

Національний університет цивільного захисту України  
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Усачов Дмитро Володимирович

УДК 351.861

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ МІСЦЕВОГО РІВНЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЇХ ДЖЕРЕЛ

Спеціальність – 263 Цивільна безпека

Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ Д. В. Усачов

Науковий керівник

Тютюник Вадим Володимирович,  
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Усачов Д. В.* Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня за результатами акустичного моніторингу їх джерел. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – цивільна безпека – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання у галузі цивільного захисту – удосконаленню процесу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня, шляхом впровадження акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст їх джерел.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИНЦИПІВ ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МІСЦЕВОГО РІВНЯ встановлено, що територія великих населених пунктів України є складною багатофункціональною системою, яка піддається впливу різних видів небезпек – природних, техногенних, соціальних та воєнних. Функціонування критичної інфраструктури міста є основою його стабільності, безпеки та сталого розвитку, проте низка ризиків може суттєво порушити життєдіяльність міських процесів. Вплив цих небезпек може мати як локальні, так і масштабні наслідки, що проявляються у вигляді економічних, соціальних та екологічних втрат. Для забезпечення сталого розвитку міст необхідно впроваджувати ефективні механізми управління ризиками, удосконалювати нормативно-правову базу та підвищувати рівень адаптації інфраструктури до сучасних викликів.

Проведено аналіз надзвичайних ситуацій, які пов'язані з масштабними пожежами, терористичними актами та випадками застосування безпілотних

літальних апаратів на території України показав, що більшість небезпечних подій мають наслідки від агресії та в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану, що призводить до значних втрат у інфраструктурі та серед населення. Такі інциденти підтверджують необхідність посилення заходів запобігання виникненню надзвичайних ситуацій та вдосконалення процедур реагування на них. Використання вогнепальної зброї під час терористичних актів створює серйозну загрозу громадській безпеці. Велика кількість нелегальної зброї, що знаходиться в руках злочинців, ускладнює її обіг і контролювання, що сприяє зростанню рівня злочинності та збільшує ризики для життя та здоров'я громадян. Окрім вогнепальної зброї за останні два роки зріс відсоток випадків застосування безпілотних літальних апаратів, зокрема для терористичних атак, що свідчить про серйозну загрозу для житлової та критичної інфраструктури міст держави. Величезне збільшення обсягів виробництва безпілотних літальних апаратів підкреслює їх важливу роль у сучасних військових та гуманітарних конфліктах, що вимагає впровадження нових стратегій для боротьби з цією загрозою.

Проведено аналіз правових засад запобігання надзвичайних ситуацій у містах України та захисту критичної інфраструктури ґрунтуються на національному законодавстві, узгодженому з міжнародними правовими нормами. Діяльність Державної служби України з надзвичайних ситуацій у цій сфері спрямована на зміцнення співпраці з Механізмом цивільного захисту Європейського Союзу, що дозволяє ефективно здійснювати моніторинг потенційних загроз, прогнозувати ризики, розробляти заходи щодо підвищення безпеки, включаючи створення систем оповіщення, планування евакуаційних маршрутів і вдосконалення інфраструктури цивільного захисту.

Проведений аналіз стану запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій 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, Великобританія, Німеччина та Японія, використовують централізовані

платформи для обробки великих обсягів даних, що забезпечує швидке реагування та прийняття рішень у кризових ситуаціях.

Проведено аналіз існуючих схемних рішень моніторингу попередніх факторів різного роду небезпечних подій як джерел надзвичайних ситуацій показав, що на сьогодні одним із напрямків раннього виявлення на території міста джерел надзвичайних ситуацій воєнного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів у акустичному діапазоні

У другому розділі РОЗРОБКА СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ МІСТА ЯК СКЛАДОВОЇ ПРОЦЕСУ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ МІСЦЕВОГО РІВНЯ розроблена (за стандартом IDEF0) структурно-функціональна модель особливостей функціонування системи безпеки міста, з урахуванням нормативно-правової бази України та наявності в державі відповідних механізмів (ресурсів). В 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 в 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 надзвичайних ситуацій місцевого рівня потребує розробки міської системи оперативного моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій на основі спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації небезпечних подій, з подальшою розробкою рішень щодо управління службами безпеки та комунальними службами міста.

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 надзвичайних ситуацій різного характеру. При цьому, встановлено, що основним показником ефективності функціонування підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони надзвичайних ситуацій 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.

У **третьому розділі ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТЕФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ МІСЦЕВОГО РІВНЯ** представлені результати досліджень можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня. Основу проведених досліджень становить аналіз амплітудно-частотних характеристик звукових коливань, які є унікальними для кожного типу небезпечних подій. Зокрема, дослідження спрямовані на вивчення характеристик звуків, які виникають під час пожеж з рідкими органічними речовинами, терористичних актів із використанням вогнепальної зброї та безпілотних літальних апаратів.

За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних з 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 акустичної емісії, визначається фізичними та фізико-хімічними термодинамічними параметрами процесу.

Досліджено ефект «спалаху», тобто час первинного процесу горіння парів рідких органічних речовин, та встановлено однозначну залежність тривалості даного процесу від парціального тиску парів над чистим розчинником та температурою

спалаху або займання. Встановлено, що чим більше парціальний тиск парів і менше температурою 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 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 акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких органічних речовин, що дозволяє зменшити ступінь помилкових спрацьовувань акустичного пристрою виявлення на території міста джерел масштабних пожеж та встановлення природи пального матеріалу в осередку займання.

За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, 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 пістолету Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолету «Форт-14Р» та автомату 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.

За результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів, удосконалено метод автоматичного виявлення безпілотних літальних апаратів та визначення їх типів на основі акустичних сигналів,

який поєднує кластерний аналіз і вейвлет-аналіз. Застосування удосконаленого методу для трьох експериментальних моделей безпілотних літальних апаратів – Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK, DJI Mavic 3t та FPV 7inch ProDrone дозволило з ймовірністю до 90 % точно ідентифікувати тип безпілотних літальних апаратів за їх акустичним сигналом. Розроблено алгоритм виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів, який базується на методі вейвлет-аналізу. Цей метод дозволяє отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектру безпілотних літальних апаратів.

У четвертому розділі УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ МІСЦЕВОГО РІВНЯ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ розроблено когнітивну модель функціонування об'єкту критичної інфраструктури в умовах впливу різного роду загроз, де ключові компоненти системи розбиті 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 безпілотних літальних апаратів, застосування вогнепальної зброї, інформаційні, пожежні тощо) та враховують ступінь їх впливу на рівень нормального функціонування об'єкту. Наслідки від цих небезпек об'єднали соціальні, матеріальні та екологічні збитки. Четверта група об'єднала елементи системи акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій. Проведено структурно-топологічний аналіз побудованих нечітких когнітивних карт 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 значимість в умовах уведення в

державі правового режиму воєнного стану при загрозах пожеж, а також застосування безпілотних літальних апаратів та вогнепальної зброї.

Проведено сценарне моделювання максимального негативного впливу найвагоміших концептів системи загроз на рівень безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Встановлено, що ці загрози безпосередньо впливають на ключові показники повсякденного функціонування та призводить до таких значних наслідків як соціальні та матеріальні збитки. Ці зміни вказують на необхідність посилення захисних заходів для мінімізації ризиків та забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури 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 безпілотних літальних апаратів та терористичних дій) на показники зовнішніх та внутрішніх загроз на нормальне функціонування об'єктів критичної інфраструктури, встановлено підвищення рівня захисту критичної інфраструктури міста на 40–50 %.

Розроблено керуючий алгоритм методу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру 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 амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

Показано, що основні служби міста об'єднують підрозділи Збройних Сил України, Служби безпеки України, Міністерства внутрішніх справ України, Національна гвардія України, Національна поліція України, Державної служба України з надзвичайних ситуацій, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, оператори критичної інфраструктури та комунальні служби, функції яких взаємопов'язані у мирний час, а також в особливий період, у тому числі в умовах воєнного стану, в умовах надзвичайного стану та під час виникнення кризових ситуацій.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. *Вперше 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), де 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. В розроблену модель закладено принципи та критерії ефективності застосування спектрального аналізу акустичного простору міста для неперервного та тривалого реального часу оперативного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня.

2. *Вперше розроблено* когнітивну модель особливостей функціонування критичної інфраструктури міста в умовах загроз та ефективності застосування акустичного моніторингу для запобігання надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня, з врахуванням взаємозв'язків між показниками фінансування, ресурсного забезпечення, станом технологічного обладнання, якістю продукції, а також чисельністю і кваліфікацією персоналу. Крім того, в моделі враховується негативний вплив на умови нормального функціонування об'єкту різних зовнішніх та внутрішніх загроз (у вигляді фінансових ризиків, природних ризиків, техногенних ризиків, соціальних ризиків, інформаційних ризиків, пожежних ризиків тощо) та наслідки від них у вигляді соціальних, матеріальних та екологічних збитків, а також враховується позитивний вплив результатів впровадження системи акустичного

моніторингу (яка сприяє своєчасному виявленню та ідентифікації пожежних загроз, атак із застосуванням безпілотних літальних апаратів та терористичних дій із застосуванням вогнепальної зброї).

3. *Набув подальшого розвитку*, за результатами експериментальних досліджень можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації небезпечних подій на території міст, метод запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня. До керуючого алгоритму реалізації цього методу включено 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 амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС воєнного характеру місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в удосконаленні підходу щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій на території міста, за бази безперервного та тривалого у реальному масштабі часу оперативного використання моніторингових даних щодо типу, місця виникнення та динаміки розвитку джерел надзвичайних ситуацій пов'язаних з масштабними пожежами, а також із застосуванням вогнепальної зброї та безпілотних літальних апаратів. Розроблений в дисертації керуючий алгоритм визначення відповідних рішень щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня за даними акустичного моніторингу може бути використаний для розробки та створення автоматизованої системи безпеки міст, що підвищить ефективність функціонування місцевих ланок територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту.

Практичне впровадження основних результатів дослідження було здійснено в підрозділах Головних управлінь ДСНС України в Харківській та Хмельницькій областях, а також у навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України та Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, пожежа, запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, моніторинг надзвичайних ситуацій, горіння, безпілотний літальний апарат, вогнепальна зброя, обробка акустичних сигналів, моделювання, реагування на надзвичайну ситуацію, підтримка прийняття рішень.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

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

1. 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. No. 6. P. 203–212. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212> (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, DOAJ, EBSCOhost, BASE, CAS Source Index, ROAD, MIAR, CrossRef).

*Здобувачу особисто належить побудова графіків зміни у часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) метанолу.*

2. Тютюник В. В., Тютюник 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). С. 58–76. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).58-76](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).58-76) (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

*Здобувачу особисто належить аналіз нормативної бази щодо наявності відповідних механізмів розвитку системи «Smart city» в Україні, створення алгоритму моделювання за методологією IDEF0 для забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста.*

3. 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). С. 111–127. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127> (Включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Index Copernicus, CiteFactor, The Journals Impact Factor, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Research Bible, WorldCat).

*Здобувачу особисто належить збір та аналіз статистичних даних щодо масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами, перевірка достовірності отриманих результатів залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик горіння рідких органічних речовин.*

4. Тютюник В. В., Левтеров О. А., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Розвиток науково-технічних основ акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків. 2024. Вип. 2(40). С. 269–292. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-19> (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

*Здобувачу особисто належить аналіз інтернет-джерел щодо терористичних актів пов'язаних із використанням вогнепальної зброї, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень.*

5. 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), С. 300–312. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26> (Включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

*Здобувачу особисто належить збір, обробка та проведення кластеризації спектральних характеристик акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів.*

6. 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), С. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.2.18> (Включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

*Здобувачу особисто належить збір та аналіз даних щодо взаємодії між службами при ліквідації надзвичайних ситуацій, розробка алгоритму дій для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня на основі даних акустичного моніторингу.*

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. Тютюник В. В., **Усачов Д. В.** Геоінформаційна система акустичного моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: збірник тез доповідей круглого столу (вебінару). м. Харків. НУЦЗ України. 23 лютого 2023 року. С. 135–139. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить опис процесу функціонування системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору.*

8. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Геоінформаційна система акустичного моніторингу джерел різного роду загроз для об'єктів критичної інфраструктури міста. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph – NGO Institute for Cyberspace Research (Detroit, Michigan, USA). 2023. С. 271–276. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить перевірка достовірності результатів акустичної ідентифікації джерела небезпеки, обґрунтування ефективності методу.*

9. **Усачов Д. В.** Інформаційна система оперативного моніторингу надзвичайних ситуацій у місті за результатами аналізу акустичного простору. Інформаційна безпека та інформаційні технології: збірник тез доповідей VI Все-української науково практичної конференції молодих учених, студентів і курсантів «Інформаційна

безпека та інформаційні технології». м. Львів. ЛДУ БЖД. 30 листопада 2023 року. С. 448–450. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить постановка задачі дослідження та визначення системного підходу для ефективного моніторингу акустичного простору міста.*

10. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Особливості реалізації акустичного моніторингу джерел небезпек для підвищення ефективності діяльності сил охорони правопорядку в місті. Актуальні питання розвитку та удосконалення логістичного забезпечення в національній гвардії України. Науково-практична конференція. м. Вінниця. НАНГУ. 30 листопада 2023 року. С. 211–212. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить аналіз нормативної бази щодо наявності відповідних механізмів розвитку системи «Smart city» в Україні.*

11. Тютюник В. В., **Усачов Д. В.** Акустичний моніторинг масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами на території міста. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: збірник тез доповідей круглого столу (вебінару). м. Харків. НУЦЗ України. 29 лютого 2024 року. С. 229–232. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить збір та аналіз статистичних даних щодо масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами, визначення головних причин виникнення таких надзвичайних ситуацій.*

12. Тютюник В. В., Левтеров О. А., **Усачов Д. В.** Виявлення на території міста масштабних пожеж за акустичними спектрами процесу горіння рідких органічних речовин. Проблеми пожежної безпеки 2024: матер. Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків. НУЦЗ України. 2024 року. С. 198–200. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить створення діаграми декомпозиції системи реєстрації загроз для життєдіяльності міста.*

13. Тютюник В. В., **Усачов Д. В.** Розробка науково-технічних основ моніторингу масштабних пожеж на території міста за допомогою спектрального аналізу. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матер.

XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. м. Львів. ЛДУ БЖД. 28–29 березня 2024 року. С. 81–84. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить перевірка достовірності отриманих результатів залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик горіння рідких органічних речовин.*

14. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Апаратна реалізація методу ідентифікації вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу. The 4th International scientific and practical conference “Development of higher education: trends and prospects” (January 28–31, 2025) Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2025. P. 241–244. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить обробка акустичних сигналів пострілів із досліджуваної зброї та визначення їх амплітудно-частотних характеристик.*

15. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Акустичний моніторинг джерел надзвичайних ситуацій пов'язаних із застосуванням вогнепальної зброї. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: збірник тез доповідей круглого столу (вебінару). м. Черкаси. НУЦЗ України. 28 лютого 2024 року. С. 4–5. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить створення алгоритму ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілі.*

## ABSTRACT

*Usachov D. V.* Prevention of military emergencies of a local level based on the results of acoustic monitoring of their sources – Qualifying research paper, manuscript copyright.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 263 – civil safety. – National University of Civil Defence of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical task in the field of civil protection - improving the process of preventing the occurrence of military emergencies at the local level by introducing acoustic monitoring to detect and identify their sources in cities.

**The introduction** provides a general description of the dissertation. The relevance of the dissertation topic is substantiated, the purpose of the work and the main tasks of the research are formulated, and the connection of the work with scientific programs is shown. The data on the personal contribution of the applicant, work approbation and publications are presented.

**In the first section of the ANALYSIS OF EXISTING PRINCIPLES FOR PREVENTING LOCAL EMERGENCIES**, establishes that the territory of large settlements of Ukraine is a complex multifunctional system that is exposed to various types of hazards - natural, man-made, social, and military. The functioning of a city's critical infrastructure is the basis for its stability, security and sustainable development, but a number of risks can significantly disrupt urban processes. The impact of these hazards can have both local and large-scale consequences, manifested in the form of economic, social and environmental losses. To ensure sustainable development of cities, it is necessary to implement effective risk management mechanisms, improve the regulatory framework and increase the level of infrastructure adaptation to modern challenges.

The analysis of emergencies related to large-scale fires, terrorist attacks, and the use of unmanned aerial vehicles in Ukraine showed that most dangerous events have consequences as a result of aggression and in the context of the introduction of martial law in the country, which leads to significant losses in infrastructure and among the population. Such incidents confirm the need to strengthen emergency prevention measures and improve

emergency response procedures. The use of firearms during terrorist acts poses a serious threat to public safety. The large number of illegal weapons in the hands of criminals makes it difficult to traffick in and control them, which contributes to an increase in crime and risks to the lives and health of citizens. In addition to firearms, the use of unmanned aerial vehicles has increased over the past two years, including for terrorist attacks, which poses a serious threat to residential and critical infrastructure in the country's cities. The huge increase in the production of unmanned aerial vehicles emphasizes their important role in modern military and humanitarian conflicts, which requires the implementation of new strategies to combat this threat.

The analysis of the legal framework for disaster prevention in Ukrainian cities and protection of critical infrastructure is based on national legislation harmonized with international legal norms. The activities of the State Emergency Service of Ukraine in this area are aimed at strengthening cooperation with the European Union Civil Protection Mechanism, which allows for effective monitoring of potential threats, risk forecasting, and development of security measures, including the creation of warning systems, planning of evacuation routes, and improvement of civil protection infrastructure.

An analysis of the state of disaster prevention and monitoring in developed countries has shown that the effectiveness of these measures depends on the level of integration of modern technologies, coordination between public and private entities, and the implementation of a unified monitoring system. Leading countries, such as the United States, the United Kingdom, Germany, and Japan, use centralized platforms to process large amounts of data, which ensures rapid response and decision-making in crisis situations.

The analysis of existing schematic solutions for monitoring the preliminary factors of various kinds of dangerous events as sources of emergencies has shown that today one of the directions of early detection of sources of military emergencies in the city is to control the acoustic space of the city with the help of ground-based stationary automatic signal analyzers in the acoustic range

**In the second section of the DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF THE CITY SECURITY SYSTEM AS A COMPONENT OF THE PROCESS OF PREVENTING EMERGENCIES AT THE LOCAL LEVEL, a**

structural and functional model of the peculiarities of the city security system is developed (according to the IDEF0 standard), taking into account the regulatory framework of Ukraine and the availability of relevant mechanisms (resources) in the state. The modeling process shows that the process of registering threats to the city's vital activity includes the organization of financial audit, social and environmental monitoring, video surveillance, radiation, chemical and biological monitoring, as well as spectral analysis of radiation from hazardous sources. It has been established that the organization of spectral analysis of radiation from hazardous sources includes a comprehensive analysis of the characteristics of radiation in different frequency ranges (in acoustic, radio, infrared, optical, ultraviolet and X-ray ranges, as well as analysis of gamma and cosmic rays). Therefore, the implementation of effective measures to prevent the occurrence of local emergencies requires the development of an urban system for operational monitoring and forecasting of emergencies based on spectral analysis of acoustic space to detect and identify dangerous events, with further development of solutions for managing security services and city utilities.

A systematic approach and principles of using the spectral analysis of the acoustic space of a city are proposed to implement continuous and long-term real-time operational monitoring of the place of occurrence and dynamics of development of identified sources of emergencies of various nature. At the same time, it is established that the main indicator of the effectiveness of the functioning of the subsystem of operational acoustic monitoring of the emergency zone in the city is the reliability of identifying the source of danger by type and place of occurrence, which depends on the factors that directly characterize the dynamics of changes in the indicators of the development of the source of danger, on the factors that characterize the tactical and technical indicators of the means of controlling the acoustic space, as well as on the factors characterized by geographical and physical and chemical .

**The third section of the RESEARCH OF THE POTENTIAL OF SPECTRAL ANALYSIS OF ACCUSSIVE SPACE FOR DETECTION AND IDENTIFICATION OF SOURCES OF MILITARY EMERGENCIES AT THE LOCAL LEVEL**, presents the results of research on the capabilities of the acoustic method for identifying sources of military emergencies at the local level. The basis of the studies is the analysis of the amplitude-frequency characteristics of sound vibrations, which are unique for each type of

hazardous event. In particular, the research is aimed at studying the characteristics of sounds that occur during fires with liquid organic substances, terrorist attacks with the use of firearms and unmanned aerial vehicles.

Based on the results of studying the capabilities of the acoustic method for identifying the sources of emergencies associated with large-scale fires of liquid organic substances, it was found that the dynamics of the process of high-temperature oxidation (combustion), i.e., the dependence of the number of maxima of the amplitude-time and amplitude-frequency characteristics of the received acoustic signal under the effect of acoustic emission, is determined by the physical and physicochemical thermodynamic parameters of the process.

