного стану: Закон України від 16 березня 2000 року № 1550-III. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-14#Text>
10. Про правовий режим воєнного стану: Закон України від 12 травня 2015 року № 389-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text>

11. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про Стратегію національної безпеки України»: Указ Президента України від 14 вересня 2020 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text>

12. Андронов В.А., Дівізінюк М.М., Калугін В.Д., Тютюник В.В. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: Монографія. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2016. 319.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5970>

13. Тютюник В.В., Тютюник О.О., Удянський М.М., Ященко О.А. Кластеризація регіонів України за рівнем небезпеки та шляхи підвищення ефективності функціонування єдиної державної системи цивільного захисту в умовах невизначеності вхідної інформації про виникнення надзвичайних ситуацій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. 1(11). 75–84. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14237>

14. На залізничній станції «Шебелинка» вибухнула цистерна з паливом. Пожежа кваліфікована як диверсія. <https://kharkivoda.gov.ua/news/72697>

15. Унаслідок ворожих обстрілів у Миколаєві загорілась АЗС: є загиблі. <https://prm.ua/unaslidok-vorozhykh-obstriliv-u-mykolaievizahorilas-azs/>

16. Пожежа в Рені: у порту вибухнув бензовоз, є жертви. <https://zn.ua/ukr/UKRAINE/pozhezha-v-reni-u-portuvibukhnuv-benzovoz-je-zhertvi.html>

17. Наслідки пожежі біля АЗС у Чернівцях: згоріли бензовоз і три цистерни, пошкоджено приміщення, травмована людина. <https://bukinfo.com.ua/nadzvychni-sytuacii/naslidkypozhezhi-bilya-azs-u-chernivcyah>

18. Обстріл Дніпра: пожежу на АЗС локалізували. <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3601120-obstrildnibra-pozezu-na-azs-lokalizovali.html>

19. Окупанти потужно обстріляли Нікополь: виникла пожежа на АЗС, пошкоджено багатоповерхівки і фабрику. <https://tsn.ua/ato/okupanti->

[potuzhnoobstrilyali-nikopol-vinikla-pozhezha-na-azsposhkodzenobagatopoverhivki-i-fabriku-2190190.html](https://suspilne.media/519805-na-naftobazi-na-rivnensinispalahnuv-benzovoz-so-vidomo-pro-incident/)

20. На Рівненщині у Сарнах 1 липня загорівся бензовоз на території нафтобази. Поруч із транспортом знаходилися резервуари з паливом, повідомили у пресслужбі ДСНС області. Місткість бензовоза – 28 тонн пального. <https://suspilne.media/519805-na-naftobazi-na-rivnensinispalahnuv-benzovoz-so-vidomo-pro-incident/>

21. Під Києвом сталася пожежа на АЗС: спалахнув бензовоз із 10 тисячами літрів пального. <https://tsn.ua/exclusive/pid-kiyevomstalasya-masshtabna-pozhezha-na-zpravci-spalahnuvbenzovoz-foto-video-2286691.html>

22. У Харкові сталася пожежа на АЗС, коли рф вдарила по місту. <https://suspilne.media/453915-u-harkovi-stalasa-pozeza-na-azs-koli-rf-vdarila-po-mistu-sovidomo/>

23. На Київщині вибухнув бензовоз: водій загинув, на місці сталася значна пожежа. <https://www.unian.ua/incidents/nakijivshchini-vibuhnuv-benzovoz-vodiy-zaginuv-na-miscistalasya-znachna-pozhezha-foto-video-novini-kiyeva-12269862.html>

24. Вогняне пекло у Києві: пожежа на АЗС спалахнула через наїзд авто на колонку. <https://kyiv.tsn.ua/vognyane-peklou-kiyevi-pozhezha-na-azs-spalahnula-cherez-nayizd-avtona-kolonku-foto-video-2366779.html>

25. На Київщині вщент згоріли бензовоз та мікроавтобуси. <https://kyiv.comments.ua/ua/news/society/accidents/20534-na-kiivschini-vschent-zgorili-benzovoz-ta-mikroavtobusifoto.html>

26. У Харкові пролунав потужний вибух, в небо піднявся стовп диму. <https://apostrophe.ua/ua/news/society/accidents/2023-11-12/v-harkove-progremel-moschniy-vzryiv-v-nebopodnyalsya-stolb-dyima-vse-podrobnosti-i-video/308351>

27. Про боротьбу з тероризмом: Закон України від 20 березня 2003 року № 638-IV. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/638-15>

28. Кримінальний кодекс України від 5 квітня 2001 року № 2341-III. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#n1707>

29. Tucker J.B. Historical trends related to bioterrorism: an empirical analysis. *Emerg. Infect. Disease*. 1999. 5. 4. 498–504.
30. Рубан І.В., Тютюник В.В., Тютюник О.О. Розвиток науково-технічних основ оперативного геоінформаційного акустичного моніторингу джерел терористичних небезпек. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ. Національний університет оборони України. 2020. 3(39). 67–80. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-39-3-67-80.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18114>
31. Стрелянина в супермаркеті Walmart у США: загинули до 10 людей.
<https://www.bbc.com/ukrainian/news-63726537>
32. У центрі Львова 24-річний чоловік влаштував стрілянину в готелі.
http://zaxid.net/u_tsentri_lvova_24_richniy_cholovik_vlashtuvav_strilyaninu_v_gote_li_n155396
33. Стрелянина в Римі: троє загиблих, четверо поранених.
<https://tsn.ua/svit/strilyanina-v-rimi-troye-zagiblih-chetvero-poranenih-2220880.html>
34. 39-річного чоловіка затримали за стрілянину біля лісу на Закарпатті.
https://zaxid.net/39_richnogo_cholovika_zatrimali_za_strilyaninu_bilya_lisu_na_zakarpatti_n1555003
35. Стрелянина в центрі Парижа: троє людей вбиті, кілька поранених.
<https://www.bbc.com/ukrainian/news-64078090>
36. Озброєний автоматом чоловік увірвався до посольства Азербайджану в Ірані і влаштував стрілянину.
<https://tsn.ua/svit/ozbroyeniy-avtomatom-cholovik-uvirvavsya-u-posolstvo-azerbaydzhanu-v-irani-i-vlashtuvav-strilyaninu-video-2252779.html>
37. В американській школі сталася стрілянина: є загиблі.
<https://tsn.ua/svit/v-amerikanskiy-shkoli-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-2249953.html>
38. У США сталася стрілянина: повідомляють про 10 загиблих.
<https://tsn.ua/svit/u-ssha-stalasya-strilyanina-povidomlyayut-pro-10-zagiblih-foto-2248942.html>

39. У США сталася чергова масова стрілянина: є жертви.
<https://tsn.ua/svit/v-ssha-stalasya-chergova-masova-strilyanina-ye-zhertvi-2254741.html>
40. В університеті штату Мічиган сталася стрілянина: є загиблі та поранені. <https://tsn.ua/svit/v-universiteti-shtatu-michigan-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-ta-poraneni-2265409.html>
41. Друга масова стрілянина у Каліфорнії за кілька днів – семеро загиблих. <https://www.bbc.com/ukrainian/news-64383486>
42. Спочатку вбив батька, а потім ще 15 людей: журналіст про деталі наймасовішої стрілянини в історії Чехії. <https://tsn.ua/exclusive/spochatku-vbiv-batka-a-potim-sche-15-lyudey-zhurnalist-pro-detali-naymasovishoyi-strilyanini-v-istoriyi-chehiyi-2477170.html>
43. У Стамбулі сталася стрілянина в італійській церкві – одна людина загинула. <https://pmg.weukraine.tv/novyny/u-stambuli-stalasya-striljanina-v-italijskij-tserkvi-odna-ljudina-zahinula/>
44. У Грузії внаслідок стрілянини на ринку загинуло четверо людей. https://zaxid.net/u_gruziyi_vnaslidok_strilyanini_na_rinku_zaginulo_chetvero_lyudey_n1579717
45. У Детройті внаслідок стрілянини у парку поранення отримали 9 осіб. Серед них мама і два сини.
https://lb.ua/world/2024/06/16/619152_detroyti_vnaslidok_strilyanini.html
46. У школі в США сталася стрілянина: загинули щонайменше четверо людей, підозрюють 14-річного підлітка.
<https://nv.ua/ukr/world/countries/strilyanina-u-ssha-pidlitok-vidkriv-vogon-po-lyudyah-chotiri-lyudini-zaginuli-50448394.html>
47. На Тернопільщині чоловік розстріляв людей біля сільської школи.
<https://lenta.te.ua/society/2024/08/15/203395.html>
48. У Анкарі стався теракт біля об'єкта аерокосмічної компанії: є загиблі та поранені. <https://espreso.tv/svit-u-ankari-stavsy-terakt-bilya-obekta-aerokosmichnoi-kompanii-e-zagibli-ta-poraneni>

49. Нелегальна зброя в Україні. <https://uavz.org/nelegalna-zbroya-v-ukraini-povna-versiya-dokumentu-vid-small-arms-survey/>

50. На Херсонщині внаслідок російського обстрілу загинули волонтери з Франції.

https://zaxid.net/na_hersonshhini_vnaslidok_rosiyskogo_obstrilu_zaginuli_volonteri_z_frantsiyi_n1579227

51. Росіяни атакували дроном автомобіль на Сумщині, загинуло подружжя.

https://zaxid.net/rosiyani_atakuvali_dronom_avtivku_na_sumshhini_zaginulo_podruzhzha_n1592211

52. Російська армія влучила FPV-дрonom у рейсовий автобус на Сумщині. https://zaxid.net/rosiyska_armiya_fpv_dronom_vluchila_v_reysoviy_avtobus_na_sumshhini_n1594334

53. У Херсоні авто швидкої допомоги стало мішенню ворога. <https://tsn.ua/ato/u-hersoni-avto-shvidkoyi-dopomogi-stalo-mishennyu-voroga-scho-vidomo-pro-naslidki-2684487.html>

54. Внаслідок російської атаки в Одесі загинула людина, ще понад десяток постраждали.

https://zaxid.net/vnaslidok_rosiyskoyi_ataki_v_odesi_zaginula_lyudina_shhe_ponad_desyatok_postrazhdali_n1597477