The effect of "flash", i.e., the time of the primary process of combustion of vapors of liquid organic substances, was studied, and a clear dependence of the duration of this process on the partial pressure of vapors over a pure solvent and the flash or ignition temperature was established. It was found that the greater the partial pressure of vapors and the lower the flash (ignition) temperature, the shorter the "flash" time, i.e., the duration of combustion of organic vapors.

It was found that, regardless of the nature of the studied organic substances, the values of the Hurst's index and fractal dimension remain constant for the studied range of flammable liquids. At the same time, a tendency to increase the Hurst index and, accordingly, decrease the fractal dimension for alcohol isomers was found. The practical constancy of the Hurst parameters and fractal dimension for organic substances with linear and isomeric structure  $C_nH_{2n+2}$  of organic substance molecule frameworks indicates an appropriate level of reliability and reliability of the obtained results on acoustic signal processing under the effect of acoustic emission of the reaction of high-temperature oxidation (combustion) of some organic substances, which makes it possible to reduce the degree of false alarms of the acoustic device for detecting sources of large-scale fires in the city and establishing the nature of the fuel material.

Based on the results of the study of the capabilities of the acoustic method for identifying the sources of emergencies associated with the use of various types of firearms, the method for identifying the facts of the use of various types of firearms by the parameters and characteristics of acoustic spectra of shots was improved. The application of the

improved method to study the characteristics of the acoustic spectra of shots from a 9 mm Makarov pistol, a Fort-14R traumatic pistol, and a 5.45 mm AK-74 rifle made it possible to identify the type of firearm by the received acoustic signal with a probability of 95%. A functional scheme for identifying the facts of the use of various types of firearms by the spectral properties of the received acoustic signal was developed.

Based on the results of the study of the capabilities of the acoustic method for identifying the sources of emergencies related to the use of unmanned aerial vehicles, a method for automatic detection of unmanned aerial vehicles and determination of their types based on acoustic signals, which combines cluster analysis and wavelet analysis, has been improved. The application of the improved method to three experimental models of unmanned aerial vehicles - Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK, DJI Mavic 3t and FPV 7inch ProDrone - allowed to accurately identify the type of unmanned aerial vehicles by their acoustic signal with a probability of up to 90 %. An algorithm for detecting and identifying acoustic signals of unmanned aerial vehicles based on the wavelet analysis method was developed. This method allows obtaining information about both the frequency and time interval of the acoustic signal, which makes it possible to highlight the characteristic features of the spectrum of unmanned aerial vehicles.

**The fourth section of the IMPROVING THE METHOD OF PREVENTING THE Emergence of LOCAL-LEVEL MILITARY EMERGENCIES BASED ON SPECTRAL ANALYSIS OF ACCESS SPACE**, a cognitive model of the functioning of a critical infrastructure facility under the influence of various threats is developed, where the key components of the system are divided into four groups. The components of day-to-day functioning take into account the interrelationships between indicators of the level of funding, resource provision, the state of technological equipment, product quality, and the number and qualifications of personnel. The components of external and internal threats combine different types of risks (financial, natural, man-made, social, use of unmanned aerial vehicles, use of firearms, information, fire, etc.) and take into account the degree of their impact on the level of normal operation of the facility. The consequences of these hazards combine social, material and environmental damage. The fourth group combined elements of the acoustic monitoring system for emergency sources. The structural and

topological analysis of the constructed fuzzy cognitive maps was carried out and it was found that these maps are adequate for assessing the impact of external and internal threats, as well as for applying the acoustic monitoring system for hazard sources. For each of the proposed cognitive models, the concepts that have the highest structural significance in the context of the introduction of martial law in the State in the event of fire threats, as well as the use of unmanned aerial vehicles and firearms, are identified.

Scenario modeling of the maximum negative impact of the most important concepts of the threat system on the level of security of critical infrastructure facilities is carried out. It is established that these threats directly affect the key indicators of daily functioning and lead to such significant consequences as social and material damage. These changes indicate the need to strengthen protective measures to minimize risks and ensure the resilience of critical infrastructure facilities, especially in the face of threats arising in the context of the introduction of martial law in the country. According to the results of the scenario modeling of the positive impact of the results of the implementation of the acoustic monitoring system (which facilitates the timely detection and identification of fire threats, attacks using unmanned aerial vehicles and terrorist activities) on the indicators of external and internal threats to the normal functioning of critical infrastructure facilities, an increase in the level of protection of the city's critical infrastructure by 40-50% was established.

A control algorithm for the method of preventing local military emergencies based on the results of acoustic space monitoring has been developed, which involves the implementation of five procedures: 1) monitoring the acoustic space of the city (using a system of ground-based automated acoustic control devices and passive location of sources of hazards) and analysis of the received acoustic signal (by filtering noise and frequency analysis of the "useful" signal); 2) detection and identification of a dangerous event (by comparing the amplitude-frequency characteristics of the received acoustic signal with data from the data bank and knowledge of the characteristics of acoustic signals from known dangerous events); 3) modeling and analysis of the threat of local military emergencies; 4) making decisions to prevent the development of a dangerous event on the territory of the city into local military emergencies; 5) coordination of the actions of the relevant city services.

It is shown that the main services of the city unite units of the Armed Forces of Ukraine, the Security Service of Ukraine, the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, the National Guard of Ukraine, the National Police of Ukraine, the State Emergency Service of Ukraine, the State Disaster Medicine Service, the State Environmental Inspectorate, critical infrastructure operators and municipal services, whose functions are interconnected in peacetime, as well as in special periods, including in martial law, in a state of emergency and during crisis situations.

### **Scientific novelty of the obtained results.**

1. *For the first time*, a structural and functional model of the strategic development of the city's security system *was developed* (according to the IDEF0 standard), taking into account the regulatory framework of Ukraine and the availability of appropriate mechanisms (resources) in the state, where the process of registering threats to the city's vital activity includes the organization of financial audit, monitoring of the social situation and environment, video surveillance, radiation, chemical and biological monitoring, as well as spectral analysis of radiation from hazard sources. The developed model includes the principles and criteria for the effectiveness of the spectral analysis of the city's acoustic space for continuous and long-term real-time operational monitoring of sources of military emergencies at the local level.

2. *For the first time*, a cognitive model of the peculiarities of the functioning of the city's critical infrastructure under threats and the effectiveness of acoustic monitoring for the prevention of military emergencies at the local level *has been developed*, taking into account the interrelationships between indicators of financing, resource provision, the state of technological equipment, product quality, as well as the number and qualifications of personnel. In addition, the model takes into account the negative impact of various external and internal threats (in the form of financial risks, natural risks, man-made risks, social risks, information risks, fire risks, etc.) on the normal functioning of the facility and their consequences in the form of social, material and environmental damage, and also takes into account the positive impact of the results of the implementation of the acoustic monitoring system (which facilitates timely detection and identification of fire threats, attacks using unmanned aerial vehicles, and terrorist acts using firearms).

3. The method of preventing the occurrence of local military emergencies has been further developed, based on the results of experimental studies of the capabilities of spectral analysis of acoustic space for the detection and identification of dangerous events in urban areas. The control algorithm for implementing this method includes the execution of five procedures: 1) monitoring the acoustic space of the city (using a system of ground-based automated devices for acoustic control and passive location of sources of hazards) and analysis of the received acoustic signal (by filtering noise and frequency analysis of the "useful" signal); 2) detection and identification of a dangerous event (by comparing the amplitude-frequency characteristics of the received acoustic signal with data from the data bank and knowledge of the characteristics of acoustic signals from known dangerous events); 3) modeling and analysis of the threat of a local military emergency; 4) decision-making on preventing the development of a dangerous event in the city into local military emergencies; 5) coordination of actions of relevant city services.

**The practical significance of the results obtained** is to improve the approach to preventing the occurrence of emergencies in the city, based on the continuous and long-term real-time operational use of monitoring data on the type, location and dynamics of the development of sources of emergencies associated with large-scale fires, as well as the use of firearms and unmanned aerial vehicles. The control algorithm developed in this thesis for determining appropriate solutions to prevent the occurrence of military emergencies at the local level based on acoustic monitoring data can be used to develop and create an automated urban security system that will increase the efficiency of local links of territorial subsystems of the unified state civil protection system.

The main results of the study were implemented in the units of the Main Directorates of the SES of Ukraine in Kharkiv and Khmelnytsky regions, as well as in the educational process of the National University of Civil Defense of Ukraine and Lviv State University of Life Safety.

**Keywords:** emergency, fire, emergency prevention, emergency monitoring, combustion, unmanned aerial vehicle, firearm, acoustic signal processing, modeling, emergency response, decision support.

## LIST OF PUBLICATIONS OF DEGREE-SEEKER

**Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation are published:**  
**Articles in scientific professional editions of Ukraine included in the international science-computer bases:**

1. Tiutiunyk, V., Kalugin, V., Levterov, A., Sydorenko, O., Starodubtsev, S. & **Usachov, D.** (2023). 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*. 151(6). P. 203–212. DOI: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212> (The article in the international science-based Scopus, DOAJ, EBSCOhost, BASE, CAS Source Index, ROAD, MIAR, CrossRef).

*The applicant personally constructed time-domain spectral variation graphs of the received acoustic signal during the high-temperature oxidation (combustion) process of methanol.*

2. Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2023). Osoblyvosti stvorennia systemy akustychnoho monitorynhu dzherel nadzvychainykh sytuatsii u konteksti rozvytku kontseptsii «Smart City» [Features of creating an acoustic monitoring system for emergency sources in the context of the development of the Smart City concept]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2(16). P. 58–76. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.2.58-76> (The article in the international science-based database Index Copernicus, Academic Research Index - ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

*The applicant personally conducted an analysis of the regulatory framework concerning the presence of mechanisms for the development of the «Smart City» system in Ukraine, and developed a modeling algorithm based on the IDEF0 methodology to ensure an adequate level of urban life safety.*

3. Tiutiunyk, V. V., Levterov, O. A., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2024). Rozvytok naukovo-tekhnichnykh osnov stvorennia heoinformatsiinoi systemy akustychnoho monitorynhu masshtabnykh pozhezh iz ridkymy orhanichnymy rehovynamy

na terytorii mista [Development of scientific and technical foundations for creating a geoinformation system for acoustic monitoring of large-scale fires with liquid organic substances in the city]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony*. 1(49). P. 111–127. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127> (The article in the international science-based Google Scholar, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Index Copernicus, CiteFactor, The Journals Impact Factor, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Research Bible, WorldCat).

*The applicant personally collected and analyzed statistical data on large-scale fires involving liquid organic substances and verified the reliability of the obtained results regarding the amplitude-time and amplitude-frequency dependencies of liquid organic substance combustion.*

4. Tiutiunyk, V. V., Levterov, O. A., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2024). Rozvytok naukovo-tekhnichnykh osnov akustychnoho monitorynhu dzherel nadzvychainykh sytuatsii, yaki pov'iazani iz zastosuvanniam vohnepalnoi zbroi [Development of scientific and technical foundations for acoustic monitoring of emergency sources related to the use of firearms]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*. 2(40). P. 269–292. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-19> (The article in the international science-based database Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

*The applicant personally analyzed internet sources on terrorist acts involving the use of firearms, and processed and interpreted the results of experimental research.*

5. Tiutiunyk, V. V., Levterov, O. A., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2024). Akustychnyi metod identyfikatsii zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ yak dzherel nadzvychainykh sytuatsii [Acoustic method of identifying the use of unmanned aerial vehicles as sources of emergency situations]. *Social Development and Security*. 15(1), P. 300–312. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26> (The article in the international science-based database Index Copernicus).

*The applicant personally carried out the collection, processing, and clustering of the spectral characteristics of acoustic signals emitted by unmanned aerial vehicles.*

6. Tiutiunyk, V. V. & **Usachov, D. V.** (2025). Improving the method of preventing local emergencies based on the results of acoustic space monitoring. *Social Development and Security*. 15(2), P. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.2.18> (The article in the international science-based database Index Copernicus).

*The applicant is personally responsible for collecting and analyzing data on the interaction of services in the elimination of emergency situations, developing an algorithm of actions to prevent emergency situations in the city based on acoustic monitoring data.*

**Scientific works certifying the practical of the dissertation materials:**

7. Tiutiunyk, V. V., **Usachov, D. V.** (2023). Heoinformatsiina systema akustychnoho monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii mistsevoho rivnia [Geoinformation system for acoustic monitoring of local-level emergencies]. *Zapobihannia vynyknenniau nadzvychainykh sytuatsii, rehuliuвання ta likvidatsiia yikh naslidkiv: Proceedings of the Round Table (webinar)*. Kharkiv. NUCZU. February 23. 2023. P. 135–139. (Participation form – intramural).

*The applicant personally described the operation process of stationary ground-based automated acoustic space monitoring systems.*

8. Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2023). Heoinformatsiina systema akustychnoho monitorynhu dzherel riznoho rodu zahroz dla ob'ektiv krytychnoi infrastruktury mista [Geoinformation system for acoustic monitoring of various threat sources for critical infrastructure facilities in the city]. *Challenges and Threats to Critical Infrastructure: Collective Monograph*, NGO Institute for Cyberspace Research. Detroit. Michigan. USA. P. 271–276. (The form of participation is a extramural Internet conference).

*The applicant personally verified the reliability of acoustic hazard source identification results and substantiated the effectiveness of the method.*

9. **Usachov, D. V.** (2023). Informatsiina systema operatyvnoho monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii u misti za rezultatamy analizu akustychnoho prostoru [Information system for operational monitoring of emergencies in the city based on acoustic space analysis]. *Proceedings of the VI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Students, and Cadets "Information Security and Information*

*Technologies".* Lviv., LDU BZhD. November 30. 2023. P. 448–450. (The form of participation is a extramural Internet conference).

*The applicant personally defined the research objectives and determined the system-based approach for effective monitoring of the urban acoustic space.*

10. Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2023). Osoblyvosti realizatsii akustychnoho monitorynhu dzherel nebezpek dlia pidvyshchennia efektyvnosti diialnosti syl okhorony pravoporiadku v misti [Features of implementing acoustic monitoring of hazard sources to increase the efficiency of law enforcement units in the city]. *Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Current Issues of Development and Improvement of Logistics Support in the National Guard of Ukraine"*. Vinnytsia. NANGU. November 30. 2023. P. 211–212. (Participation form – extramural).

*The applicant personally conducted an analysis of the regulatory framework regarding the availability of mechanisms for the development of the “Smart City” system in Ukraine.*

11. Tiutiunyk, V. V., **Usachov, D. V.** (2024). Akustychnyi monitorynh masshtabnykh pozhezh z ridkymy orhanichnymy rehovynamy na terytorii mista [Acoustic monitoring of large-scale fires with liquid organic substances in the city]. *Zapobihannia vynyknenniau nadzvychainykh sytuatsii, rehuliuвання ta likvidatsiia yikh naslidkiv: Proceedings of the Round Table (webinar)*. Kharkiv. NUCZU. February 29. 2024. P. 229–232. (Participation form – intramural).

*The applicant personally collected and analyzed statistical data on large-scale fires involving liquid organic substances and identified the main causes of such emergencies.*

12. Tiutiunyk, V. V., Levterov, O. A., & **Usachov, D. V.** (2024). Vyiavlennia na terytorii mista masshtabnykh pozhezh za akustychnymy spektramy protsesu horinnia ridkykh orhanichnykh rehovyn [Detection of large-scale fires in the city based on the acoustic spectra of burning liquid organic substances]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Fire Safety Issues 2024"*. Kharkiv. NUCZU. P. 198–200. (Participation form – extramural).

*The applicant personally created a decomposition diagram of the urban threat registration system.*

13. Tiutiunyk, V. V., **Usachov, D. V.** (2024). Rozrobka naukovo-tekhnichnykh osnov monitorynhu masshtabnykh pozhezh na terytorii mista za dopomohoiu spektralnoho analizu [Development of scientific and technical foundations for monitoring large-scale fires in the city using spectral analysis]. *Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets, and Students "Problems and Prospects for the Development of the Life Safety System"*. Lviv. LDU BZhD. March 28–29. 2024. P. 81–84. (The form of participation is a extramural Internet conference).

*The applicant personally verified the reliability of the obtained dependencies between amplitude-time and amplitude-frequency characteristics of liquid organic substance combustion.*

14. Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O. & **Usachov, D. V.** (2025). Aparatna realizatsiia metodu identyfikatsii vohnepalnoi zbroi za spektralnymi vlastyvoistamy pryiniatoho akustychnoho syhnalu [Hardware implementation of a method for identifying firearms based on the spectral properties of the received acoustic signal]. *Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference "Development of Higher Education: Trends and Prospects"*. Rotterdam. Netherlands. International Science Group. January 28–31. 2025. P. 241–244. (The form of participation is a extramural Internet conference).

*The applicant personally processed acoustic signals of gunshots from the investigated firearms and determined their amplitude-frequency characteristics.*

15. Tiutiunyk, V. V., Tiutiunyk, O. O., & **Usachov, D. V.** (2024). Akustychnyi monitorynh dzherel nadzvychainykh sytuatsii poviazanykh iz zastosuvanniam vohnepalnoi zbroi [Acoustic monitoring of emergency sources related to the use of firearms]. *Zapobihannia vynyknenniau nadzvychainykh sytuatsii, rehuliuvannia ta likvidatsiia yikh naslidkiv: Proceedings of the Round Table (webinar)*. Cherkasy. NUCZU. February 28. 2024. P. 4–5. (Participation form – intramural).

*The applicant personally developed an algorithm for identifying various types of firearms based on the parameters and characteristics of their acoustic shot spectra.*

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....                                                                                                                    | 32 |
| ВСТУП .....                                                                                                                                        | 34 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИНЦИПІВ ЗАПОБІГАННЯ<br>ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МІСЦЕВОГО РІВНЯ.....                                           | 41 |
| 1.1. Аналіз особливостей виникнення надзвичайних ситуацій місцевого<br>рівня.....                                                                  | 41 |
| 1.1.1. Умови виникнення на території міста небезпечних подій як джерел<br>надзвичайних ситуацій місцевого рівня.....                               | 41 |
| 1.1.2 Аналіз масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами на<br>територіях міст України .....                                                | 48 |
| 1.1.3 Аналіз виникнення на територіях міст надзвичайних ситуацій<br>терористичного характеру, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї... | 50 |
| 1.1.4 Аналіз виникнення на територіях міст надзвичайних ситуацій, які<br>пов'язані із застосуванням безпілотних літальних апаратів.....            | 53 |
| 1.2. Аналіз особливостей запобігання виникненню надзвичайних ситуацій<br>місцевого рівня .....                                                     | 55 |
| 1.2.1 Умови реалізації заходів запобігання виникненню надзвичайних<br>ситуацій місцевого рівня.....                                                | 55 |
| 1.2.2 Огляд нормативно-правової бази України у сфері запобігання та<br>моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня.....                      | 58 |
| 1.3 Аналіз стану запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій<br>місцевого рівня у світі.....                                                  | 62 |
| 1.3.1 Процес запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого<br>рівня у розвинутих країнах світу.....                                   | 62 |
| 1.3.2 Аналіз існуючих засобів та систем акустичного моніторингу<br>небезпечних подій як джерел надзвичайних ситуацій.....                          | 67 |
| Висновки до розділу 1.....                                                                                                                         | 73 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ МІСТА ЯК СКЛАДОВОЇ ПРОЦЕСУ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ МІСЦЕВОГО РІВНЯ.....                                                 | 76  |
| 2.1. Структурно-функціональне моделювання особливостей функціонування системи безпеки міста.....                                                                                                       | 76  |
| 2.2. Моделювання процесу застосування спектрального аналізу акустичного простору для виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій місцевого рівня .....                                     | 83  |
| Висновки до розділу 2.....                                                                                                                                                                             | 92  |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТЕФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ МІСЦЕВОГО РІВНЯ .....                     | 94  |
| 3.1 Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних з масштабними пожежами рідких органічних речовин.....  | 95  |
| 3.2. Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням різних типів вогнепальної зброї..... | 112 |
| 3.3. Дослідження можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів ..... | 125 |
| Висновки до розділу 3.....                                                                                                                                                                             | 135 |
| РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ МІСЦЕВОГО РІВНЯ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ.....                               | 138 |
| 4.1 Когнітивне моделювання особливостей функціонування критичної інфраструктури в умовах загроз та оцінка ефективності акустичного                                                                     |     |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| моніторингу для запобігання надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня .....                                                                                     | 138 |
| 4.1.1 Аналіз причинно-наслідкових взаємозв'язків між елементами функціональної системи гіпотетичного об'єкту критичної інфраструктури....                                      | 138 |
| 4.1.2 Когнітивне моделювання ефективності прийняття рішень із запобігання виникненню надзвичайної ситуації на об'єкті критичної інфраструктури .....                           | 141 |
| 4.1.3 Дослідження сценаріїв впливу загроз на рівень безпеки об'єкту критичної інфраструктури.....                                                                              | 146 |
| 4.1.4 Дослідження впливу впровадження системи акустичного моніторингу на рівень захисту об'єкту критичної інфраструктури.....                                                  | 150 |
| 4.2. Розробка керуючого алгоритму методу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору..... | 157 |
| Висновки до розділу 4 .....                                                                                                                                                    | 163 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                                                                                                                                                        | 166 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                                                                               | 169 |
| ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....                                                                                                                           | 185 |
| ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів досліджень.....                                                                                                                        | 190 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ – амплітудо-частотна характеристика

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ГІС – геоінформаційна система

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

ІТЗ ЦЗ – інженерно-технічні заходи цивільного захисту

КІ – критична інфраструктура

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

ЦЗ – цивільний захист

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)

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)

GAN – Generative adversarial network

(Генеративно-змагальна нейронна мережа)

GCHQ – Government Communications Headquarters

(Агентство урядового зв'язку)

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 Cente

(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

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сучасні міста України являють собою складні системи з рознесеними у просторі та часі параметрами життєдіяльності. Під час зброєної агресії проти України на території цих міст створюються передумови для виникнення надзвичайних ситуацій (НС), які призводять до значних соціальних, матеріальних та екологічних наслідків. Це свідчить про необхідність розробки комплексу ефективних правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на запобігання виникненню НС місцевого рівня, шляхом недопущення переростання небезпечних подій, які виникають на території міста, у НС місцевого рівня або пом'якшення їх можливих наслідків. Ефективна реалізація цих заходів не можлива без даних моніторингу, експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого виникнення та перебігу різного роду небезпечних подій на території міста.