55. Четверо постраждалих і пошкоджені авто: деталі ворожої атаки БПЛА на Харків. <https://armyinform.com.ua/2024/11/13/chetvero-postrazhdalyh-i-poshkodzheni-avto-detali-vorozhoi-ataky-bpla-na-harkiv/>

56. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02 жовтня 2012 року № 5403-VI. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

57. Про затвердження Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій: Наказ МВС України від 06 серпня 2018 року № 658. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0969-18#Text>

58. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019-2010. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text>

59. Про затвердження Порядку класифікації НС техногенного та природного характеру: Постанова Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 року № 368. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/368-2004-%D0%BF#Text>

60. Tiutiunyk V., Kalugin V., Pysklakova O., Levterov A., Zakharchenko Ju. Development of Civil Defense Systems and Ecological Safety. *IEEE Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2019. 295–299. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10259>

61. Система містобудівної документації: ДБН Б.1.1-5:2007. Київ. Мінрегіонбуд України. 2007. 28. <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-172>

62. Державна система захисту критичної інфраструктури в системі забезпечення національної безпеки: аналіт. доп. За ред. О.М. Суходолі. Київ. Національний інститут стратегічних досліджень. 2020. 28.

63. Бобро Д.Г. Визначення критеріїв оцінки та загрози критичній інфраструктурі. *Стратегічні пріоритети. Серія: Економіка*. 2015. 4. 83–93.

64. Яременко О.І., Страхніцький Я.О. Теоретико-методичні основи забезпечення системи захисту критичної інфраструктури держави. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2022. 1. https://www.dy.nayka.com.ua/pdf/1_2022/40.pdf

65. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту: ДБН В.1.2-4:2020. Київ. Мінрегіон України. 2020. 47.

66. Про затвердження Порядку функціонування системи моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій, проведення моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій: Постанова Кабінету Міністрів України від 17 вересня 2025 року № 1171. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1171-2025-%D0%BF#Text>

67. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16 листопада 2021 року № 1882-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#top>

68. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 року № 1109. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>

69. Про затвердження Порядку проведення моніторингу рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 22 липня 2022 року № 821. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/821-2022-%D0%BF#Text>

70. Про затвердження Регламенту обміну інформацією між суб'єктами національної системи захисту критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 року № 1174. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1174-2022-%D0%BF#Text>

71. Деякі питання Державної служби з надзвичайних ситуацій: Постанова Кабінету Міністрів України від 10 травня 2024 року № 535. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/535-2024-п#Text>

72. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту: Постанова Кабінету Міністрів України від 09 січня 2014 року № 11. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>

73. Питання мережі ситуаційних центрів: Постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2023 року № 535. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/705-2023-%D0%BF#Text>

74. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Пискалова О.О. Основоположні принципи створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2018. 4(50). 168–177.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411>

75. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Пискалова О.О. Оцінка умов створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій на основі аналізу динаміки прояву небезпек на території України. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*.

Харків. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. 2019. 1(147). 66–82.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10272>

76. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Писклакова О.О. Управлінські основи створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Вісник національного університету цивільного захисту України. Серія: Державне управління*. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2020. 1(12). 546–571.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11625>

77. Тютюник В.В., Яценко О.А., Рубан І.В., Тютюник О.О. Особливості функціонування системи ситуаційних центрів на різних стадіях розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ. Національний університет оборони України. 2022. 1(43). 41–52.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15894>

78. Про затвердження Методичних рекомендацій з організації ситуаційних центрів: Наказ ДСНС від 06 серпня 2018 року № 514.

79. Операційний центр запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій. <https://magneticnemt.com/operatsijnyj-sytuatsiinyi-tsentr/>

80. Федеральне агентство з управління надзвичайними ситуаціями (FEMA). National Response Coordination Center (NRCC). <https://www.fema.gov/>

81. Кабінет Міністрів Великобританії. Crisis Management. <https://www.gov.uk/government/organisations/cabinet-office>

82. Японське метеорологічне агентство. Earthquake Information. <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>

83. Уряд Австралії. Australian Government Crisis Coordination Centre. <https://www.gov.au/government/organisations/department-of-home-affairs>

84. Telenyk S. The Experience of Legal Regulation of the Critical Infrastructure Protection System in the United States. *Scientific Journal of the National Academy of Internal Affairs*. 2018. 23(2). 358-370.