Перспективним напрямом розробки таких заходів є створення на території міста ефективної системи моніторингу з метою оперативного отримання повної та достовірної інформації про джерела небезпек для розробки та реалізації ефективних рішень щодо недопущення виникнення НС місцевого рівня. Однак, в сучасних містах держави системи моніторингу реалізовані шляхом використання лише камер зовнішнього спостереження, що є інформативно недостатнім для прийняття відповідних рішень щодо запобігання виникненню НС місцевого рівня та оперативного реагування на небезпечні події, які виникають на території міста. Зазначені обставини свідчать про необхідність технічної реалізації нових фізико-технічних методів моніторингу НС, які спрямовані на контроль хвильових характеристик джерел небезпечних подій, як перспективних методів раннього виявлення джерел небезпек.

В той же час, не усі сучасні методи раннього виявлення джерел небезпек задовольняють умовам, в яких вони можуть бути застосовані для моніторингу території міста. Однак, відомі експериментальні результати вказують на перспективи

проведення подальших наукових досліджень, спрямованих на використання методу акустичної емісії, як одного із методів контролю хвильових характеристик джерел небезпек, для раннього виявлення на території міста рознесених у просторі та часі небезпечних подій, як джерел НС місцевого рівня.

У зв'язку з цим, науково-прикладні дослідження, які спрямовані на розробку системи моніторингу акустичного простору, як інструменту оперативного отримання інформації про виникнення на території міста різного роду небезпек подій для підтримки прийняття ефективних рішень із запобігання виникненню НС місцевого рівня, є актуальними, що підтверджується науковими результатами отриманими в роботах широкого колу вітчизняних та закордонних вчених, серед яких: М.М. Дівізінюк, І.В. Рубан, М.В. Бугайов, О.В. Соболяк, К.О. Левчук, А.М. Пінь, О.А. Левтеров, В.В. Тютюнник, E. Hollnagel, A. Hopkins, N. Leveson, S. Dekker та інші. Особливої актуальності цим дослідженням надає факт негативного зовнішнього впливу на житлову та критичну інфраструктуру (КІ) міст різних типів військової зброї та безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Виходячи з цих позицій, підвищення ефективності запобігання НС воєнного характеру місцевого рівня, шляхом впровадження акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст небезпечних подій, якій і присвячена дисертаційна робота, є актуальною науково-практичною задачею в галузі цивільного захисту, у вирішенні якої зацікавлені місцеві органи влади та громадськість міст України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі управління діяльності у сфері цивільного захисту навчально-наукового інституту цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України відповідно до рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 вересня 2020 року «Про Стратегію національної безпеки України» (введено в дію Указом Президента України від 14 вересня 2020 року № 392/2020) та рішення Ради національної безпеки і оборони України від 04 червня 2021 року «Щодо удосконалення мережі ситуаційних центрів та цифрової трансформації сфери національної безпеки і оборони» (введено в дію Указом

Президента України від 18 червня 2021 року № 260/2021), а також у рамках науково-дослідної роботи «Дослідження особливостей запобігання надзвичайним ситуаціям місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору» (№ державної реєстрації 0122U000005), в якій здобувач був відповідальним виконавцем. Результати науково-дослідної роботи впроваджені в діяльність практичних підрозділів Головного управління ДСНС України в Харківській області (Додаток Б.1).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є удосконалення процесу запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня, шляхом впровадження акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст їх джерел.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Проаналізувати особливості запобігання виникненню НС місцевого рівня та провести аналіз існуючих підходів до побудови систем моніторингу НС на території міста.

2. Провести структурно-функціональне моделювання особливостей функціонування на території міста системи безпеки та застосування спектрального акустичного аналізу для виявлення та ідентифікації джерел НС місцевого рівня.

3. Дослідити характеристики акустичних спектрів від основних джерел НС воєнного характеру місцевого рівня, які пов'язані з масштабними пожежами рідких органічних речовин (РОР), застосуванням вогнепальної зброї та БПЛА.

4. Провести когнітивне моделювання особливостей функціонування КІ міста в умовах загроз та ефективності застосування акустичного моніторингу для запобігання НС воєнного характеру місцевого рівня, а також удосконалити, з урахуванням можливостей застосування акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації небезпечних подій на території міст, метод запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня.

**Об'єкт дослідження.** Процес запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня.

**Предмет дослідження.** Параметри акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст небезпечних подій, як складової процесу запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених наукових завдань в дисертаційному дослідженні використовувалися методи математично-імітаційного, структурно-функціонального (за стандартом IDEF0) та когнітивного (з використання нечітких когнітивних карт) моделювання, а також для планування експерименту та перевірки достовірності отриманих результатів використовувались методи спектрального аналізу, вейвлет-аналізу, акустичного детектування та планування експерименту.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. *Вперше 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), де 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. В розроблену модель закладено принципи та критерії ефективності застосування спектрального аналізу акустичного простору міста для неперервного та тривалого реального часу оперативного моніторингу джерел НС воєнного характеру місцевого рівня.

2. *Вперше розроблено* когнітивну модель особливостей функціонування КІ міста в умовах загроз та ефективності застосування акустичного моніторингу для запобігання НС воєнного характеру місцевого рівня, з врахуванням взаємозв'язків між показниками фінансування, ресурсного забезпечення, станом технологічного обладнання, якістю продукції, а також чисельністю і кваліфікацією персоналу. Крім того, в моделі враховується негативний вплив на умови нормального функціонування об'єкту різних зовнішніх та внутрішніх загроз (у вигляді фінансових ризиків, природних ризиків, техногенних ризиків, соціальних ризиків, інформаційних ризиків, пожежних ризиків тощо) та наслідки від них у вигляді соціальних, матеріальних та

екологічних збитків, а також враховується позитивний вплив результатів впровадження системи акустичного моніторингу (яка сприяє своєчасному виявленню та ідентифікації пожежних загроз, атак із застосуванням БПЛА та із застосуванням вогнепальної зброї).

3. *Набув подальшого розвитку*, за результатами експериментальних досліджень можливостей спектрального аналізу акустичного простору щодо виявлення та ідентифікації небезпечних подій на території міст, метод запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня. До керуючого алгоритму реалізації цього методу включено 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 амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС воєнного характеру місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС воєнного характеру місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в удосконаленні підходу щодо запобігання виникненню НС воєнного характеру на території міста, за бази безперервного та тривалого у реальному масштабі часу оперативного використання моніторингових даних щодо типу, місця виникнення та динаміки розвитку джерел НС пов'язаних з масштабними пожежами, терористичними актам із застосуванням вогнепальної зброї та БПЛА. Розроблений в дисертації керуючий алгоритм визначення відповідних рішень щодо запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня за даними акустичного моніторингу може бути використаний для розробки та створення автоматизованої системи безпеки міст, що підвищить ефективність функціонування місцевих ланок територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту (ЄДСЦЗ).

Практичне впровадження основних результатів дослідження відбулося в підрозділах Головного управління ДСНС України в Хмельницькій області (Додаток Б.2), а також в навчальному процесі Львівського державного університету безпеки життєдіяльності та Національного університету цивільного захисту України (Додаток Б.3).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто і наведені в роботах Додатку А [A1–A6]. В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: в роботі [A1] – побудова графіків зміни у часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) метанолу; в роботі [A2] – аналіз нормативної бази щодо наявності відповідних механізмів розвитку системи «Smart city» в Україні, створення алгоритму моделювання за методологією IDEF0 для забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста; в роботі [A3] – збір та аналіз статистичних даних щодо масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами, перевірка достовірності отриманих результатів залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик горіння рідких органічних речовин; в роботі [A4] – аналіз інтернет-джерел щодо терористичних актів пов’язаних із використанням вогнепальної зброї, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень; в роботі [A5] – збір, обробка та проведення кластеризації спектральних характеристик акустичних сигналів БПЛА; в роботі [A6] – збір та обробка даних щодо взаємодії між службами при ліквідації НС, розробка алгоритму дій для запобігання виникненню НС місцевого рівня на основі даних акустичного моніторингу.

**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Круглому столі (вебінарі) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків» (м. Харків, 23 лютого 2023 року., форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції «Challenges and threats to critical infrastructure» (м. Детройт, Мичиган, США, 24 жовтня 2023 року, форма участі – заочна інтернет-конференція); VI Все-українській науково-практичній конференції молодих учених,

студентів і курсантів «Інформаційна безпека та інформаційні технології» (м. Львів, 30 листопада 2023 року, форма участі – заочна інтернет-конференція); Науково-практичній конференції «Актуальні питання розвитку та удосконалення логістичного забезпечення в національній гвардії України» (м. Вінниця, 30 листопада 2023 року, форма участі – заочна); Круглому столі (вебінарі) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків» (м. Харків, 29 лютого 2024 року, форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки – 2024» (м. Харків, 27 березня 2024 року, форма участі – заочна); XIX Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 28–29 березня 2024 року, форма участі – заочна інтернет-конференція); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Development of higher education: trends and prospects» (м. Роттердам, Нідерланди, 28–31 січня 2025 року, форма участі – заочна інтернет-конференція); Круглому столі (вебінарі) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків» (м. Черкаси, 28 лютого 2025 року, форма участі – очна).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць: 6 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, Root Indexing, Ulrich Web, Cite Facto (з них 1 стаття – у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Scopus); 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота загальним об'ємом 196 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 144 найменувань і 2 додатків, містить 56 рисунків та 8 таблиць.

## **РОЗДІЛ 1**

### **АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИНЦИПІВ ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МІСЦЕВОГО РІВНЯ**

#### **1.1. Аналіз особливостей виникнення надзвичайних ситуацій місцевого рівня**

##### **1.1.1. Умови виникнення на території міста небезпечних подій як джерел надзвичайних ситуацій місцевого рівня**

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].

Так, розвиток інфраструктури, будівництво доріг і систем комунікацій істотно впливає на рівень розвитку міст. За прогнозами експертів ООН, в найближчих 15 років зростання міського населення продовжуватиметься і може досягти понад 60 % від населення земної кулі.

Крім того, містом є не просто скупчення матеріальних об'єктів (житлових і виробничих будівель, комунікацій і так далі), 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 міську середу; населення, яке може бути розділене на працездатне (трудові ресурси) і непрацездатне; сфера утворювання 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 і інша нематеріальна потреба 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 і інші потреби населення міста, а також частково забезпечують інфраструктурну потребу підприємств сфери утворення міста.

Населення міста поставляє трудові ресурси для всіх галузей і є споживачем послуг міського господарства і соціальної сфери.

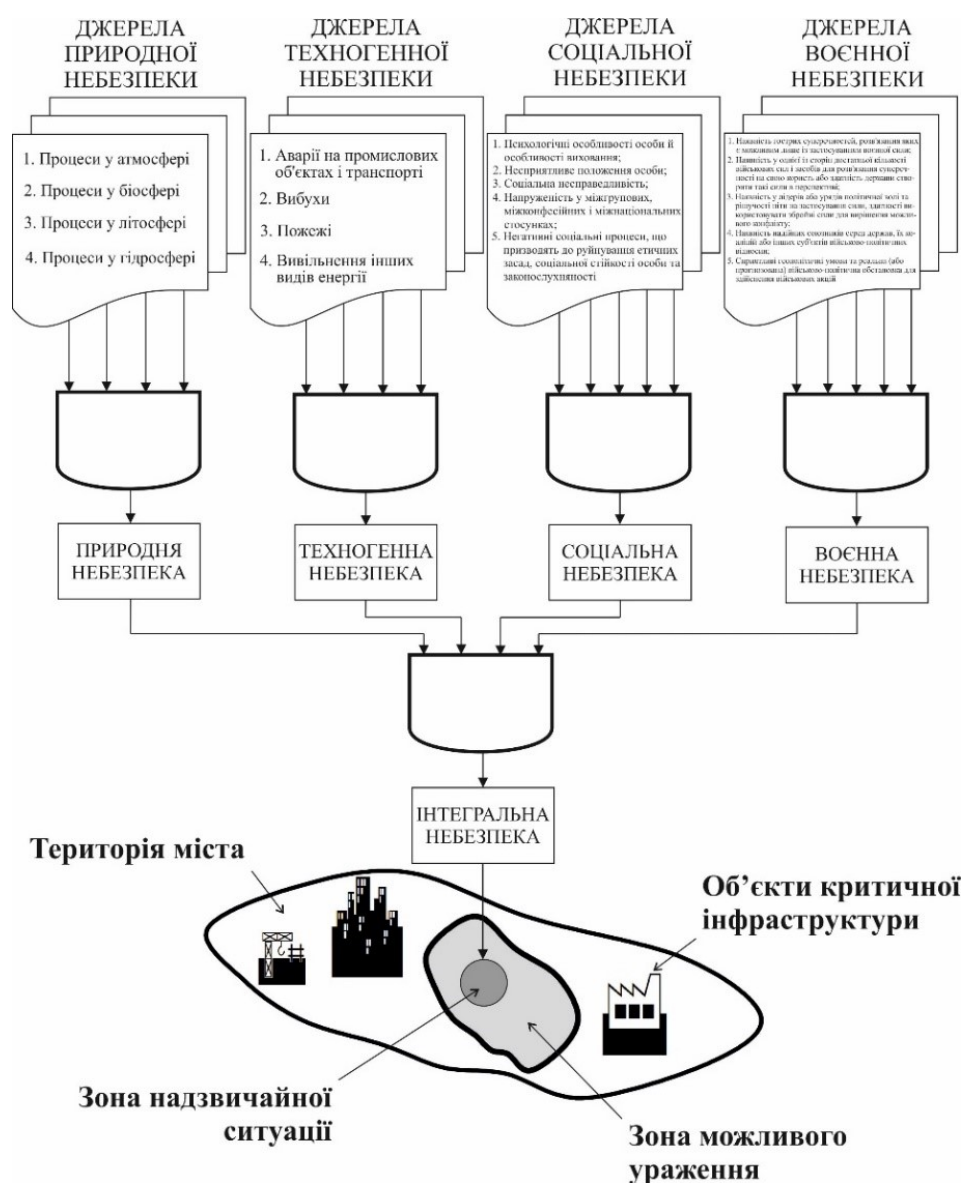


Рис. 1.1. Представлення процесів формування на території міста небезпечних подій як джерел НС місцевого рівня

Розміри міського господарства залежать від території міста, чисельності населення, складу сфери утворювання міста.

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

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 по своєму цільовому призначенню підрозділяються на територіальні зони: житлові, суспільно-ділові, виробничі, землі інженерних і транспортних інфраструктур, рекреаційні та інші. Для кожної зони встановлюється свій порядок використання території.

Зворотнім боком даного 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 ( $R_{A(x, y, z)}^{Int.НП}(t)$ ), 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:

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

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

$R_{A(x,y,z)}^{Соц.НП}(t)$  – 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 небезпека 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 небезпеки у вигляді повеней, цунамі та забруднення водних ресурсів. Усі ці фактори формують природну небезпеку, 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 небезпеки пов'язані з діяльністю людини та розвитком промисловості, транспорту і 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, при ядерних чи електротехнічних аваріях. Так, показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій техногенного характеру має вигляд:

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

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 небезпеки впливають із особливостей суспільного життя та взаємодії людей. Психологічні особливості особистості, вплив виховання та негативне соціальне середовище можуть спричиняти 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:

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

де  $R_{A(x,y,z)}^{Соц.НП_1}(t)$  – показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язані з психологічними особливостями особи й особливостями виховання;  $R_{A(x,y,z)}^{Соц.НП_2}(t)$  – показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язані з несприятливим положенням особи;  $R_{A(x,y,z)}^{Соц.НП_3}(t)$  – показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язані із соціальною несправедливістю;  $R_{A(x,y,z)}^{Соц.Н_4}(t)$  – показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язані з напруженістю в міжгрупових, міжконфесійних і міжнаціональних стосунках;  $R_{A(x,y,z)}^{Соц.НСП_5}(t)$  – показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій соціального характеру, пов’язані з 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, то містам притаманні джерела воєнної безпеки які притаманні державі. Тому, джерела воєнної безпеки 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 є можливість 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’язані з 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’язані з наявністю у однієї із сторін достатньої кількості військових сил і засобів для розв’язання суперечності на свою користь або здатність 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’язані з 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’язані з наявністю надійних союзників серед держав, їх коаліцій або інших суб’єктів військово-політичних відносин;  $R_{A(x,y,z)}^{Воєн.НП_5}(t)$  – показник ризику виникнення у точці  $A(x, y, z)$  території міста небезпечних подій воєнного характеру, пов’язані з наявністю сприятливості

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 і 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 РОР. Більший відсоток цих пожеж трапилося в умовах введення в державі правового режиму воєнного стану та у результаті ракетних обстрілів. Так, за останній час серед НС різного характеру, які виникли на територіях різноманітних місць України, існує значна кількість масштабних пожеж 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 у наслідок ворожих обстрілів. Троє мирних мешканців отримали поранення, несумісні з життям. Пожежу вдалось загасити на площі десять квадратних метрів (березень 2022 року) [15];
- займання бензовозу у порту міста Рені на Одещині. Внаслідок пожежі одна людина загинула і ще одна отримала важкі опіки (липень 2022 року) [16];
- пожежа біля АЗС у Чернівцях. Згоріли бензовоз і три цистерни, пошкоджено адміністративне приміщення, а також травмована людина (серпень 2022 року) [17];
- пожежа на АЗС в Дніпрі, в яку поцілила російська ракета. Пожежу локалізовано на площі 300 квадратних метрів, 2 особи загинуло, 2 осіб вдалося врятувати (жовтень 2022 року) [18];
- пожежа на АЗС та у гаражному кооперативі міста Нікополь Дніпропетровської області як результат російської атаки. У місті пошкоджено вісім багатоповерхових та приватних будинків, кілька магазинів, меблева фабрика, готель, автобусна зупинка, газогін та електромережі (жовтень 2022 року) [19];
- загорання бензовозу на території нафтобази на Сарненщині Рівненської області. Поруч з транспортом знаходилися резервуари з паливом. Внаслідок пожежі вогнем пошкоджені цистерна-напівпричіп та два резервуари з легкозаймистими речовинами (січень 2023 року) [20];
- 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 Харкова. Пожежа спалахнула коли РФ завдала ударів по місту. Вибухнула цистерна з газом. Поранених внаслідок вибуху та пожежі немає (квітень 2023 року) [22];
- вибух бензовозу у Київській області, на автодорозі Харків–Київ. Унаслідок чого його водій загинув, а на місці події сталася значна пожежа (травень 2023 року) [23];
- пожежа на АЗС у м. 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 два мікроавтобусів. Транспорт горів у селищі міського типу Немішаєве Київської області. Була загроза для поряд 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, 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 спричинені 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, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї**

На сьогодні до небезпек з великим рівнем соціальних та матеріальних збитків для життєдіяльності міст віднесено тероризм як суспільно-небезпечну діяльність, що полягає у свідомому і цілеспрямованому застосуванні насильства, шляхом захоплення заручників, підпалів, 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.