85. Бонк А. Захист критичної інфраструктури: досвід США. ІГС Україна. 2019. <https://ig-security.tech/zahist-kritichnoi-infrastrukturi-dosvid-ssha.html>
86. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). Critical Infrastructure Security and Resilience. <https://www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience>
87. TÜV Informationstechnik GmbH. KRITIS – Kritische Infrastrukturen. <https://www.tuvit.de/de/leistungen/informationssicherheitsmanagement/kritis>
88. National Cyber Security Centre (NCSC). Official Website. <https://www.ncsc.gov.uk>
89. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). Approaches to Protecting Critical Information Infrastructures within National Cyber Security Strategies. [https://resilience.enisa.europa.eu/enisas-ncss project/CIIPApproachesNCSS.pdf](https://resilience.enisa.europa.eu/enisas-ncss-project/CIIPApproachesNCSS.pdf)
90. Rheinmetall brings Acoustic Shooter Locating System (ASLS) to market. <https://www.defenceweb.co.za/land/land-land/rheinmetall-brings-acoustic-shooter-locating-system-asls-to-market/>
91. Acoustic shooter locating system. <https://www.rheinmetall.com/en/products/c4i/reconnaissance-and-sensor-systems/asls-acoustic-shooter-locating-system#anchor-optional>
92. Boomerang Shooter Detection Technology. <https://milcom-security.com/wp-content/uploads/BoomerangGeneral-102010-5.pdf>
93. Projectile Detection and Cueing (PDCue). https://defense-update.com/20070511_pdcue.html#google_vignette
94. PEARL – Gunshot detection sensor for personal or group weapons. https://issuu.com/robertbreedveld/docs/bss_holland_gunshot_detectie_pearl
95. Surveillance and Threat Detection Systems. <https://www.dbkes.com.tr/brosur/pilarw.pdf>
96. Офіційний сайт компанії Microflown Avisa. <https://www.microflown-avisa.com/technology>

97. Sniper Egg. Detecting the threat. Protecting our forces. <https://defenceforumindia.com/attachments/sniper-egg-pdf.8391/>
98. PinPoint™ – Dismount Shot Detection Systems. <https://www.yumpu.com/en/document/view/11476334/pinpointtm-dismount-shot-detection-systems>
99. Локатор джерела пострілу. <https://ames.kpi.ua/lokator-dzherela-postrilu/>
100. Al-Emadi S., Al-Ali A., Al-Ali A. Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks. *Sensors*. 2021. 21, 4953. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4953>
101. Utebayeva D., Ilipbayeva L., Matson E.T. Practical Study of Recurrent Neural Networks for Efficient Real-Time Drone Sound Detection: A Review. *Drones*. 2023. 7. 26. <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/1/26>
102. SoundCom Technologies. <https://www.soundcom.net/>
103. DroneShield is the world-leading innovator in counterdrone solutions. <https://www.droneshield.com/>
104. ParaZero Drone Safety Solutions. <https://parazero.com/home/>
105. DRONELOCK ~ Drone Against Drone System. <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/27749-dronelock-drone-against-drone-system>
106. Сокольський С.О., Мовчанюк А.В. Алгоритм оброблення аудіосигналів із використанням методу машинного навчання. *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. Серія: *Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2023. 93. 39–51. DOI: 10.20535/RADAR.2023.93.39-51. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/5d1e6e37-6af3-45cf-b0df-af91b2397ae4/content>
107. SMART-інфраструктура у сталому розвитку міст: світовий досвід та перспективи України. Київ. Центр Разумкова. Видавництво «Заповіт». 2021. 398. <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf>

108. Smart Citi Ukraine: що це та як це працює в українських реаліях. <https://visitukraine.today/uk/blog/2183/smart-city-ukraine-shho-ce-ta-yak-ce-pracyuje-v-ukrainskix-realiyah>
109. Касич А.О., Федоряк Р.М., Собяніна А.П. Інноваційна технологія «SMART CITY» як механізм покращення рівня життя в сучасному місті. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Економіка і менеджмент*. 2017. 27. 1. 50–54. <http://www.vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2017/27-1-2017/13.pdf>
110. Чукут С.А., Дмитренко В.І. Смарт-сіті чи електронне місто: сучасні підходи до розуміння впровадження Е-урядування на місцевому рівні. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. 13. 89–93. http://www.investplan.com.ua/pdf/13_2016/17.pdf
111. Андрієнко А.О. Концепція «розумного міста»: уточнення ключових понять у контексті забезпечення розвитку великого муніципального утворення. *Аспекти публічного правління*. 2018. 6. 8. 24–34. <https://aspects.org.ua/index.php/journal/article/view/432/432>
112. Мужанова Т.М. «Розумне місто» як інноваційна модель управління. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2017. 2(20). 116–122. <http://journals.dut.edu.ua/index.php/emb/article/view/1515/1447>
113. Севастьянов Р.В. Актуальні проблеми розвитку «Розумних міст» (SMART CITY). *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. 2. 170–175. <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/08/2021-2-en-30.pdf>
114. Що таке «Smart City» і як виглядає в українських реаліях? <https://www.prostir.ua/?news=scho-take-smart-city-i-yak-vyhlyadaje-v-ukrajinskyh-realiyah>
115. Розумне місце майбутнього: 5 ключових технологій. <https://futurenow.com.ua/rozumne-misto-majbutnogo-5-klyuchovyh-tehnologij/>
116. Що потрібно знати про Smart City. <https://maxnet.ua/blog/chto-nuzhno-znat-o-smart-city/>

117. Розумні міста України. Що таке смарт-сіті і як це працює. <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/obzor/umnye-goroda-ukrainy-hto-takoe-smart-siti-i-kak-eto-rabotaet/>

118. SMART CITY: технології «розумного міста» та їх цільове призначення. <https://eukraine.org.ua/ua/news/smart-city-tehnologiyi-rozumnogo-mista-ta-yih-cilove-priznachennya>

119. SMART CITY: розумні технології сучасного міста. <https://hub.kyivstar.ua/news/smart-city-rozumni-tehnologiyi-suchasnogo-mista/>