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 в таких актах; вербування, озброєння, підготовку та використання терористів; пропаганду і поширення ідеології

тероризму; фінансування завідомо терористичних груп (організацій) або інше сприяння їм [27].

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

- в супермаркеті Walmart в місті Чесапек (штат Вірджинія, США). Загинуло до десяти людей, повідомляється про велику кількість поранених (листопад 2022 року) [28];

- в готелі у центрі Львова (Україна). Обійшлося без жертв (грудень 2022 року) [29];

- під час зборів членів об’єднання Valleverde, яке займається управлінням будинку в районі водосховища Турано поблизу Рима (Італія) стався терористичний акт. В результаті троє загиблих та четверо поранених [30];

- біля лісу на Закарпатті (Україна). Обійшлося без жертв (грудень 2022 року) [31];

- в центрі Парижа (Франція). Загинуло троє людей, ще декілька поранено (грудень 2022 року) [32];

- у школі Де-Мойна (штат Айова, США). Внаслідок стрілянини загинули двоє учнів (січень 2023 року) [33];

- у посольстві Азербайджану в Тегерані (Іран). Чоловік з автоматом Калашникова убив одного охоронця дипломатичного представництва і ще двох поранив (січень 2023 року) [34];

- у січні 2023 року під час святкування китайського Нового року в Лос-Анджелесі (Каліфорнія, США) трагічно загинули щонайменше десять осіб [35];

- 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) [36];

- в університеті американського містечка Іст-Лансінг (штат Мічиган, США). Через дії озброєного чоловіка загинули троє студентів та п'ятеро поранено (лютий 2023 року) [37];
- у прибережному місті Хаф-Мун-Бей, що розташоване приблизно за 50 км на південь від Сан-Франциско (штат Каліфорнія, США), озброєний чоловік скоїв напад, внаслідок якого загинуло семеро людей (лютий 2023 року) [38];
- 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 закінчив життя самогубством (грудень 2023 року) [39];
- у районі Сарієр у Стамбулі, під час служби в італійській церкві Санта-Марія, сталася стрілянина, внаслідок якої одна людина отримала смертельне поранення (січень 2024 року) [40];
- у грузинському місті Руставі (Грузія), озброєний чоловік відкрив стрілянину на місцевому ринку. Внаслідок стрілянини загинуло четверо людей (лютий 2024 року) [41];
- 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 перезарядки [42];
- 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) [43];
- на Тернопільщині (Україна) військовий біля сільської школи розстріляв людей. Загинуло двоє людей, ще трьох з важкими пораненнями доправили до лікарні (серпень 2024 року) [44].
- у місті Анкара (Турція) стався теракт біля об'єкта аерокосмічної компанії. Внаслідок терористичного акту загинули 5 людей, 22 людини поранені (жовтень 2024 року) [45].

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 з використанням нарізної вогнепальної зброї вчинено 3626 кримінальних правопорушень; гладкоствольної – 172; холодної – 490; газової та пневматичної – 262; вибухових речовин – 86; боєприпасів – 26869 [46].

Таким чином, внаслідок військової агресії РФ в містах України, збільшилась кількість НС терористичного характеру, які невід’ємно пов’язані із 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, які пов’язані із застосуванням безпілотних літальних апаратів**

За останні роки спостерігається значний розвиток 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.

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

- російська армія масовано атакувала місто Берислав Херсонської області безпілотниками. Внаслідок атаки загинули двоє чоловіків – волонтери з Франції. З

травмами до лікарні доставили ще трьох іноземців та 41-річного одесита (лютий 2024 року) [47];

- російські війська обстріляли з дрона цивільне авто на Глухівщині у Сумській області. Унаслідок атаки загинуло молоде подружжя. Прокурори відкрили кримінальне провадження за фактом порушення законів та звичаїв війни, поєднаного з умисним вбивством. Триває документування наслідків обстрілів (серпень 2024 рік) [48];

- FPV-дрон влучив в рейсовий автобус у Миропіллі на Сумщині. Унаслідок атаки є поранені цивільні (вересень 2024 рік) [49];

- у Херсоні ворожий дрон атакував автомобіль швидкої меддопомоги. Поранення дістали двоє працівників: 44-річний та 47-річний чоловіки. Їх доправили до лікарні із вибуховими травмами та контузіїми, а також уламковими пораненнями ніг (жовтень 2024 року) [50];

- завдано удару безпілотниками по Одесі. Внаслідок атаки у місті є руйнування цивільної інфраструктури, загинула людина та щонайменше 13 постраждалих (листопад 2024 року) [51];

- ворожа атака БПЛА на Харків. Унаслідок атаки постраждали четверо осіб – три жінки та один чоловік. Двоє потерпілих, 74-річний чоловік та жінка, зазнали уламкових поранень та були госпіталізовані [52].

Великий відсоток подій траплялися протягом останніх двох років, що підтверджує значне зростання використання БПЛА для загрози життю та здоров'ю людей. Зокрема, виробничі потужності дронів зросли у понад 100 разів за останній рік. У 2022 році обсяги виробництва становили 3-5 тисяч одиниць, тоді як у 2023 році – приблизно 300 тисяч одиниць, що підкреслює їхню важливу 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 для 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 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 [53].

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 класифікатору надзвичайних ситуацій ДК 019-2010 та «Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій», затверджених наказом МВС України № 658 від 06 серпня 2018 року [54–56].

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 в залежності від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації НС класифікуються як 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 рис. 1.2. представлені умови реалізації заходів запобігання виникненню НС місцевого рівня, при виникненні на території міста різного роду небезпечних подій.



Рис. 1.2. Представлення умов реалізації заходів запобігання виникненню НС місцевого рівня, при виникненні на території міста різного роду небезпечних подій

Згідно даних рис. 1.2, запобігання виникненню НС місцевого рівня включає реалізацію на територіях та ОКІ міст України наступних 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 проектів містобудівної документації та проектів 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 перспективність комплексної реалізації в містах держави представлених заходів державного регулювання діяльності суб'єктів господарювання у сфері цивільного захисту, дисертаційна робота спрямована на підвищення ефективності моніторингу НС на території міста. Це обумовлена тим, що згідно з Кодексом цивільного захисту України, в державі, з метою забезпечення здійснення заходів із запобігання виникненню НС, проводиться постійний моніторинг і прогнозування НС.

В 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 указують на необхідність інтегрування в систему безпеки міста додаткових автоматизованих датчиків контролю різного роду джерел небезпек, які працюються на різних фізико-хімічних принципах. Розробка такої системи моніторингу джерел НС дозволить об'єднати функцій спостереження та обробки інформації про джерела небезпеки, а також функції прогнозування виникнення на території міста НС різного характеру, з подальшою розробкою ефективних рішень щодо управління службами безпеки та комунальними службами міста.

Одним із напрямків раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів у акустичному діапазоні [57].

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 напрямків раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів у 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» [58].

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 Законом України «Про цивільний захист населення», який визначає загальні принципи державної політики у сфері ЦЗ, включаючи попередження, ліквідацію наслідків НС та забезпечення сталого функціонування КІ [59].

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 в проєктну документацію. Документ регламентує прогнозування ризиків, планування захисних споруд, забезпечення систем оповіщення та розробку евакуаційних маршрутів. Особлива увага приділяється інтеграції заходів безпеки в проєктування міської та промислової забудови. Використання сучасних технологій і міжнародного досвіду дозволяє підвищити ефективність захисту населення та інфраструктури від природних і техногенних загроз [60].

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, висвітлені 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 дозволяє своєчасно виявляти потенційні ризики та забезпечувати оперативне реагування на них.

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» (№ 1882-IX від 16 листопада 2021 року). 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 [61].

Реалізація положень Закону України «Про критичну інфраструктуру» відображена у Постанові Кабінету Міністрів України № 1109, яка регламентує порядок ідентифікації та категоризації ОКІ. Цей документ встановлює критерії для визначення значущості об'єктів та їхньої класифікації, що є основою для подальшого моніторингу [62].

Аналізуючи функції, які виконує ДСНС у сфері захисту КІ, варто 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 № 821, яка передбачає проведення систематичних спостережень за станом і функціонуванням

ідентифікованих об'єктів, оцінку ризиків та надання рекомендацій для зменшення їхнього впливу [63].

Особливе місце у роботі ДСНС займає не лише організація заходів для захисту населення під час НС, а й створення умов для їхньої безпеки 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 їхніх наслідків. Завдяки цьому забезпечується повнота та достовірність даних, необхідних для прогнозування загроз і прийняття рішень у кризових умовах, це регламентовано Постановою Кабінету Міністрів України № 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 їхнього впливу на функціонування важливих об'єктів і прогнозуванні наслідків. Це дає змогу службі формувати дієві превентивні заходи, які спрямовані на мінімізацію шкоди у випадку виникнення НС [64].

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. У відповідності до Постанови Кабінету Міністрів України № 535 від 10.08.2024 року ДСНС визначено національним координатором участі України в Механізмі цивільного захисту ЄС [65].

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 дозволяє українським фахівцям активно взаємодіяти з європейськими партнерами та використовувати передовий досвід для розробки 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 дозволяє 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 дозволяє 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 ЄДСЦЗ відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 11 від 9 січня 2014 року «Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту» [66].

Однак процес формування єдиної системи моніторингу НС в Україні перебуває на початковому етапі, що обумовлює відсутність уніфікованої правової бази для здійснення такого моніторингу. Одним з перших документів є Постанова Кабінету Міністрів України № 705 від 11 липня 2023 року «Питання мережі ситуаційних центрів» є важливим кроком у напрямку створення ефективної мережі ситуаційних центрів для забезпечення безпеки та запобігання НС. Метою даної постанови є регулювання діяльності мережі ситуаційних центрів: створення та функціонування ситуаційних центрів на різних рівнях управління (державному, регіональному та місцевому). Головними задачами 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 [67].

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 № 514 від 6 серпня 2018 року «Про затвердження Методичних рекомендацій з організації ситуаційних центрів», що регламентує діяльність структурних підрозділів, у тому числі Центру прогнозування і моніторингу, в частині їхньої участі у моніторингу НС [68].

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 збором, 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 [69].

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) [70], Великобританія (National Crisis Coordination Centre – NCC) [71], Японія (Disaster Management Centre – DMC) [72], Австралія (Australian Government Crisis Coordination Centre – AGCCC) [73], ситуаційні центри працюють на основі інтегрованих технологій, що дозволяють в 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, в свою чергу, призводить до домінування провідних країн світу США, Німеччини, Великої Британії та низки інших країн з питань контролю та ухвалення законодавства у сфері запобігання НС.

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 [74].

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 [75].

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 управляє Національним центром управління ризиками (National Risk Management Center), який аналізує загрози, створює карти ризиків і координує заходи щодо зменшення їхнього впливу. У межах діяльності CISA активно впроваджуються автоматизовані системи моніторингу, штучний інтелект і технології великих даних, які забезпечують високий рівень обробки інформації [76].

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 дозволяє 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 дозволяє в 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 [77].

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 [78].

Для посилення ефективності захисту КІ у Великій Британії створені 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 СІП (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 [79].

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, Великобританія, Німеччина та Японія, використовують централізовані платформи для обробки 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 однією з ключових задач сучасного світу. Зростання загроз, пов'язаних із підпалами, а також терористичних актів 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 дозволяють 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. Їхні 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 з 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  $2^\circ$  і  $5^\circ$ . Частота оновлення інформації складає менше 1,5 с [80].

Мініатюрна версія цієї системи AkSL (Akustisches Schützen-Lokalisationssystem) представляє собою акустичний сенсорний блок для носіння на плечі, який дозволяє під час руху військовослужбовця зберігати у пам'яті інформацію щодо місця виникнення загрози, при цьому інформацію щодо азимуту, вертикального кута і дальності на дисплеї наручних часів. На дисплеї також присутня 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 [81].

Компанія Raytheon BBN розробила локатор пострілів Boomerang. Можливості цього локатору дозволяють визначати положення стрільця з точністю до  $15^\circ$  протягом 1 с після пострілу на відстані до 30 м. Boomerang встановлюється на щоглі в задній частині автомобіля і складається з семи невеликих мікрофонів, які сканують звук з невеликою різницею у часі. Використання спеціального алгоритму дозволяють 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 [82].

Крім того, компанією AAI Textron розроблено систему PDCue (Projectile Detection and Cueing – визначення пострілу та сигналізація) для транспортних засобів, яка базується на установлених по кутам даху (що забезпечує повне покриття акустичного простору на  $360^\circ$ ) чотирьох сенсорах. Похибка визначення пострілу по кутам азимуту 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 [83].

В свою чергу, компанією Ascom-Metavib 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-машинний 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 [84].

Також ця компанія пропонує систему Pilarw для транспортних засобів та стаціонарних об'єктів, яка дозволяє 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 *Pillarw 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 % [85].

Нідерландська компанія *Microflowm Avisa* 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* дозволяє ідентифікувати місце мінометного пострілу з точністю 2 % за дальністю та менше  $5^\circ$  за азимутом [86].

Пристрій *Sniper Egg* – моноблочний гвинтівковий локатор пострілу, розроблений компанією *Ultra Electronics* для встановлення з правої сторони 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 % при низькій частоті помилкових сигналів. Для плавності переміщення графічних елементів на дисплеї частота його оновлення становить 10 Гц [87].

Американська компанія *Cobham* разом з компанією *BioMimetic Systems* (*BMS*) розробила різні варіанти акустичної системи виявлення пострілів *PinPoint* для спішної піхоти, а також для транспортних засобів та стаціонарних об'єктів. Варіант системи для спішної піхоти *PinPoint Dismount* розроблено у формі плечового блоку датчиків, які вимірюють дальність, напрямок і вертикальний кут. Інформація представляється у вигляді звукового повідомлення або виводиться на дисплей наручних часів. 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 вищу точність виявлення, що обумовлено

використанням більш крупного загального сенсору 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 [88].

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

В Україні також проводиться ряд досліджень щодо розробки аналогічного локатору джерела пострілу. Так, у статті [89] 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 представлені результати лабораторних випробувань прототипу й оцінка ефективності похибки пеленгування приладу. Але у представленому прототипі локатору джерела пострілу також не розглядається можливість багатфакторного 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 обробки даних у реальних умовах експлуатації БПЛА. Це питання ускладнюється обробкою значного обсягу інформації, що негативно впливає на ефективність швидкої ідентифікації.

Так, у дослідженні [90] 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 [91] 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 при розрізненні 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 вдосконаленням цих параметрів працюють розробники з різних галузей світових компаній, такі як:

- SoundCom Technologies, компанія зі США, яка спеціалізується на розробці акустичних сенсорних систем для виявлення та класифікації звуків різних джерел, у тому числі БПЛА. Вони використовують передові технології цифрової обробки звуку, щоб створювати рішення для безпеки і моніторингу, здатні визначати наявність дронів. Їхні технології застосовуються в аеропортах і на критичних об'єктах для запобігання незаконним польотам і вторгненням [92];

- DroneShield, австралійська компанія, є однією з провідних в розробці технологій безпеки від дронів. Вони пропонують комплексні рішення для виявлення, нейтралізації та блокування дронів, використовуючи акустичні, радарні та радіочастотні сенсори. Їхні системи застосовуються в урядових організаціях, а також для охорони аеропортів та інших важливих об'єктів, допомагаючи вчасно виявляти дрони та запобігати несанкціонованим польотам [93];

- ParaZero, ізраїльська компанія, займається розробкою 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 з дронами, допомагаючи запобігати аваріям та несанкціонованим польотам [94];

- Dronelock, компанія з Нідерландів, розробляє технології для боротьби з дронами, включаючи акустичні системи для виявлення та відслідковування БПЛА.

Їхні сенсори допомагають ідентифікувати місцезнаходження дронів і захищати важливі об'єкти, такі як аеропорти, промислові зони та інші чутливі інфраструктури [95];

– Microflown Avisa, 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. Їхні системи застосовуються для захисту аеропортів, військових баз і державних установ, а також для запобігання незаконним або небезпечним вторгненням дронів у повітряний простір [96].

В нашій країні проводяться розробки акустичних локаторів для виявлення БПЛА. Так, у роботі [97] авторами запропоновано простий та дешевий для конструювання акустичного детектора з одним електретним 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, пов'язаних із РОР, на

територіях міст України показує, що більшість із них спричинені ракетними обстрілами чи іншими актами агресії. Внаслідок військової агресії РФ в містах України, збільшилась кількість НС терористичного характеру, які невід'ємно пов'язані із 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. Вказано, що одним із напрямків раннього виявлення на території міста джерел НС різного характеру є контроль акустичного простору міста за допомогою наземних стаціонарних автоматичних аналізаторів сигналів у 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 дозволяє 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, Великобританія, 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

#### 2.1. 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 через застосування програмного продукту *RAMUS EDUCATIONAL* за стандартом IDEF0 [98, 99]. Цей програмний продукт має змогу надати алгоритм процесу як діаграми та наочно показати послідовність процесів забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста в умовах наступного завдання: визначити сутність структурно-функціонального підходу з використанням стандарту IDEF0 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 [100]. 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).

Моделювання процесів забезпечення відповідного рівня життєдіяльності міста проведено у декілька етапів. На першому етапі здійснено побудову контекстних діаграм функціонування міста (блок A0 на рис. 2.1) з подальшою декомпозицією його процесів (рис. 2.2). 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.



Рис. 2.1. Контекстна діаграма системи функціонування міста

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.

На рис. 2.2 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-комунального господарства, торгівлі 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.

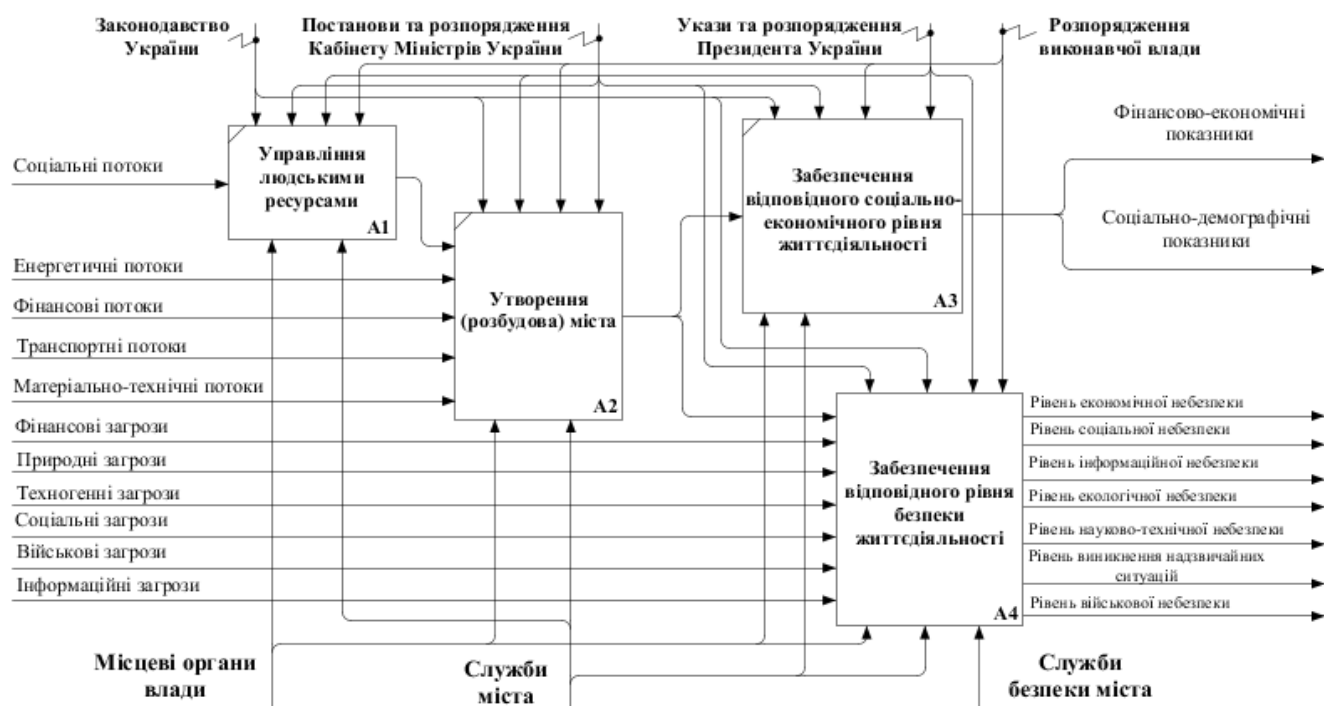


Рис. 2.2. Діаграма декомпозиції системи функціонування міста

Процес утворення (розбудови) міста (блок A2) 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, заснованої на використанні найсучасніших інформаційних технологій; підвищення швидкості, чутливості і 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. 2.3 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.