120. Данченко О.Б. Практичні аспекти реінжинірингу бізнес-процесів. Київ. Університет економіки та права «КРОК». 2017. 238. https://library.krok.edu.ua/media/library/category/navchalni-posibniki/danchenco_0001.pdf

121. Латишева О.В., Касьянюк С.В., Баранов Р.Р., Закіров Р.Р. Функціональне моделювання як інструментарій аналізу фінансового стану підприємств. *Управління економікою: теорія та практика*. Київ. Інститут економіки промисловості НАН України. 2019. 178–184. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/169765/13-Latysheva.pdf?sequence=1>

122. Тютюнник В.В., Тютюнник О.О., Усачов Д.В. Особливості створення системи акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій у контексті розвитку концепції «Smart City». *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. 2(16). 58–76. DOI: 10.33269/nvcz.2023.2.58-76. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19263>

123. Гапаченко С.Д., Шелест Т.М., Кривоніс С.С.. Основи спектрального аналізу. Харків. НТУ «Харківський політехнічний інститут», 2024. 68. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/eb72151f-485f-4331-9992-12553a9915d4/content>

124. Москаленко О.В., Циганков С.А., Янченко В.О., Циганков А.С. Спектральні методи аналізу. Ніжин. Видавництво НДУ імені Миколи Гоголя, 2022. 276.

125. Перелигін Б.В., Ткач Т.Б., Гор'єв С.А. Спектрально-часовий аналіз даних моніторингу. Одеський державний екологічний університет. Одеса. ТЕС. 2017. 124.

http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/688/1/PerelyginBV_TkachTB_GorjevSA_Spekt6ralno-chasovy_analis_danyh_monitoringa_2018.pdf

126. Рубан І.В., Тютюник В.В., Тютюник О.О. Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ. Національний університет оборони України. 2021. 1(40). 75–84. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14232>

127. Николишин М.Й. Проектування радіотехнічних систем. Львів. Видавництво Львівська політехніка. 2023. 360.

128. Гончаренко Ю.Ю. Фізична модель знімання мовної інформації. *Системи обробки інформації*. Харків. Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2014. 7(123). 18–23.

129. Луценко В.І., Луценко І.В., Мазуренко О.В., Соболяк О.В. Характеристики акустичних полів наземних і малорозмірних повітряних об'єктів акустичної розвідки. *Прикладна радіоелектроніка*. Харків. Харківський університет радіоелектроніки. 2017. 16. 1, 2. 18–22.

https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/are_3.pdf

130. Дівізінюк М., Гончаренко Ю., Гончаренко Д. Про проблему розрахунку дальності прийому акустичної інформації з відкритих майданчиків. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. Київ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 2012. 1(23). 29–35.

131. Поздняков В.В., Бугайов М.В. Аналіз акустичних сигналів засобів повітряного нападу. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. Житомир. Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, 2023. 25(І). 58–75.

<http://znp.zvir.zt.ua/article/view/299286/291834>

132. Oleynikov V.N., Zubkov O.V., Kartashov V.M., Korytsev I.V., Babkin S.I., Sheiko S.A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic radiation. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. 78. 9. 759–770.

133. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Строган О.І., Бойко О.О. Визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2022. 3(71). 49–59.

134. Чернишов М.І., Куценко В.В. Оцінка точності визначення положення БПЛА різницево-далекомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації зенітних комплексів малої дальності. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. 2. 61–66.

135. Крушельницька О.В. Методологія та організація наукових досліджень. Київ. Кондор. 2003. 192.

136. Тютюник В.В., Кустов М.В., Тютюник О.О. Планування та обробка результатів експерименту у сфері цивільного захисту. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2025. 382.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25303>

137. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т., Грабко В.В. Основи метрології та електричних вимірювань. Вінниця. Вінницький національний технічний університет. 2012. 522.

138. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В., Коврегін В.В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Харків. Національний університет цивільного захисту України, 2020. 408.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11382>

139. Кусковець С.Л., Шаталов О.С., Турченко В.О. Основи теорії горіння та вибуху. Рівне. Національний університет водного господарства та природокористування. 2012. 374.

140. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки. Харків. Академія цивільного захисту України. 2006. 395.

141. Єлагін Г.І., Шкарабура М.Г., Кришталь М.А., Тищенко О.М. Основи теорії розвитку і припинення горіння. Черкаси. Черкаський інститут пожежної безпеки. 2001. 448.

142. Системи протипожежного захисту: ДБН В.2.5-56:2014. Зміна № 2. Київ. Міністерство розвитку громад та територій України. 2025. 44. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3765114643836568980/2025-11-13/36f12dc3-70da-4f53-aaa4-3596a4c3442f.pdf

143. Системи пожежної сигналізації. Частина 7. Сповіщувачі пожежні димові точкові розсіяного світла, пропускового світла чи іонізаційні: ДСТУ EN 54-7:2019 (EN 54-7:2018, IDT).

144. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 12. Сповіщувачі пожежні димові лінійні пропущеного світла: ДСТУ EN 54-12:2019 (EN 54-12:2015, IDT).

145. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 14. Настанови щодо побудови, проектування, монтування, введення в експлуатацію, експлуатування і технічного обслуговування: ДСТУ-Н CEN/TS 54-14:2009 (CEN/TS 54-14:2004, IDT).

146. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 22. Сповіщувачі пожежні теплові лінійні відновлювані: ДСТУ EN 54-22:2021 (EN 54-22:2015+A1:2020, IDT).

147. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 29. Пожежні відеосповіщувачі: ДСТУ ISO/TS 7240-29:2022 (ISO/TS 7240-29:2017, IDT).

148. Андронов В.А., Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Калугін В.Д., Тютюнник В.В. Науково-технічні основи синтезу системи моніторингу надзвичайних ситуацій на території України в рамках державної політики в галузі цивільного захисту. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. 2016. 4(49). 150–159.

149. Omair Ghori, Anton Stadler, Stefan Wilk, Wolfgang Effelsberg. Video Based Ambient Smoke Detection by Detecting Directional Contrast Decrease

Analyses. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*. 2016. 10. 9. 1584–1589.

150. Андронов В.А., Калугін В.Д., Левтеров О.А., Тютюник В.В. Методологія синтезу системи моніторингу надзвичайних ситуацій за основними характеристиками технічних засобів реєстрації факторів небезпек. *Прикладна радіоелектроніка*. 2016. 15. 4. 327–333.

151. Rohini Jadhav, P.D. Lambhate. A Methodological Survey for Fire Detection in Camera Surveillance. *International Journal of Science and Research*. 2016. 5. 1. 215–217.

152. Дерев'янку О.А., Христич В.В., Бондаренко С.М., Мурін М.М., Антошків О.А. Автоматичний протипожежний захист об'єктів. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2014. 282.

153. Chen-Yu Lee, Chin-Teng Lin, Chao-Ting Hong, Miin-Tsair Su. Smoke Detection Using Spatial and Temporal Analyses. *International Journal of Innovation Computing, Information and Control*. 2012. 8. 7(A). 4749 – 4770.

154. Yasmin R. Detection of Smoke Propagation Direction Using Color Video Sequences. *International Journal of Soft Computing*. 2009. 4(1). 45–48.

155. Wen-Bing Horng, Jian-Wen Peng Tamkang. A Fast Image-Based Fire Flame Detection Method Using Color Analysis. *Journal of Science and Engineering*. 2008. 11. 3. 273–285.

156. Edmans M. Guide to Intelligent Fire Systems. System Sensor Europe. 2004. 34.

157. Ghadarah N., Ayre D. A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of Polymer-Based composites. *Sensors*. 2023. 23. 6945. <https://doi.org/10.3390/s23156945>

158. Hauser T., Reisch R.T., Kamps T., Kaplan A.F.H., Volpp J. Acoustic emissions in directed energy deposition processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 119. 3517–3532. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08598-8>

159. Huijjer A., Kassapoglou C., Pahlavan L. Acoustic emission monitoring of carbon fibre reinforced composites with embedded sensors for In-Situ damage identification. *Sensors*. 2021. 21. 6926. <https://doi.org/10.3390/s21206926>

160. Fevotte G., Wang X.J., Ouabbas Y. Acoustic emission, a new sensor for monitoring industrial crystallization processes. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. 47. 3. 2727–2733. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01478>

161. Dang V.H., Beroual A., Rozga P. Fractal dimensions analysis of branching streamers propagating in mineral oil. *Archives of Electrical Engineering*. 2022. 71(3). 659–669. <https://doi.org/10.24425/ae.2022.141677>

162. Souza F.C., Franco S.D., Arencibia R.V., Leal J.E.S., Teodoro E.B., Neto F.F.R. Acoustic emission assessment of measurement errors caused by gaps in chemical composition analyzes carried out using a portable spark spectrometer. *Measurement*. 2020. 151. 107105.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107105>

163. Ospitia N., Korda E., Kalteremidou K.-A., Lefever G., Tsangouri E., Aggelis D.G. Recent developments in acoustic emission for better performance of structural materials. *Developments in the Built Environment*. 2023. 13. 100106. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100106>

164. Guo J., Shang H., Cai G., Jin Y., Wang K., Li S. Early detection of coal spontaneous combustion by complex acoustic waves in a concealed fire source. *ACS Omega*. 2023. 8. 19. 16519–16531. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00199>

165. Левтеров О.А., Тютюнник В.В., Калугін В.Д., Ольховіков С.В. Використання ефекту акустичної емісії для раннього виявлення загорання матеріалів, що містять целюлозу, об'єктові підсистеми універсальної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні. *Прикладна радіоелектроніка*. Харків. Харківський університет радіоелектроніки. 2017. 16. 1–2. 23–40.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5938>

166. Левтеров О.А., Тютюнник В.В., Калугін В.Д. Методи ідентифікації процесу горіння целюлозомістких матеріалів на основі ефекту акустичної емісії.

Проблеми пожежної безпеки. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2017. 42. 72–84.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5939>

167. Levterov A.A. Acoustic research method for burning flammable substances. *Acoustical Physics*. 2019. 65. 4. 444–449.