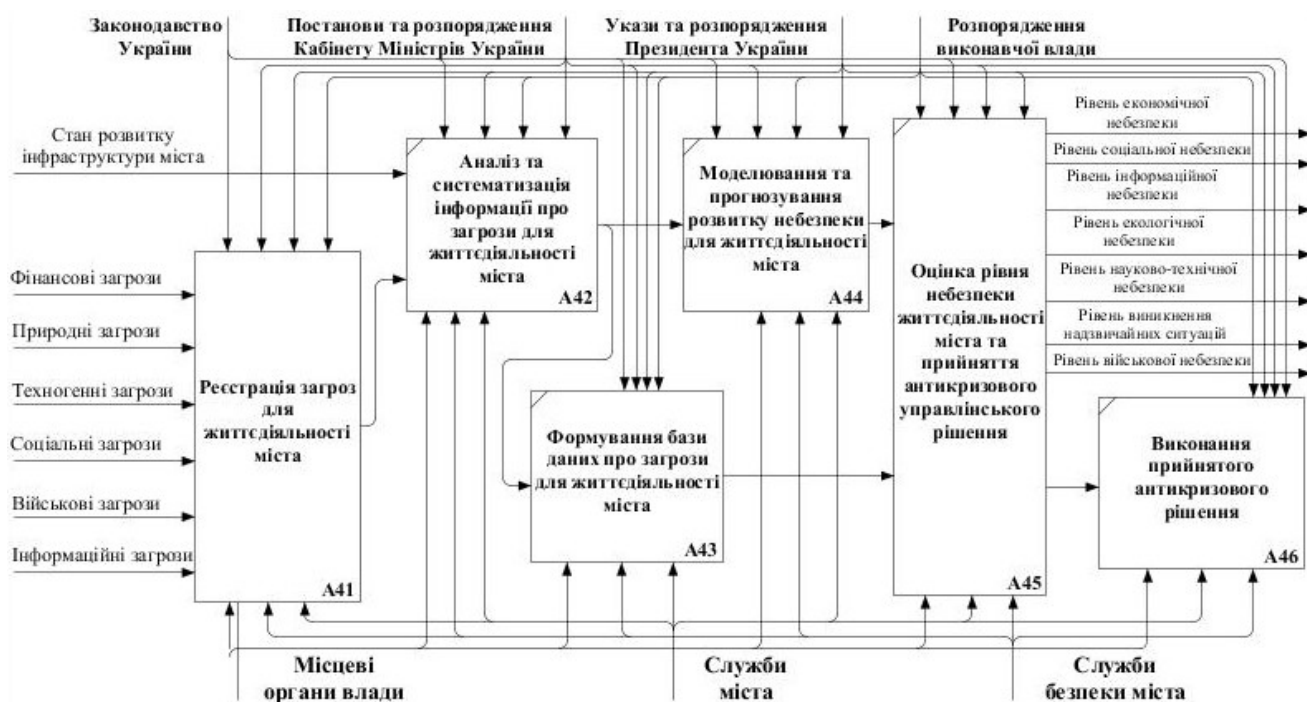


Рис. 2.3. Діаграма декомпозиції процесу забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста

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 значно 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.

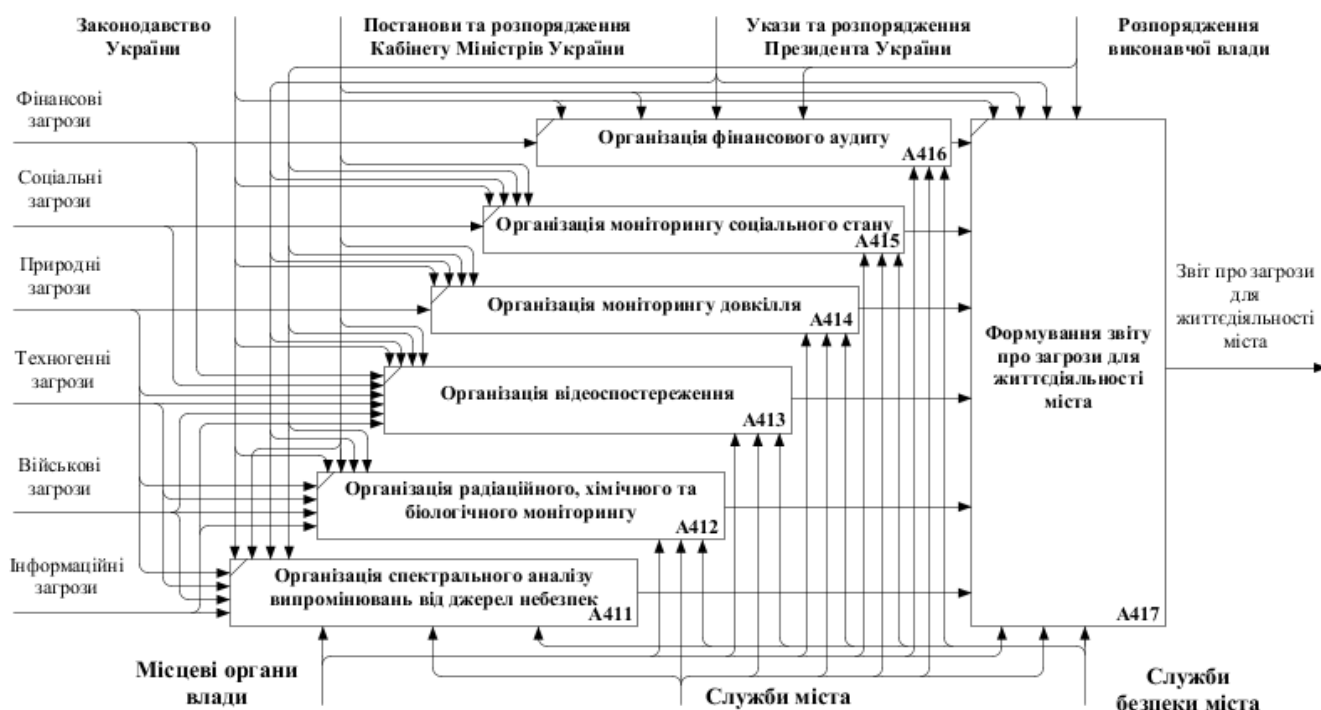


Рис. 2.4. Діаграма декомпозиції системи реєстрації загроз для життєдіяльності міста

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 в рамках чинної ЄДСЦЗ.

Так, на рис. 2.4 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.

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. 2.5).

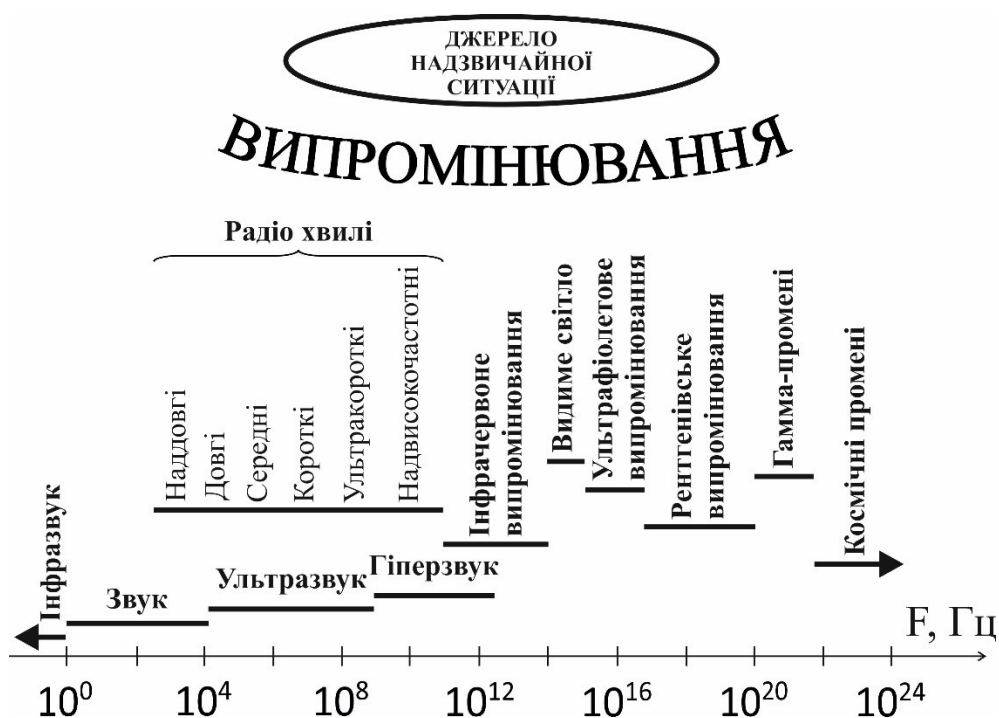


Рис. 2.5. Спектральні характеристики випромінювань від джерел НС

Кожен із методів спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек у різних частотних діапазонах має як недоліки, так і переваги [101]. Отже, з метою виявлення та ідентифікації джерел НС місцевого рівня в дисертаційній роботі обрано метод спектрального аналізу акустичного простору міста.

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). В 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 в різних частотних діапазонах (в акустичному, радіо, інфрачервоному, оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма та космічних променів). Тому, реалізації 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.

## **2.2. 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'язано з системою виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС [102].

Методи пасивної акустичної локації джерел небезпек мають свої специфічні особливості, а саме: в умовах відсутності інформації про тривалість акустичного випромінювання дальність до джерела випромінювання не можливо визначити за даними прийому тільки одного наземного засобу автоматизовано контролю акустичного простору. У зв'язку з цим, для визначення координат джерела небезпеки необхідно застосовувати комплекс двох або декількох рознесених у просторі засобів автоматизовано 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 наявності 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 [103].

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, представлено на рис. 2.5.

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.

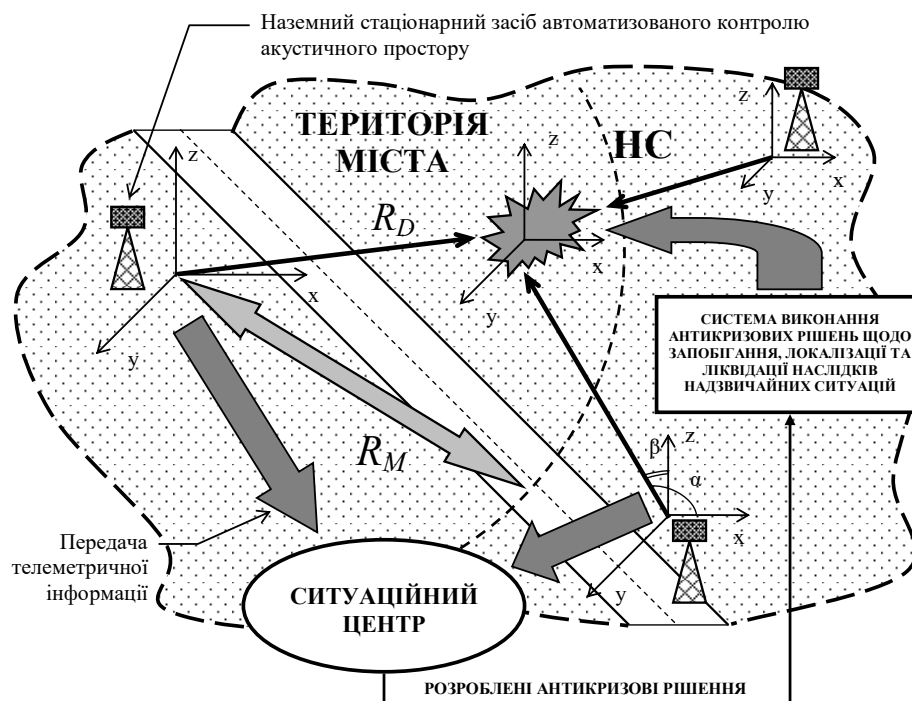


Рис. 2.5. Схема функціонування системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору на території міста, ситуаційного центру, підсистеми зв'язку та передавання телеметричної інформації, а також підсистеми виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації та ліквідації наслідків НС різного характеру на території міста

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, можливо 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 [104, 105].

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, підстилюючої поверхні, геометрії поширення та джерела звуку.

Зазвичай при аналізі 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.

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 розглянуто на основі метода 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 променеву 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 [106–108]: хвильовий, антихвильовий і як проміжний нейтральний режим (рис. 2.6).

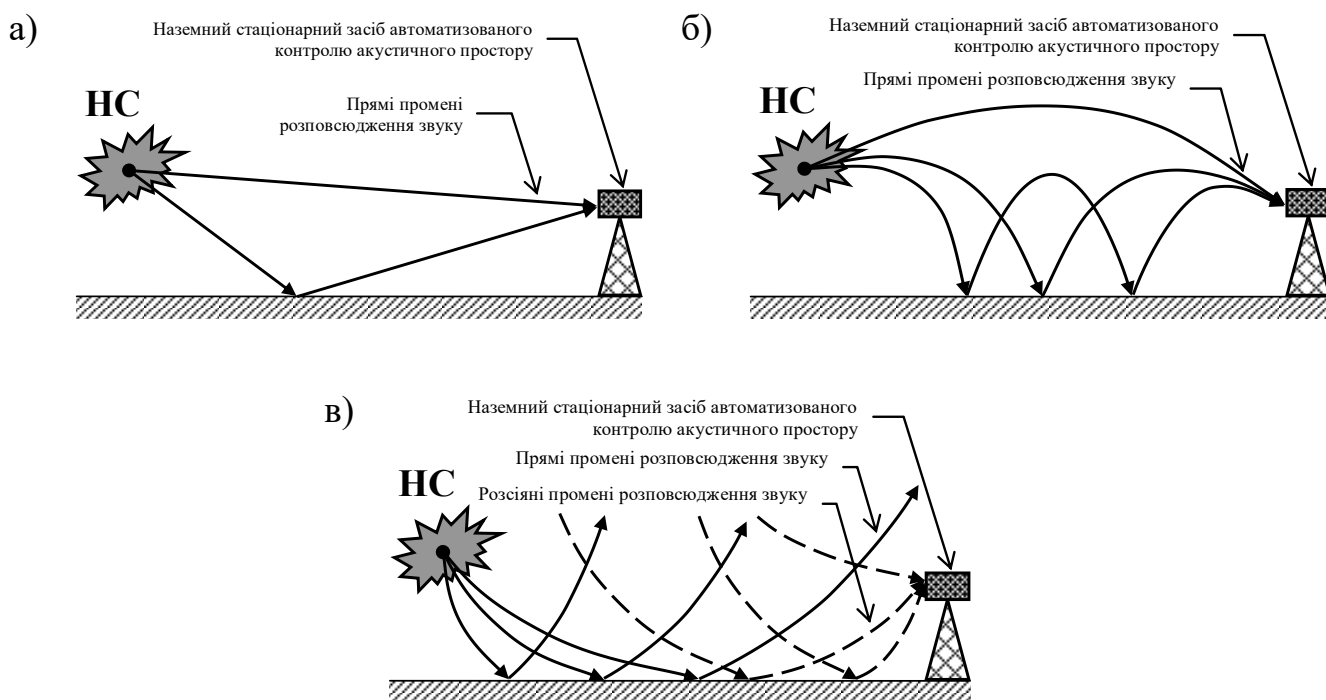


Рис. 2.6. Променеві картини розповсюдження звуку в атмосфері від джерел НС до наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору в різних метеорологічних умовах: а) нейтральний режим; б) хвильовий режим (приведено тільки промені типу «верх–низ»); в) антихвильовий режим

Нейтральний режим розповсюдження звуку (рис. 2.6, а) характерний для відносно не великих відстаней та при прямій видимості. Так, в точці пройму 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. 2.6, б) та антихвильового режиму (рис. 2.6, в). У першому випадку промені загибаються до низу 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 верхніх шарів атмосфери, проникає у цю зону. Ці два режиму розповсюдження звуку працюють в основному на відстанях які перевищують 1 км.

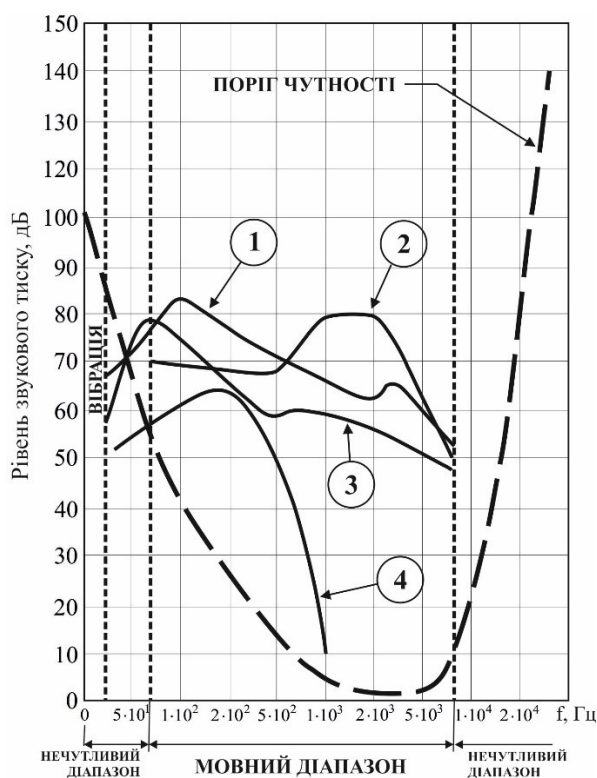


Рис. 2.7. Спектральні характеристики основних завад для функціонування автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору: 1 – транспортні потоки (на відстані 7,5 м) при інтенсивності руху 250 автомобілів за годину; 2 – потяг (на відстані 25 м) при швидкості руху 160 км/год; 3 – місто; 4 – гелікоптер (на відстані 150 м) при 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 ймовірносно виникають різні атмосферні процеси, а також існує велика концентрація на одиниці площі об'єктів різного функціонального призначення, будівель та споруд з різною кількістю поверхів, автотранспортів шляхів тощо. Всі ці фактори сприяють виникненню перешкод (див. рис. 2.7) для ефективного прийому інформаційного сигналу засобів контролю акустичного простору. Тому, розглядаючи умови акустичного моніторингу за зоною НС на територія такого міста виникає доцільність встановлення засобів контролю акустичного простору на відстанях які не перевищують 1 км.

В таких умовах виникає необхідність аналізу ефективності функціонування засобів контролю акустичного простору у режиму слабкої рефракції звуку, який можливо віднести до випадку прямого поширення звукової хвилі в точку спостереження. При цьому режимі (див. рис. 2.6, а) в точку спостереження приходить тільки два променю: прямий промінь, який не має точки повороту, та відбитий від Землі промінь, де променева картина розповсюдження звуку характеризується зневажливо малою кривизною траєкторій променів. Розрахунок звукових тисків у цьому випадку можливо 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,  $L_{abs}(f)$  – вклад класичного та молекулярного поглинання звуку в атмосфері,  $L_t(f)$  – вклад турбулентного послаблення звуку,  $L_e(f)$  – вклад приземного ослаблення звуку

(враховується вплив інтерференції прямої та відбитої хвилі),  $L_{div}(f)$  – вклад 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 компоненту  $L_s(f)$ , 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 засновані на використанні поверхонь або ліній положення для визначення місця виникнення джерела в 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. 2.5). Розташування джерела НС в 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 в просторі, потрібен перетин трьох поверхонь положення або лінії та поверхні положення [109].

На сьогодні відомі три основних методи визначення координат джерел випромінювання, а саме: кутомірний, різницево-daleкомірний, кутомірно-різницево-daleкомірний. Найбільшого поширення набули різницево-daleкомірний та кутомірно-різницево-daleкомірний 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  $\tau$ .

Найбільше перспективним для визначення місця виникнення джерела НС є кутомірно-різницево-daleкомірний метод, який оснований на вимірі кутових напрямів

на джерело випромінювання та різниці відстаней від нього до місць розташування засобів контролю акустичного простору [110]. У найпростішому випадку достатньо мати два засоби контролю. Так, для визначення площинних координат слід виміряти лише азимут  $\beta$  та різницю відстаней  $R = r_1 - r_2$  (рис. 2.8).