<https://doi.org/10.1134/S1063771019040109>

168. Левтеров О.А., Калугін В.Д., Тютюник В.В. Пат. 127254 Україна, МПК (2006) А62С 3/00, G01R 29/26 (2006.01), G08С 19/00, G08В 31/00. Спосіб раннього виявлення осередку займання. Власник патенту: Національний університет цивільного захисту України. № u201801387; заявл. 12.02.2018; опубл. 25.07.2018, бюл. № 14. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8423>

169. Снитюк В.Є. Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми. Київ. «Маклаут». 2008. 364.

170. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних. Запоріжжя: КПУ. 2011. 268.

171. Руденко В.М. Математична статистика. Київ. Центр учбової літератури. 2012. 304.

172. Берзлев О.Ю. Методика передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів. *Управління розвитком складних систем*. 2013. 16. 76–81.

<https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-16/17.pdf>

173. Тютюник В.В., Левтеров О.А., Тютюник О.О., Усачов Д.В. Розвиток науково-технічних основ створення геоінформаційної системи акустичного моніторингу масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами на території міста. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. 1(49). 111–127. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127>

174. Tiutiunyk V., Kalugin V., Levterov A., Sydorenko O., Starodubtsev S., Usachov D. Establishing the Nature of Kinetic Effects of the High-Temperature Oxidation (Combustion) Process of Some Liquid Organic Matters by Acoustic Radiation. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2023. 6. 203–212. [10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212)

175. Wu Z., Lou Y., Yin S., Wang A., Liu H., Sun W., Zuo Y., Chen B. Acoustic and fractal analyses of the mechanical properties and fracture modes of bedding-containing shale under different seepage pressures. *Energy Science and Engineering*. 2020. 8. pp. 3638–3656. <https://doi.org/10.1002/ese3.772>

176. Yang H. Fractal analysis of acoustic emission parameter series of coal with different properties under uniaxial loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. 81. 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012071>

177. Ляпа М.М., Петренко В.М., Судніков О.І., Житник В.Є., Макеєв В.І. Вогнева підготовка. Суми. Сумський державний університет. 2011. 283.

178. Герасименко О.І., Рахманов В.О. Вогнева підготовка. Київ. Національний авіаційний університет. 2007. 118.

179. Глущенко В.Ф., Безносюк Л.В., Колоколов А.О., Мовчан А.В., Мельник Ю.В., Кузьмін В.І. Вогнева підготовка. Вінниця. «ДТП». 1998. 160.

180. Біленко О.І., Мартинов І.В. Методика формування вимог до характеристик шуму пострілу для забезпечення прихованого виконання вогневих завдань силами безпеки. *Честь і закон*. 2022. 3(82). 91–98.

181. Тютюнник В.В., Левтеров О.А., Тютюнник О.О., Усачов Д.В. Розвиток науково-технічних основ акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2024. 2(40). 269–292. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-19. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24173>

182. Серватюк В., Лисий М. Аналіз наукових підходів щодо розвитку і застосування безпілотних літальних апаратів у сучасних воєнних конфліктах. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України*. 2024. 1(94). 97–105.

183. Захарко А.В., Пиріг І.В., Поливанюк В.Д., Санакоєв Д.Б. Використання безпілотних літальних апаратів під час огляду місця події. Дніпро. Дніпровський державний університет внутрішніх справ. 2024. 32.

184. Калашнікова В. Аналіз та моделювання методів управління роєм безпілотних літальних апаратів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. 4(30). 67–84. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.067>

185. Шовкошитний І.І., Василенко О.А. Розроблення логіко-часової моделі ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів з урахуванням типових способів їх групового застосування в сучасних умовах. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України*. 2024. 3(83). 108–116. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116>

186. Саковський А.А., Науменко С.М., Кравченко С.І., Єфіменко І.М., Білозьоров Є.В., Засенко Б.В., Патик А.А. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції. Київ. Національна академія внутрішніх справ. 2022. 72.

187. Захарченко Ю.В., Іванець Г.В., Іванець М.Г., Калугін В.Д., Тютюнник В.В. Формування трас польоту безпілотних літальних апаратів під час оперативного моніторингу окремої місцевості, де сталася надзвичайна екологічна ситуація. *Науково-технічний журнал «ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА»*. 2022. 11(1). 23–33. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2022.1.4>

188. Мосов С. БпЛА – перспективний засіб радіаційної, хімічної та біологічної розвідки. *Пожежна та техногенна безпека*. 2021. 11. 16–19.

189. Мосов С., Нероба В., Селюков О. Особливості застосування безпілотного літального апарата в надзвичайних ситуаціях. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. 1(9). 34–41. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.34-41>

190. Мосов С. Створення системи безпілотної авіації у складі ДСНС – актуальне питання сьогодення. *Пожежна та техногенна безпека*. 2020. 10. 12–15.