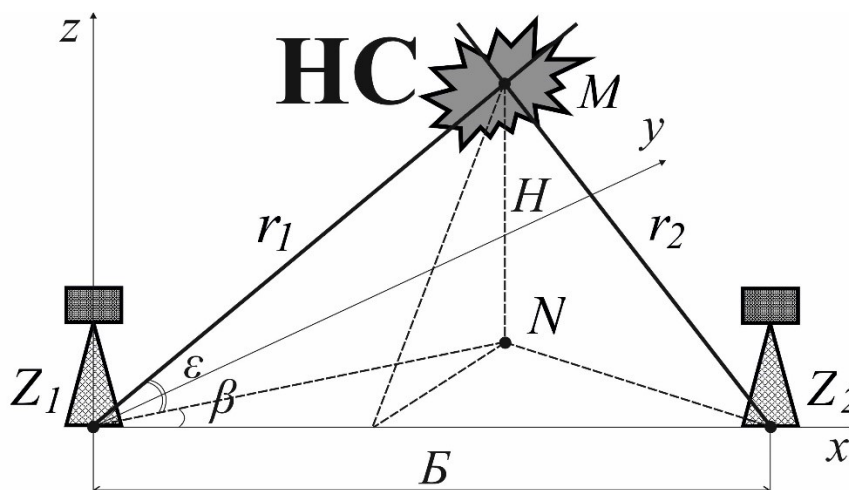


Рис. 2.8. Пасивний кутомірно-різничево-daleкомірний метод акустичного визначення місця виникнення джерела НС, де  $Z_1$  і  $Z_2$  – точки розташування наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору;  $B$  – відстань (база) між точками  $Z_1$  і  $Z_2$ ;  $M$  – точка простору, де виникло джерело НС;  $N$  – проекція точки  $M$  на площину  $XY$ ;  $\beta$  і  $\epsilon$  – азимут і кут міста щодо 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-daleкомірного методу (за даними рис. 2.8) дальність до точки виникнення джерела НС від точки розташування засобу контролю акустичного простору  $Z_1$  визначається як:

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

При цьому, повна похибка визначення місця виникнення джерела НС є багатовимірним нестационарним випадковим процесом і є 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 вимірювальний параметр  $u$ ;  $e(t)$  – зовнішні та внутрішні адитивні завади 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. 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). В 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 в 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.

2. 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 ІДЕНТЕФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ МІСЦЕВОГО РІВНЯ**

У цьому розділі представлені результати досліджень можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС воєнного характеру 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 з РОР, небезпечних подій із використанням вогнепальної зброї та БПЛА. Для проведення експериментів було створено спеціалізовану лабораторну установку, концептуальна схема якої наведена на рис. 3.1.

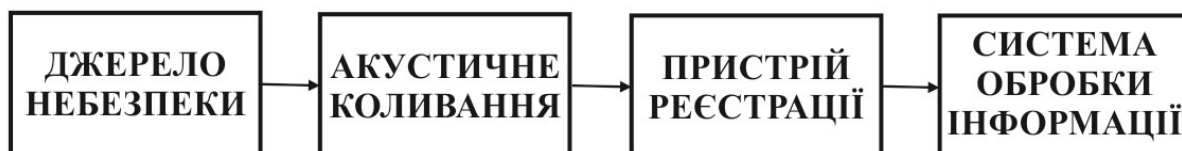


Рис. 3.1. Концепція проведення лабораторних досліджень можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС воєнного характеру місцевого рівня

Концепція проведення лабораторних досліджень базується на реєстрації звукових сигналів, їх обробці з виділенням частотних компонентів та класифікації звукових сигналів, шляхом їх порівняння з АЧХ небезпечних подій, які вже внесені до бази даних.

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

Процес горіння являє собою швидкий окислювально-відновний процес, при якому горюча речовина з'єднується з окиснювачем і виділяється енергія та продукти розкладання [111].

Загальними закономірностями пожеж, відповідно до даних рис. 3.2, є: горіння з виділенням тепла і продуктів повного та неповного згоряння; масообмін, що виникає внаслідок утворення на пожежі конвекційних газових потоків, які забезпечують надходження свіжого повітря в зону горіння та відведення продуктів горіння з неї; 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.

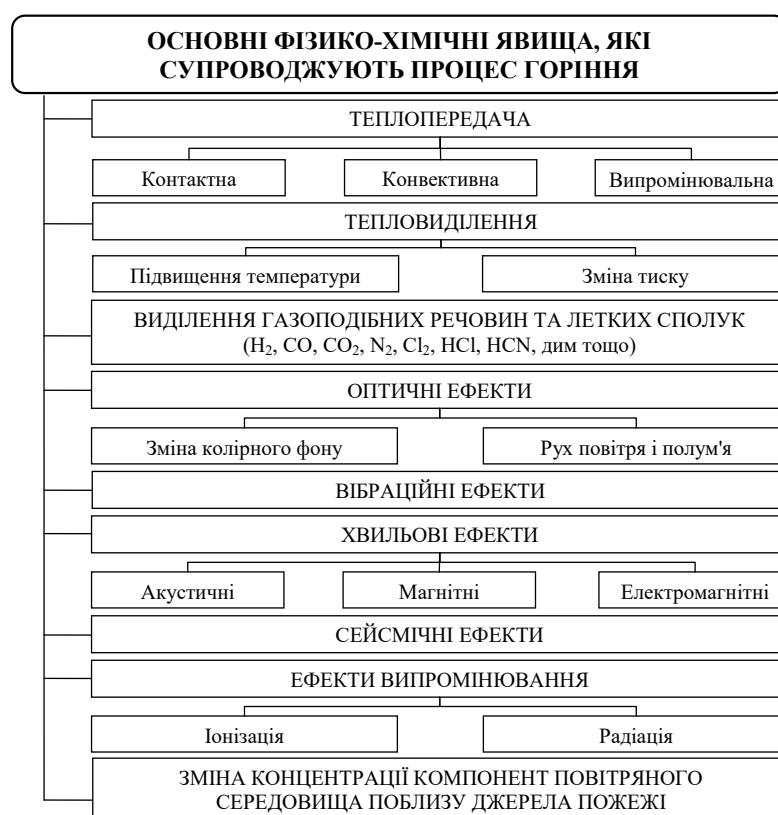


Рис. 3.2. Класифікація основних фізико-хімічних явищ, які супроводжують процес горіння

Реалізація режиму виявлення та ідентифікації джерел загоряння для ефективної боротьби з масштабними пожежами з РОР на території міста свідчить про необхідність технічної реалізації нових фізико-технічних методів аналізу властивостей середовища загоряння, спрямованих на практично миттєвий контроль хвильових факторів небезпеки на етапі зародження та прояву джерел загорянь.

Практична значимість 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 в металах і сплавах, для виявлення прихованих дефектів на стадії їх зародження, для дослідження корозії металів під напругою, вивчення кінетики розвитку тріщин в зварних швах, а також для дослідження акустичних властивостей середовища загоряння [112–115].

На підтвердження цих уявлень необхідно особливо відзначити, що в літературних джерелах [116–119] описані позитивні результати про розширення областей використання методу акустичної емісії, наведені експериментальні спроби виявити можливості цього методу для дослідження хімічних реакцій та фізико-хімічних процесів. Так, для встановлення акустичної емісії, що супроводжує процеси в гомогенних середовищах, були обрані і досліджені процеси розчинення сірчаної кислоти та етилового спирту у воді. В результаті розчинення рідини в рідині були зафіксовані характерні акустичні сигнали та відзначено два принципових моменти, які притаманні явищу виникнення акустичної емісії в фізико-хімічних процесах: а) явище носить універсальний характер; б) імпульсний характер акустичної емісії при хімічних реакціях та фізико-хімічних процесах свідчать про те, що реакція відбувається в невеликому об'ємі і когерентно в часі в окремих ділянках системи, тому має місце колективна взаємодія субстратів.

Отримані результати дозволили зробити припущення про перспективи створення пристрою акустичного контролю на території міста масштабних пожеж з РОР, в основу функціонування якого закладений принцип аналізу властивостей акустичних коливань, які випромінюються джерелом загоряння в результаті прояву

ефекту акустичної емісії, як хвильового чинника на етапах прояву і розвитку пожежної небезпеки.

Так, у підтримку цих припущень авторами у роботах [120–122] представлені результати дослідження амплітудно-частотних спектрів акустичної емісії процесу горіння целюлозовмісних матеріалів, таких як деревина (сосна), бинт, картон, папір та вата. Отримані результати свідчать про стійку залежність амплітудно-частотних характеристик акустичної емісії процесу горіння від природи і хімічного складу цих целюлозовмісних матеріалів.

Дослідження реалізовані шляхом реєстрації спектрів акустичної емісії від осередків займання деяких РОР та аналізу, згідно даних рис. 3.3, впливу фізико-хімічних характеристик цих речовин на кінетику їх високотемпературного окиснення (горіння) [123].



Рис. 3.3. Алгоритм встановлення природи кінетичних ефектів процесу високотемпературного окиснення (горіння) деяких РОР методом акустичної емісії

Враховуючи означене, завдання цього дослідження, згідно даних рис. 3.4, є такими [124]: 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 в залежності від  $n(C)$ ; 3) оцінка початкового ( $\tau_1$ ) та кінцевого ( $\tau_2$ ) 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 в залежності 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.

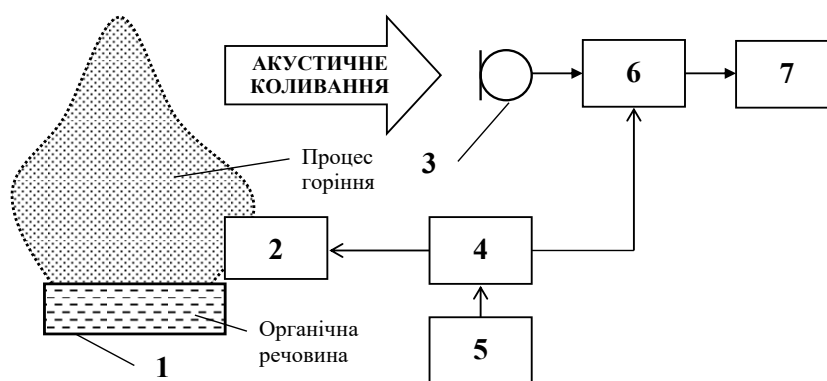


Рис. 3.4. Блок-схема установки дослідження акустичних коливань процесу горіння рідких органічних речовин. Позначення: 1 – металева чаша з аналізованою органічною речовиною; 2 – електричний підпал; 3 – акустичний мікрофон; 4 – вимикач для синхронного включення підпалу (2) та акустичного мікрофона (3); 5 – джерело живлення; 6 – підсилювач; 7 – аналізатор спектру

Прийом та аналіз акустичного сигналу в процесі високотемпературного окислення РОР, як на етапі первинного займання, так і в 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, ґснованого на використанні для аналізу результатів спостережень безрозмірного показника у вигляді відношення розмаху ( $R = x_{\max} - x_{\min}$ ) накопиченого відхилення від середнього до середньоквадратичного відхилення ( $S$ ) [125, 126].

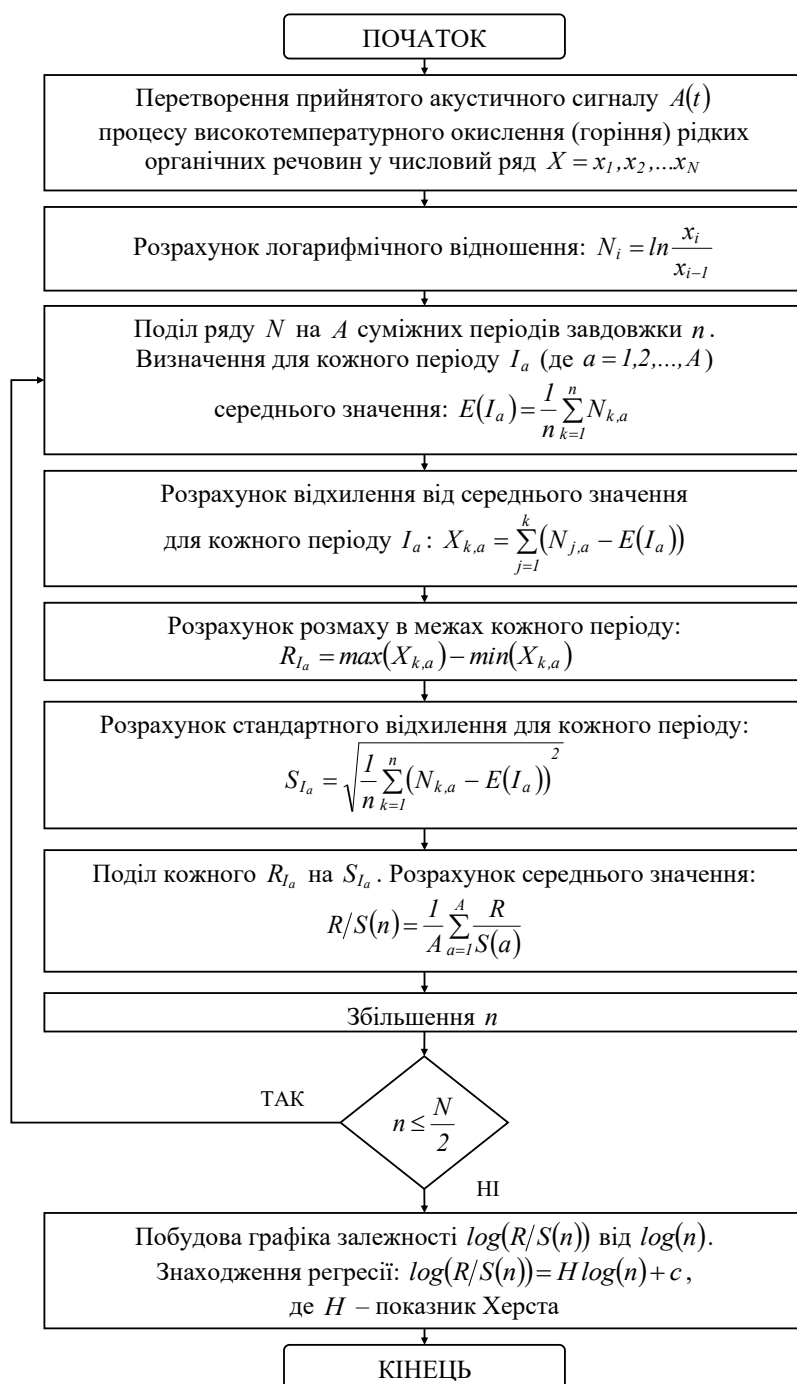


Рис. 3.5. Алгоритм  $R/S$ -аналізу числового ряду, отриманого шляхом перетворення акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) рідких органічних речовин

Алгоритм реалізації  $R/S$ -аналізу числового ряду, який отримано при перетворенні акустичного сигналу процесу горіння РОР, представлено на рис. 3.5. Використання  $R/S$ -аналізу для оцінки числового ряду  $X$  прийнятого акустичного сигналу  $A(t)$  обумовлено наявністю відношення сигнал/шум менше одиниці, що є умовою функціонування нормально-розподіленої системи або близької до неї. В результаті цього, на основі  $R/S$ -аналізу в роботі оцінена фрактальна структура ряду  $X$  як сукупності фоновому сигналу та корисного акустичного сигналу, отриманого у процесі високотемпературного окислення РОР.

З урахуванням особливостей акустичних спектрів для РОР, які були піддані високотемпературному окисленню, виконано розрахунок фрактальної розмірності ( $D_\tau$ ), 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  $D_\tau$  (як ступінь зламаності 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,  $\alpha$  – константа, яка задається. При цьому, Херст емпірично розрахував константу  $\alpha$  для порівняно короткострокових тимчасових рядів природних явищ як 0,5.

Для дослідження були взяті деякі спирти ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  і  $C_8$ ), їхні ізомери ( $C_3$ ,  $C_5$  і  $C_8$ ), а також рідкі вуглеводи ( $C_8$ ,  $C_{12}$  і  $C_{16}$ ). Строго відібрані проби РОР ( $V = 2$  мл) переносились в металеву чашу діаметром 38 мм та висотою 5 мм. Чаша була обладнана електричним підпалом. Схему лабораторної установки наведено на рис. 3.4, 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. 3.6 представлено 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 ROP 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 ROP методом акустичної емісії заснована на уявленнях про те, що характер амплітудно-часової характеристики та АЧХ процесу у вирішальній мірі залежить від фізико-хімічних констант горючої речовини ( $T_{\text{спал.}}$  – температура спалаху;  $T_{\text{займ.}}$  – температура займання;  $T_{\text{с.займ.}}$  – температура самозаймання;  $\Delta T$  – температурний інтервал поширення полум'я;  $P$  – парціальний тиск парів ROP над розчинником;  $\Delta\tau$  – час горіння первинної хмари парів ROP;  $\Delta H_0$  – стандартна ентальпія утворення горючої речовини;  $\Delta H_\tau$  – стандартна ентальпія високотемпературного окиснення горючої речовини).

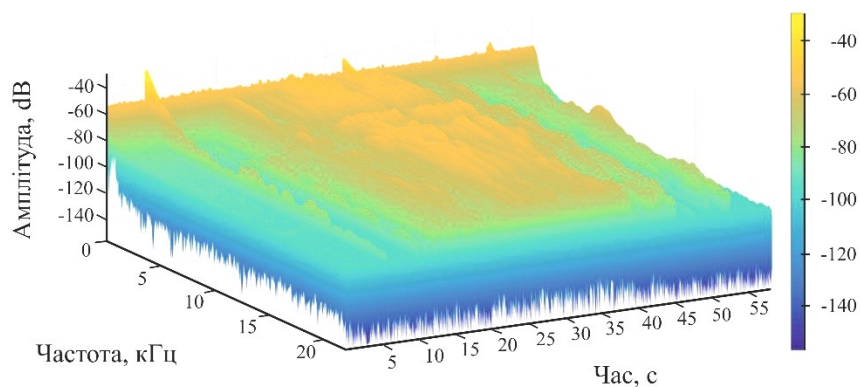


Рис. 3.6. Графік зміни у часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу горіння метанолу

У плані обґрунтування висловленої гіпотези необхідно встановити взаємозв'язок фізико-хімічних констант ROP, які досліджується, з їх структурою (кількість атомів вуглецю в молекулі ROP, ефекти ізомерії) та молярною масою. Для цього складено рівняння реакцій горіння та розраховано величини  $\Delta H_0$  і  $\Delta H_\tau$  ROP (див. табл. 3.1). Аналіз результатів обчислень дозволяє встановити однозначну залежність збільшення теплоти утворення нормальних (*n*–) та ізомерів (*iso*–) спиртів ( $C_1$ – $C_8$ ), а також більш «важких» вуглеводнів ( $C_8$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{16}$ ) від кількості

атомів вуглецю в скелетному каркасі молекул спиртів та величин стандартних теплових ефектів реакцій високотемпературного окиснення РОР.

Таблиця 3.1. – Значення енергій утворення ( $\Delta H_0^\circ$ ) та стандартних теплових ефектів ( $\Delta H_\tau^\circ$ ) 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                                                    | $\Delta H_0^\circ, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | $\Delta H_\tau^\circ, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 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.    | $izo-C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$<br>(вторинний)                                                         | -292,6                                             | -2713,0                                               |
| 7.    | $n-C_5H_{11}OH + 7,5O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$                                                                     | -302,5                                             | -3383,6                                               |
| 8.    | $izo-C_5H_{11}OH + 7,5O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$<br>(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)<br>-259,3 (p)                           | -5505,1 (z)<br>-5496,5 (p)                            |
| 12.   | $C_{12}H_{26}(z) + 18,5O_2 = 12CO_2 + 13H_2O$<br>$\uparrow (M = 172,3 \div 204,0)$                           | -290,9                                             | -8147,2                                               |
| 13.   | $C_{16}H_{34}(z) + 24,5O_2 = 16CO_2 + 17H_2O$<br>$\uparrow (C_{13}-C_{15}; C_{12}-C_{16}; M = 198 \div 199)$ | -373,3                                             | -10782,2                                              |
| 14.   | $C_3H_6O + 4O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$<br>(ацетон) пропанон                                                        | -217,6                                             | -1821,4                                               |

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

Грунтуючись на наявності залежностей показників  $\Delta H_0^\circ$  і  $\Delta H_\tau^\circ$  процесів горіння проб РОР постійного обсягу від показників  $n(C)$  і  $M$ , у роботі висловлено уявлення про наявність подібних залежностей АЧХ випромінюваного в процесі горіння проб

РОР акустичного сигналу від показників  $n(C)$  і  $M$  цих речовин.

Так, згідно з даними табл. 3.1 величини  $\Delta H_0^\circ$  для ізомерів спиртів дещо вище, ніж для аліфатичних ( $n$ –) спиртів. Відповідно, величини  $\Delta H_r^\circ$  для ізомерів спиртів нижчі, хоч і незначно. 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 ( $\tau$ ) акустичного сигналу має бути менше, ніж для спиртів із лінійним вуглецевим каркасом молекул.

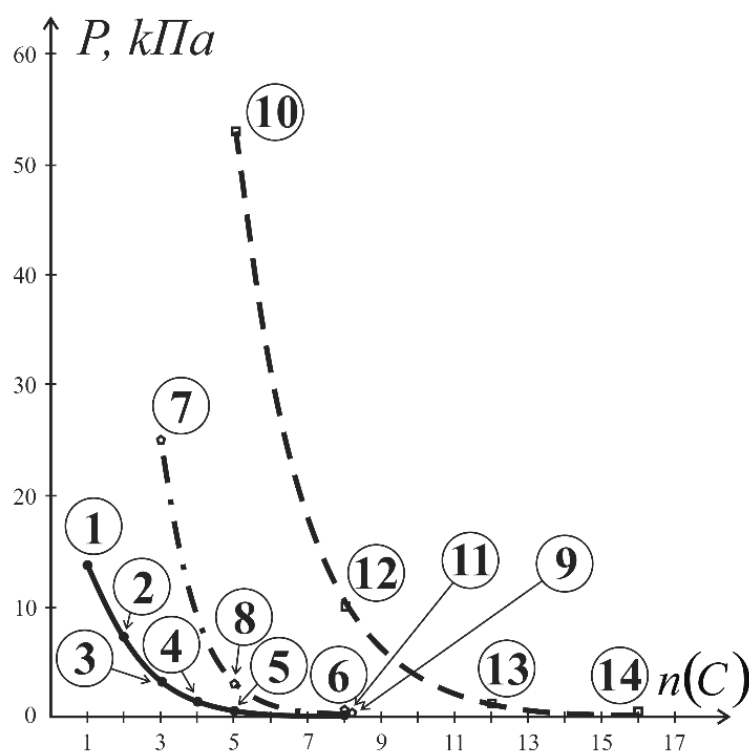


Рис. 3.7. Парціальний тиск парів ( $P$ ) рідких органічних речовин (при температурі  $20^\circ C$ ) залежно від  $n(C)$  у вуглецевому каркасі молекул. Позначення: спирти (●): 1 –  $CH_3OH$ ; 2 –  $C_2H_5OH$ ; 3 –  $iso-C_3H_7OH$ ; 4 –  $n-C_4H_9OH$ ; 5 –  $iso-C_5H_{11}OH$ ; 6 –  $iso-C_8H_{17}OH$ ; кетони (○): 7 – пропанон ( $C_3H_6O$ ); 8 – пентанон ( $C_5H_{10}O$ ); 9 – октанон ( $C_8H_{16}O$ ); вуглеводи (□): 10 – пентан ( $C_5H_{12}$ ); 11 – октан ( $C_8H_{18}$ ); 12 – бензин ( $C_8H_{18}$ ); 13 – дизпаливо ( $C_{12}H_{28}$ ); 14 – парафін ( $C_{16}H_{34}$ ).

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 |           |            |
|-------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|------------|
|       |                                                                 |                    |                 |                  |                                                          | нижній                                  | верхній   | $\Delta T$ |
| 1.    | $CH_3OH$                                                        | 6,0                | –               | 13,0             | 440                                                      | 5                                       | 39        | 34         |
| 2.    | $C_2H_5OH$                                                      | 13,0<br>(з.т.)*    | 16,0<br>(в.т.)  | 18,0             | 400                                                      | 11                                      | 41        | 30         |
| 3.    | $n-C_3H_7OH$                                                    | 23,0<br>(з.т.)     | 29,0<br>(в.т.)  | 30,0             | 371                                                      | 21                                      | 55        | 34         |
| 4.    | $ізо-C_3H_7OH$<br>(2 пропанол)                                  | 14,0<br>(з.т.)     | 18,0<br>(в.т.)  | 21,0             | 430                                                      | 11                                      | 42        | 31         |
| 5.    | $n-C_4H_9OH$                                                    | 35,0<br>(з.т.)     | 41,0<br>(в.т.)  | 43,0             | 340                                                      | 34                                      | 67        | 33         |
| 6.    | $ізо-C_4H_9OH$<br>(вторинний)                                   | 24,0               | –               | 32,0             | 395                                                      | 20                                      | 55        | 35         |
| 7.    | $n-C_5H_{11}OH$                                                 | 48,0               | –               | 57,0             | 300                                                      | 45                                      | 79        | 34         |
| 8.    | $ізо-C_5H_{11}OH$<br>(третинний)                                | 24,0               | –               | 34,0             | 410                                                      | 23                                      | 55        | 32         |
| 9.    | $n-C_8H_{17}OH$                                                 | 86,0               | –               | 92,0             | 260                                                      | 80                                      | 116       | 36         |
| 10.   | $ізо-C_8H_{17}OH$<br>(ізооктанол)                               | 77,0<br>(з.т.)     | 82,0<br>(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)<br>( $M = 172 \div 204$ )                    | 37,0<br>65,0–110,0 | 59,0            | 112,0            | 210-370                                                  | 35<br>99                                | 92<br>155 | 57<br>56   |
| 13.   | $C_{16}H_{34}$ (р)<br>$C_{13}-C_{15}$<br>( $M = 181 \div 212$ ) | –                  | 95,0<br>(в.т.)  | 116              | 190                                                      | 83                                      | 146       | 63         |
|       | $C_{12}-C_{16}$<br>( $M = 172 \div 226$ )                       | 98,0<br>(з.т.)     | 107,0<br>(в.т.) | 112              | 200                                                      | 95                                      | 145       | 50         |
| 14.   | $C_3H_6O$<br>ацетон (кетон)                                     | -18,0<br>(з.т.)    | -9,0<br>(в.т.)  | -5               | 535<br>(в повітрі)<br>485<br>(в атм.<br>O <sub>2</sub> ) | -20                                     | 6         | 26         |

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

Оскільки початок процесу високотемпературного окиснення РОР відбувається

через первинну стадію – запалення газоподібної хмари (парів) над розчинником, то час займання (спалаху) визначається пружністю парів ( $P$ ) вуглеводнів при стандартних температурах (рис. 3.7) та величинами  $T_{\text{спал.}}$ ,  $T_{\text{займ.}}$ ,  $T_{\text{с.займ.}}$  і  $\Delta T$  (табл. 3.2).

За даними табл. 3.2, зі збільшенням  $n(C)$  або  $M$  ( $n$  – та  $iso$  –) спиртів  $T_{\text{спал.}}$  та  $T_{\text{займ.}}$  збільшуються, причому для  $iso$  – спиртів ці величини дещо нижчі, ніж для  $n$  – спиртів, а значення  $\Delta T$  у досліджуваному ряду спиртів мало змінюються, але спостерігається зміщення величини інтервалу  $\Delta T$  за умов збільшення  $n(C)$  або  $M$  у бік високих температур. Подібний характер зміни мають величини  $T_{\text{спал.}}$ ,  $T_{\text{займ.}}$  і  $\Delta T$  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  $T_{\text{займ.}}$  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.

На рис. 3.8 представлені розраховані за амплітудно-часовими характеристиками значення  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  і  $\Delta \tau$  для спиртів, кетону та вуглеводнів (всі речовини в рідкій фазі), де чітко фіксується практично незначний вплив ізомерії спиртів на величини  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  і  $\Delta \tau$  в залежності від кількості  $C$  – атомів у каркасі молекул ізоспиртів. Спостережуване можна пояснити рівнем розбіжності температур  $T_{\text{спал.}}$  і  $T_{\text{займ.}}$   $n$  – та  $iso$  – спиртів (табл. 3.2).

У разі розгляду вуглеводнів із високим вмістом  $C$  при звичайних температурах значення їх  $P$  приблизно рівні нулю, тому потрібно 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  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  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  $n(A_m(t)) - n(C)$ ,  $n(A_m(t)) - M$

,  $n(A_m(f)) - n(C)$  и  $n(A_m(f)) - M$ .

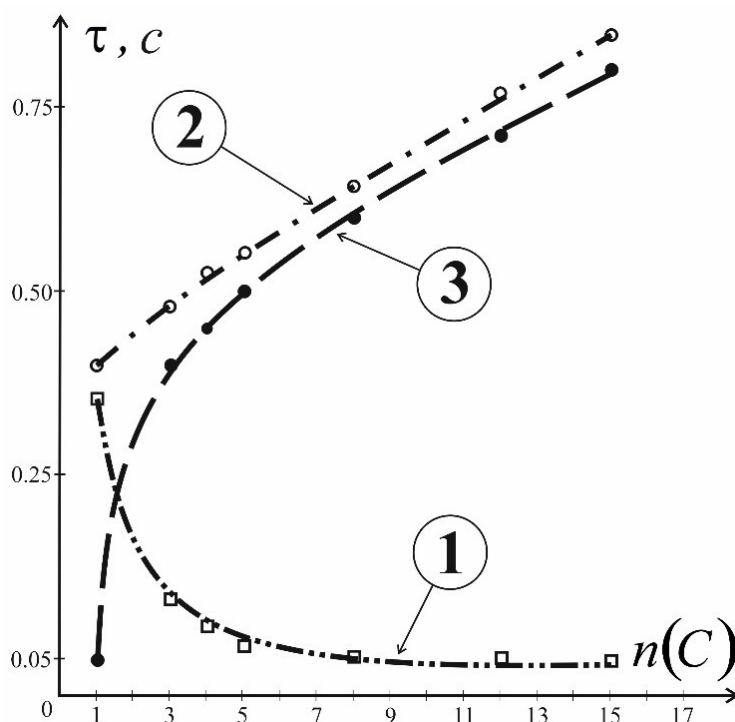


Рис. 3.8. Значення часу: початку спалаху –  $\tau_1$ , закінчення спалаху –  $\tau_2$  та тривалості спалаху (горіння первинного шару парів POP) –  $\Delta\tau$  для досліджуваних спиртів, кетону та вуглеводів. Позначення: 1 –  $\tau_1$ ; 2 –  $\tau_2$ ; 3 –  $\Delta\tau$

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 акустичної емісії при горінні спиртів та вуглеводів знято за умови постійного обсягу проби пального ( $V_{\text{пробы}} = \text{const}$ ), 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 уявлення про зменшення потужності процесу емісії зі

збільшенням  $n(C)$  або  $M$  за умов  $V_{\text{пробы}} = \text{const}$ . Так, характер зміни виду амплітудної модуляції акустичного сигналу при перебігу реакції горіння РОР може бути встановлений на основі результатів розрахунків параметра повторюваності (подібності) амплітудної модуляції прийнятого акустичного сигналу, на основі аналізу фрактальної розмірності  $D_r$  (рис. 3.3), яка розраховувалася на основі показника Херста часових рядів прийнятого сигналу (відповідно до представленого на рис. 3.5 алгоритму  $R/S$ -аналізу). Встановлення особливостей зміни фізичних параметрів амплітудної модуляції прийнятого акустичного сигналу від процесу акустичної емісії під час горіння РОР (в умовах  $V_{\text{пробы}} = \text{const}$ ), а також його амплітудно-частотного відображення, представлені на рис. 3.9 і 3.10, де використані наступні позначення РОР: 1 –  $\text{CH}_3\text{OH}$ ; 2 –  $n\text{-C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ; 3 –  $n\text{-C}_8\text{H}_{17}\text{OH}$ ; 4 –  $\text{iso-C}_3\text{H}_7\text{OH}$ ; 5 –  $\text{iso-C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$ ; 6 –  $\text{iso-C}_8\text{H}_{17}\text{OH}$ ; 7 –  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ; 8 –  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ ; 9 –  $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ; 10 –  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  (ацетон).

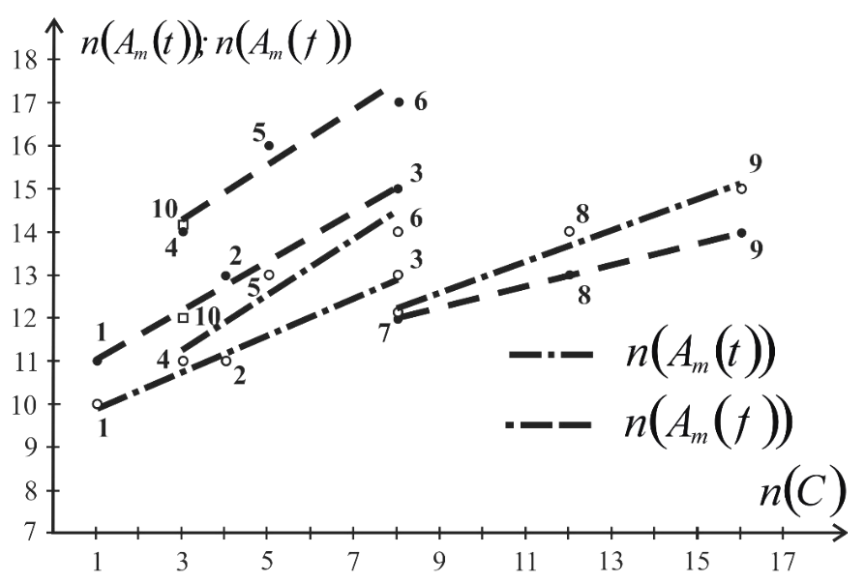


Рис. 3.9. Характер зміни кількості амплітудних максимумів  $n(A_m(t))$  (в інтервалі часу – від займання до повного припинення горіння) і  $n(A_m(f))$  (у діапазоні частот – 5 Гц–25 кГц) у прийнятому акустичному сигналі при перебігу реакції горіння спиртів, кетону та вуглеводнів залежно від  $n(C)$  у вуглецевому каркасі РОР

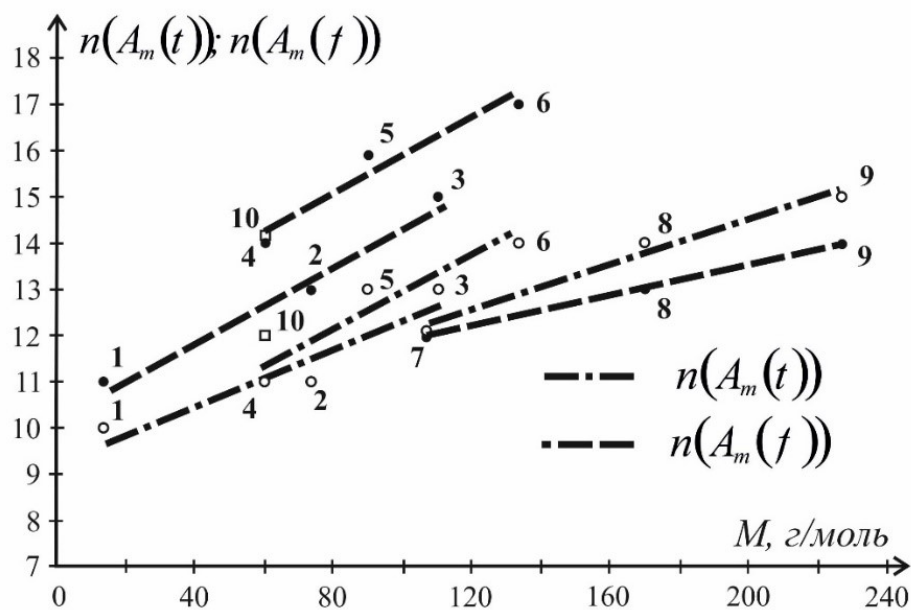


Рис. 3.10. Характер зміни кількості амплітудних максимумів  $n(A_m(t))$  (в інтервалі часу – від займання до повного припинення горіння) і  $n(A_m(f))$  (у діапазоні частот – 5 Гц–25 кГц) у прийнятому акустичному сигналі при перебігу реакції горіння спиртів, кетону та вуглеводнів залежно від їх молярної маси ( $M$ )

Подані на рис. 3.9 і 3.10 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 впливає з представленого 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. 3.9) або величиною молярної маси ( $M$ ) РОР (див. рис. 3.10). 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).

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  $n(A_m(t))$  и  $n(A_m(f))$  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. 3.9). Подібне розташування зазначених показників спостерігається і у разі розгляду їх залежно від  $M$  (рис. 3.10).

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 можлива зміна динаміки горіння вуглеводнів, відповідно виду амплітудної модуляції і виду спектральних гармонік акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії 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. 3.9 і 3.10).

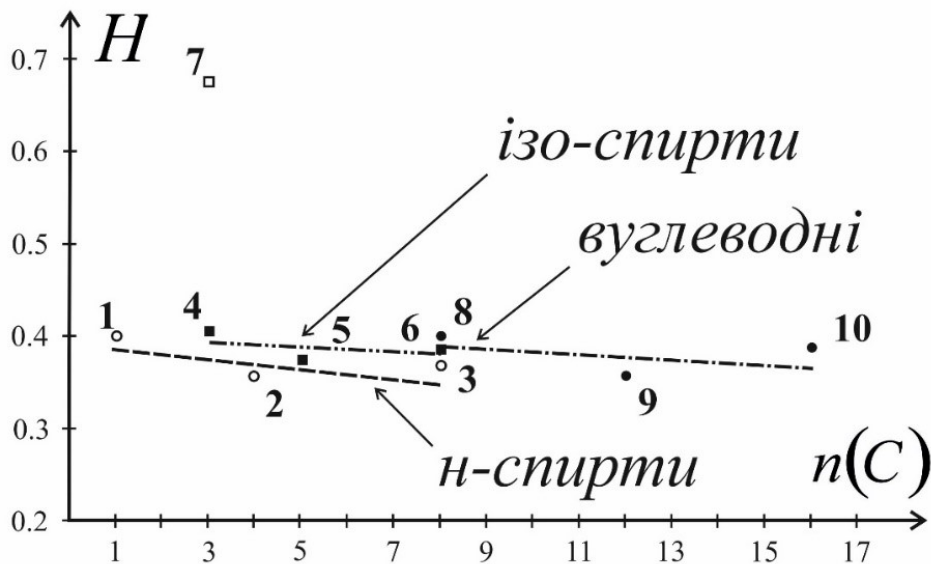


Рис. 3.11. Характер зміни показника Херста ( $H$ ) амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких рідких органічних речовин від їх  $n(C)$

Викладені результати експериментальних досліджень дозволяють створити

банк даних геоінформаційної системи автоматизованого контролю акустичного простору міста для достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж з РОР. Так, при виникненні на території міста масштабної пожежі система акустичного моніторингу дозволить у реальному масштабі часу ідентифікувати (за наявності в базі даних інформації щодо АЧХ горіння РОР) природу та координати осередку займання, що є джерелом інформації для системи підтримки прийняття антикризових рішень.

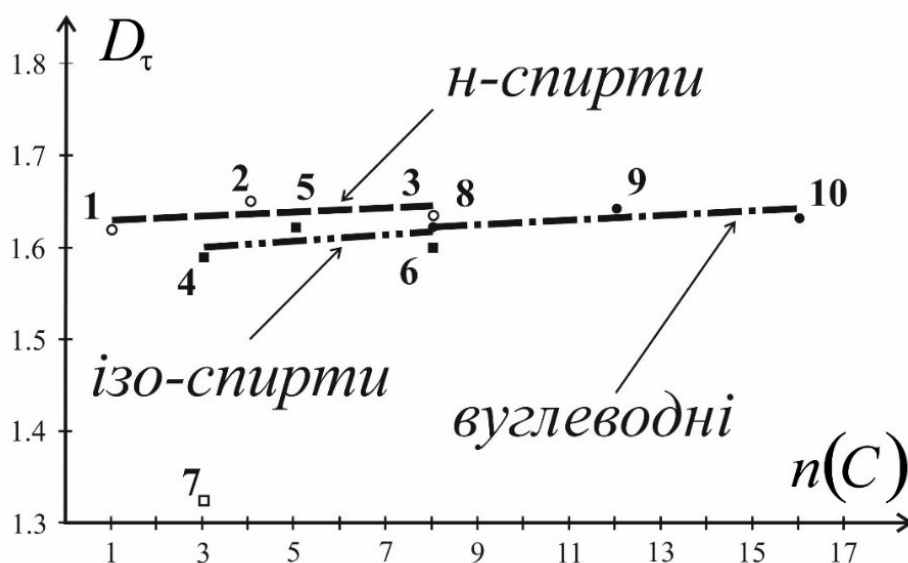


Рис. 3.12. Характер зміни показника фрактальної розмірності ( $D_\tau$ ) амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких рідких органічних речовин від їх  $n(C)$

З метою підвищення достовірності та надійності результатів визначення природи РОР (у режимі високотемпературного окислення (горіння)) необхідні результати тестування характеру повторюваності у часі ( $\tau$ ) кількості максимумів амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії протягом часу горіння проб РОР. І тому на рис. 3.11 і 3.12 представлені результати розрахунків показників Херста ( $H$ ) та фрактальної розмірності  $D_\tau$ .

На рис. 3.11 і 3.12 використані наступні позначення РОР: 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 –  $C_{16}H_{34}$ .

Незалежно від природи РОР ( $n(C)$ ) значення показників  $H$  і  $D_\tau$  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  $D_\tau$  для ізомерів спиртів (приблизно на 0,05 одиниць). За абсолютними значеннями показника  $H$  процес горіння вивчених РОР 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.