191. Мосов С. Ера безпілотної авіації у сфері цивільного захисту. *Пожежна та техногенна безпека*. 2020. 11. 14–16.
192. Микійчук М.М., Зіганшин Н.С. Метрологічне забезпечення моніторингу з використанням безпілотних літальних апаратів. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. 79. 4. 47–53.
193. Опенько П.В., Ткачов В.В., Кобзев В.В., Васильєв В.А. Застосування безпілотних літальних апаратів для контролю параметрів радіолокаційних засобів зенітних ракетних комплексів. *Наука і оборона*. 2017. 3/4. 61–65.
194. Тютюник В.В., Левтеров О.А., Тютюник О.О., Усачов Д.В. Акустичний метод ідентифікації застосування безпілотних літальних апаратів як джерел надзвичайних ситуацій. *Social Development and Security*. 2024. 15(1). 300–312. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26>
195. Про Концепцію (основи державної політики) національної безпеки України: Постанова Верховної Ради України від 16 січня 1997 р. № 569-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3/97-%D0%B2%D1%80#Text>
196. Про Концепцію розвитку сектору безпеки і оборони України: Указ Президента України Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 4 березня 2016 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002525-16#Text>
197. Про основи національного спротиву: Закону України від 16 липня 2021 року № 1702-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1702-20#Text>
198. Кулешов М.М., Садковий В.П., Тютюник В.В. Державна система цивільного захисту. Харків. Друкарня «Мадрид». 2020. 232. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11130>
199. Євсєєв В.О. Можливі шляхи удосконалення захисту критичної інфраструктури України з урахуванням світового досвіду. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2016. 4. 168–172. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2016_4_35
200. Брежнєв Є.В., Фесенко Г.В., Харченко В.С. Методологічні засади оцінювання та забезпечення безпеки критичних інформаційних інфраструктури.

Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2018. 4. 78–85.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2018_4_10

201. Салієва О.В., Яремчук Ю.Є. Симпліціальний аналіз структури когнітивної моделі для дослідження захищеності об'єкта критичної інфраструктури. *Регістрація, зберігання і обробка даних.* 2020. 22. 3. 68–75.

<http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001200603>

202. Мілявський Ю.Л. Когнітивне моделювання складних систем. Проєктування та аналіз когнітивних моделей. Київ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

2025. 39. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/3c03af72-c07a-4a10-bc76-4b7e37d9bae8/content>

203. Тютюник В.В., Тютюник О.О., Усачов Д.В. Особливості застосування нечітких когнітивних карт для сценарного моделювання функціонування критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій воєнного характеру. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони.* 2025. 3(54). 93–102. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-54-3-93-102>

204. Щодо удосконалення мережі ситуаційних центрів та цифрової трансформації сфери національної безпеки і оборони: Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 04.06.2021. Введено в дію Указом Президента України від 18 червня 2021 року № 260/2021.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text>

205. Tiutiunyk O., Ruban I., Tiutiunyk V. Development of Scientific Basis for Decision Support by Experts of the Situational Center Under Conditions of Uncertainty of Input Information in Emergency Situations. *IEEE Problems of Infocommunications. Science and Technology.* October. 2021. 261–266.

206. Про схвалення Концепції розвитку та технічної модернізації системи централізованого оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 31 січня 2018 року № 43-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/43-2018-%D1%80>

207. Особливості цивільного захисту в умовах воєнного конфлікту:

Коллективна монографія. За редакцією Роберто Мугаверо, Володимира Андронова та Максима Кустова. Харків–Рим, 2023.

208. Тютюник В. В., Усачов Д. В. Удосконалення методу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору. *Social Development and Security*. 2025. 15(2). 190–201. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.2.18>

209. Про затвердження Інструкції про порядок взаємодії між Державною службою України з надзвичайних ситуацій, Національною поліцією України та Національною гвардією України у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації, пожежі та небезпечні події: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 22 серпня 2016 року № 859. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 14 вересня 2016 року за № 1254/29384.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-16#Text>

210. Про затвердження Інструкції про порядок взаємодії територіальних органів поліції та міжрегіональних територіальних органів Національної поліції України під час реагування на надзвичайні ситуації, у випадку уведення правового режиму воєнного чи надзвичайного стану: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 31 жовтня 2016 року № 1129. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 19 січня 2017 року за № 85/29953.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0085-17#Text>

211. Про Збройні Сили України: Закон України від 06 грудня 1991 року № 1934-XII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1934-12#Text>

212. Про Службу безпеки України: Закон України від 25 березня 1992 року № 2229-XII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2229-12#Text>

213. Про Національну поліцію: Закон України від 02 липня 2015 року № 580-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/580-19#Text>

214. Про Національну гвардію України: Закон України від 13 березня 2014 року № 876-VII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/876-18#Text>

215. Про затвердження Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій: Постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня

2015 року № 1052. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1052-2015-%D0%BF#Text>

216. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 26 квітня 2018 року № 340. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10 липня 2018 р. за № 801/32253.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text>

217. Про затвердження положення про спеціалізовані служби цивільного захисту: Постанова Кабінету Міністрів України від 08 липня 2015 року № 469.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/469-2015-%D0%BF>

218. Про затвердження типового положення про регіональну та місцеву комісію з питань техногенно-екологічної безпеки і надзвичайних ситуацій: Постанова Кабінету Міністрів України від 17 червня 2015 року № 409.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/409-2015-%D0%BF>

219. Про затвердження плану реагування на надзвичайні ситуації державного рівня: Постанова Кабінету Міністрів України від 18 березня 2018 року № 223. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/223-2018-%D0%BF>

ДЛЯ ПОДАТОК