Таким чином, за результатами дослідження можливостей акустичного методу щодо ідентифікації джерел НС, пов'язаних з масштабними пожежами РОР, встановлено, що динаміка процесу високотемпературного окиснення (горіння), тобто залежності кількості максимумів ( $n(A_m(t))$  та  $n(A_m(f))$ ) амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії, визначається фізичними ( $T_{спал.}$ ,  $T_{займ.}$ ,  $T_{с.займ.}$ ,  $\Delta T$ ,  $P$ ) та фізико-хімічними термодинамічними параметрами ( $\Delta H_0^\circ$ ,  $\Delta H_\tau^\circ$ ) процесу і 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 ( $T_{спал.}$ ) або займання ( $T_{займ.}$ ). Встановлено, що чим більше  $P$  і менше  $T_{спал.}$  ( $T_{займ.}$ ), 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  $D_\tau$  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

$D_r$  для ізомерів спиртів (приблизно 0,05 одиниць). Практична сталість параметрів  $H$  і  $D_r$  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 акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких органічних речовин, що дозволяє 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

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

Розробка методу базується на дослідженнях амплітудно-частотних характеристик звукових хвиль від пострілів з вогнепальної зброї. Для проведення лабораторних досліджень застосовано лабораторну установку, функціональна схема якої представлена на рис. 3.13.

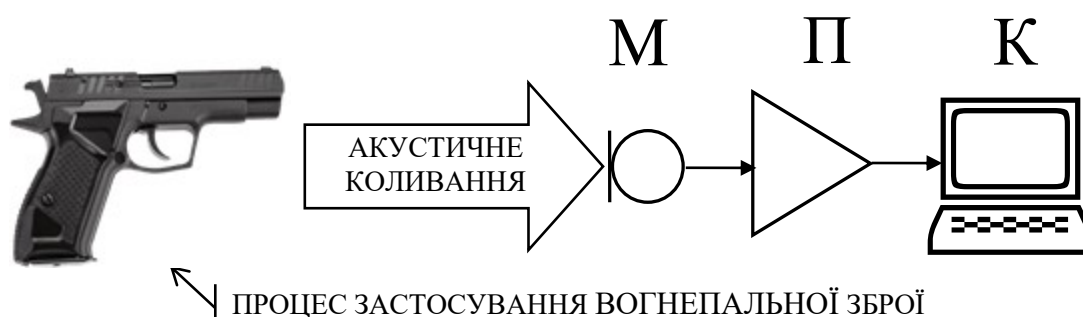


Рис. 3.13. Схема лабораторної установки: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням

Під час експерименту були зібрані 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 3-х 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. 3.14 – 3.16.

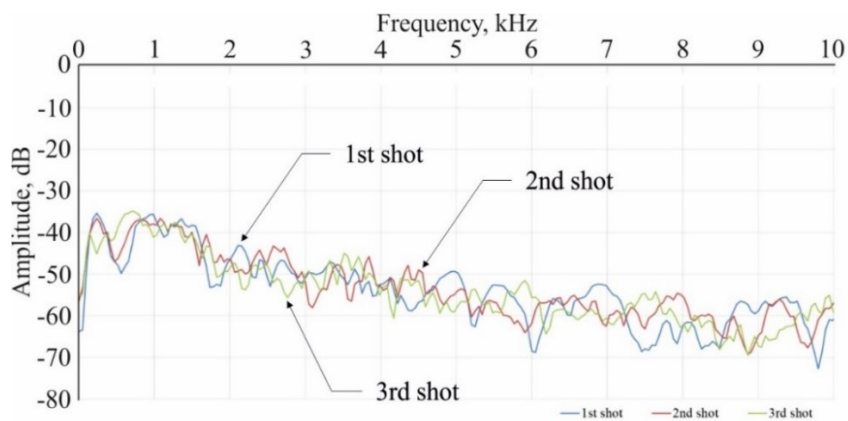


Рис. 3.14. Спектри пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

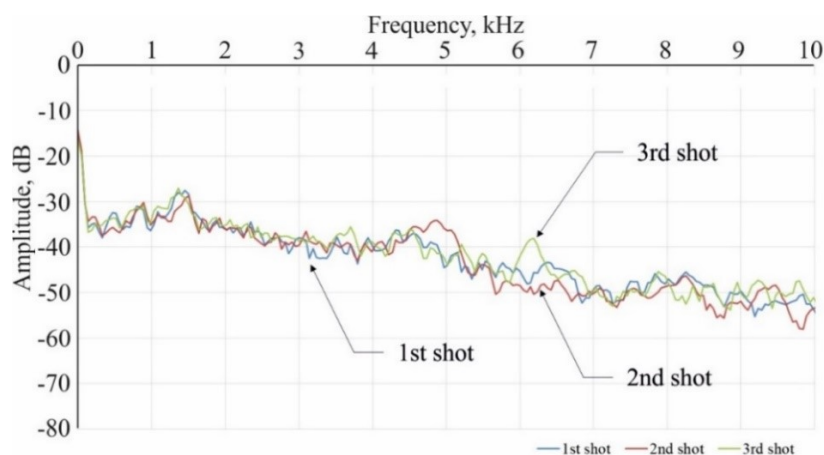


Рис. 3.15. Спектри пострілів з травматичного пістолета «Форт-14Р»

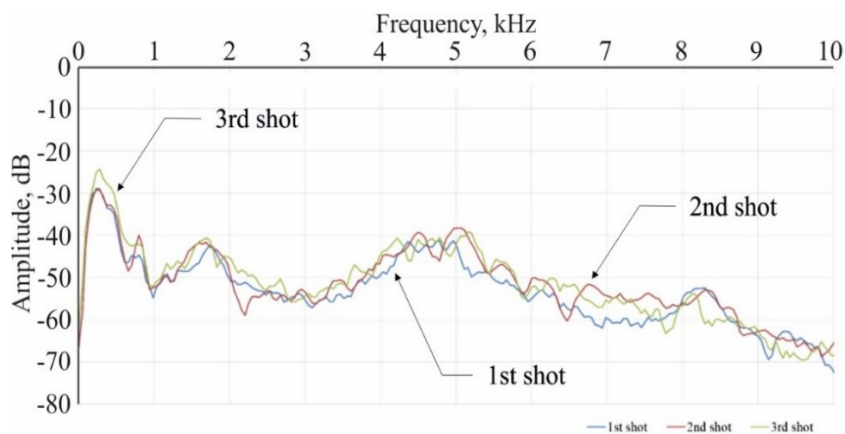


Рис. 3.16. Спектри пострілів з автомата АК-74 калібру 5.45 мм

За результатами порівняльного аналізу складено середню характеристику акустичного спектру пострілу для трьох типів вогнепальної зброї, шляхом визначення характеристичних частот з максимальними значеннями амплітуд, результати обробки експериментальних даних наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. – 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  |

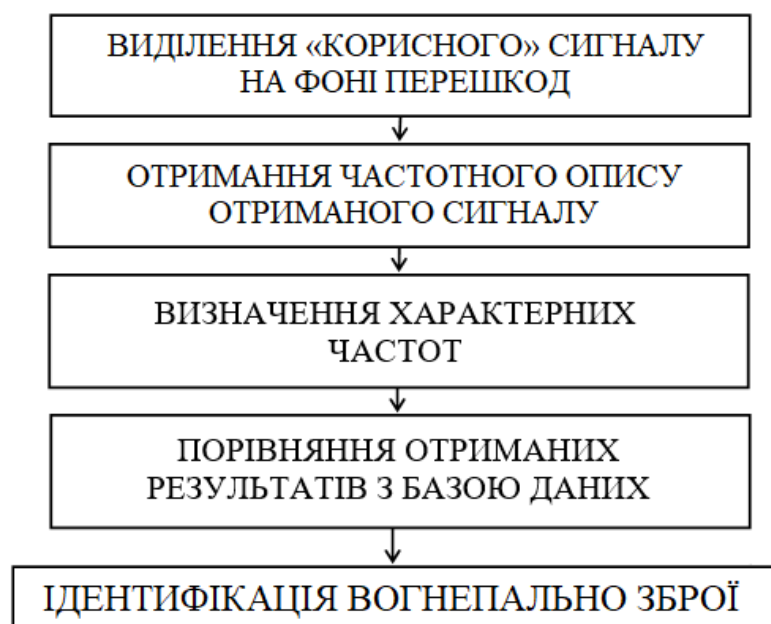


Рис. 3.17. Алгоритм ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів

Для ідентифікації пострілу запропоновано наступний алгоритм, представлений на рис. 3.17, а саме: 1) виділення «корисного» сигналу на фоні перешкод (фільтрування); 2) отримання частотного (спектрального) опису отриманого сигналу; 3) визначення характеристичних частот (частоти з амплітудою, що перевищує встановлене порогове значення (рис. 3.18) отриманого сигналу; 4) порівняння отриманих результатів з базою даних щодо ідентифікації вогнепальної зброї.

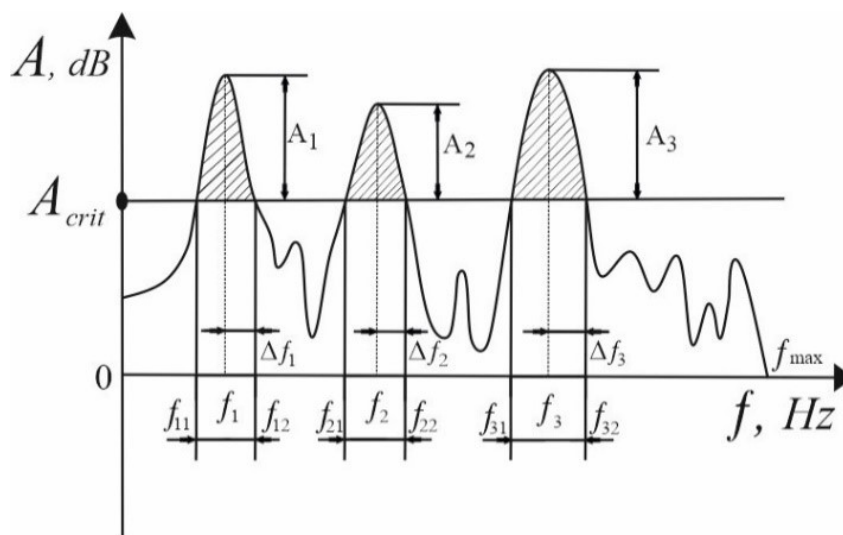


Рис. 3.18. Визначення характеристичних частот спектру пострілу та визначення енергії спектра на відповідних гармоніках:  $A_i$  – амплітуда  $i$ -ї гармоніки спектру;  $f_i$  – частота  $i$ -ї гармоніки спектру;  $\Delta f_i$  – допустимий діапазон коливання частоти  $i$ -ї гармоніки спектру прийнятого сигналу (див. табл. 3.3);  $A_{crit}$  – встановлене порогове значення для амплітуд гармонік спектру (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. При виявленні 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, і 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 спектру прийнятого сигналу.

Для кожного типу зброї енергія спектра прийнятого сигналу перевищуючого порогове значення визначається як:

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

де  $A_{crit}(f)$  – функція огинаючої спектру перевищуючого 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 спектру та забезпечення відповідної точності і надійності ідентифікації вогнепальної зброї за показником енергії спектра прийнятого сигналу перевищуючого порогове значення у роботі використано вагову функцію вікна Хеммінга, яка допомагає зменшити спотворення, що виникають через розриви спектру 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 зброї спостерігаються зміщення (відхилення) акустичних спектральних характеристик (рис. 3.19). 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 спектру пострілів слід враховувати різні параметри, такі як маса кулі, кількість пороху в патроні, швидкість кулі при вильоті із ствола, довжина та температура ствола тощо.

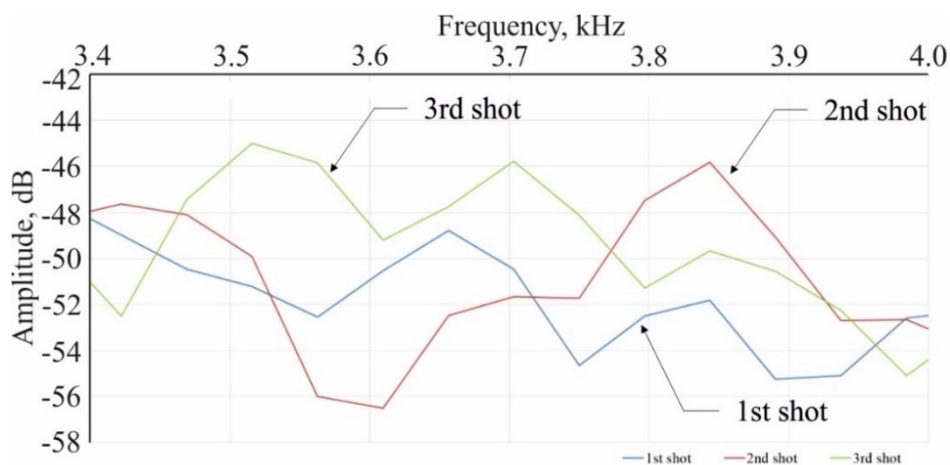


Рис. 3.19. Зміщення у спектральних характеристиках пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

В результаті серії пострілів можна спостерігати, що спектри зсуваються у частотному діапазоні на незначну величину. Ми припускаємо, що допустиме відхилення  $\Delta f_i$  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 спектру пострілу, а також для аналізу акустичного оточення в бойових умовах.

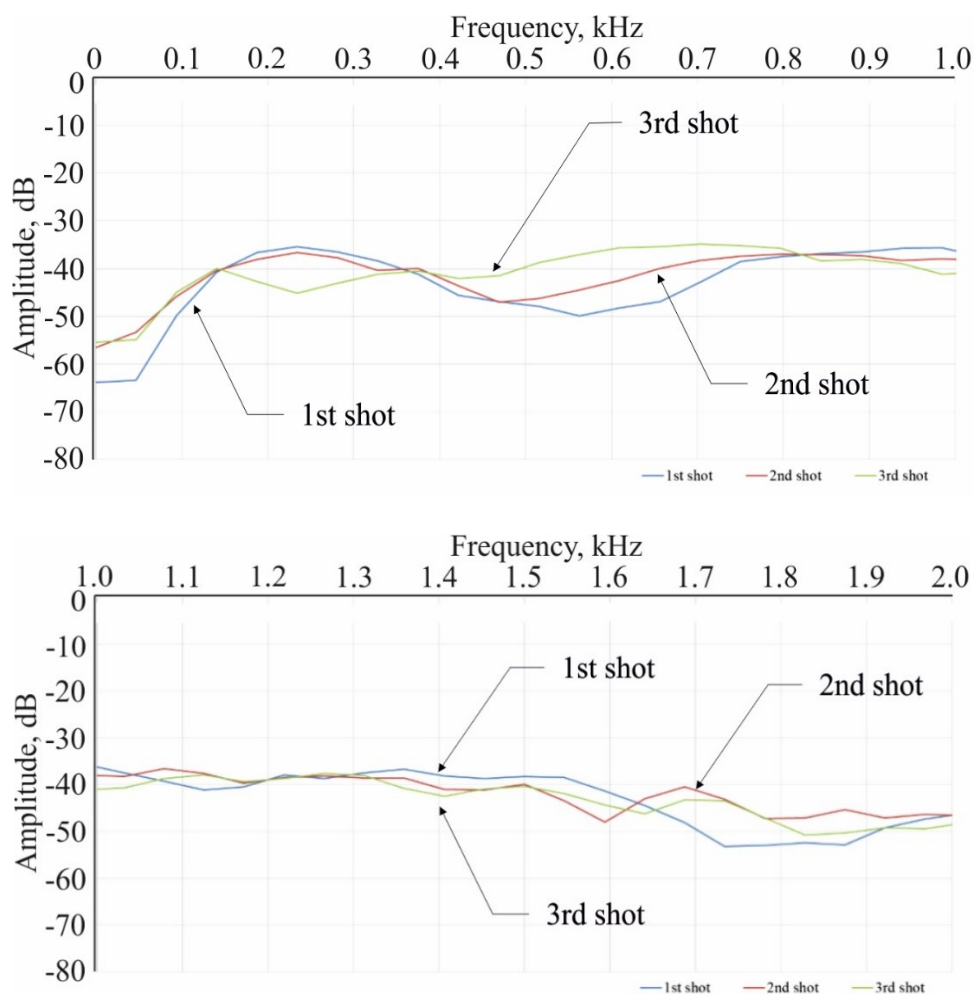


Рис. 3.20. Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів пістолета Макарова калібру 9 мм

Одним із найбільш значущих факторів, що впливає на відповідні характеристики спектрів звуку пострілів зі стрілецької зброї, є температура ствола. При пострілі пороховий заряд перетворюється на гази та високотемпературні продукти згоряння. Ці гази створюють сильний тиск, необхідний для виштовхування кулі через ствол. В результаті відбувається значне нагрівання ствола, що може суттєво впливати на характеристики звукового спектру.

За результатами низки досліджень і аналізу спектрів, можна відзначити, що акустичні параметри трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм,

травматичного пістолета «Форт-14Р», автомата АК-74 калібру 5,45 мм відрізняються. Проте, на окремих частотних діапазонах спектру є певна схожість (рис. 3.20 – 3.22).

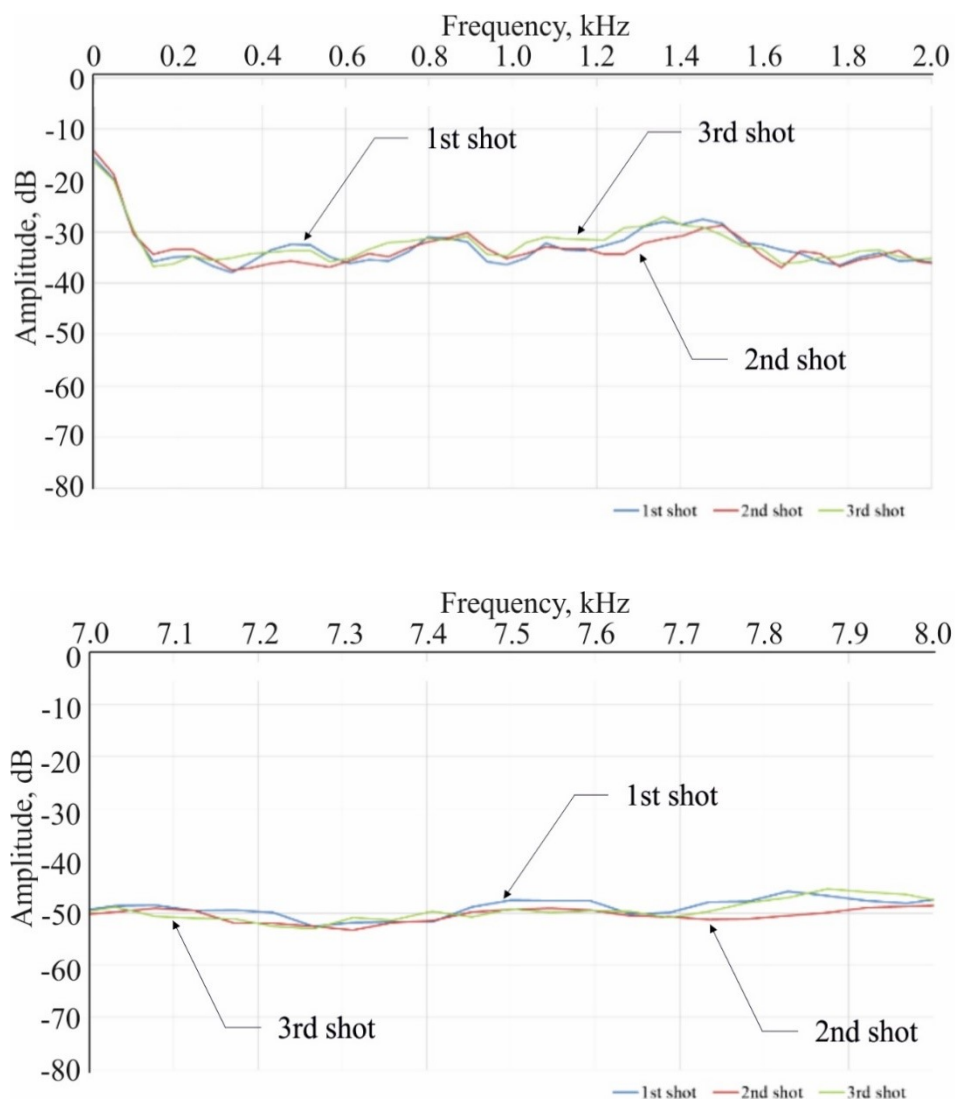


Рис. 3.21. Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів травматичного пістолета «Форт-14Р»

Для підвищення точності ідентифікації акустичного спектру в роботі застосовано метод віднімання спектрів. Це передбачає порівняння спектра, отриманого в поточному експерименті, з еталонним спектром, який був отриманий експериментально після проведення серії більше 50 пострілів. Так, для прикладу візьмемо три спектра пострілів зі стрілецької зброї (рис. 3.23), і порівняємо його з еталонним спектром, наведеним на рис. 3.24.

Достовірність результатів експерименту перевірялась методом критерію

Ст'юдента, який призначений для оцінки статистичної значимості різниць між середніми значеннями вибірок, а також 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. 3.25).

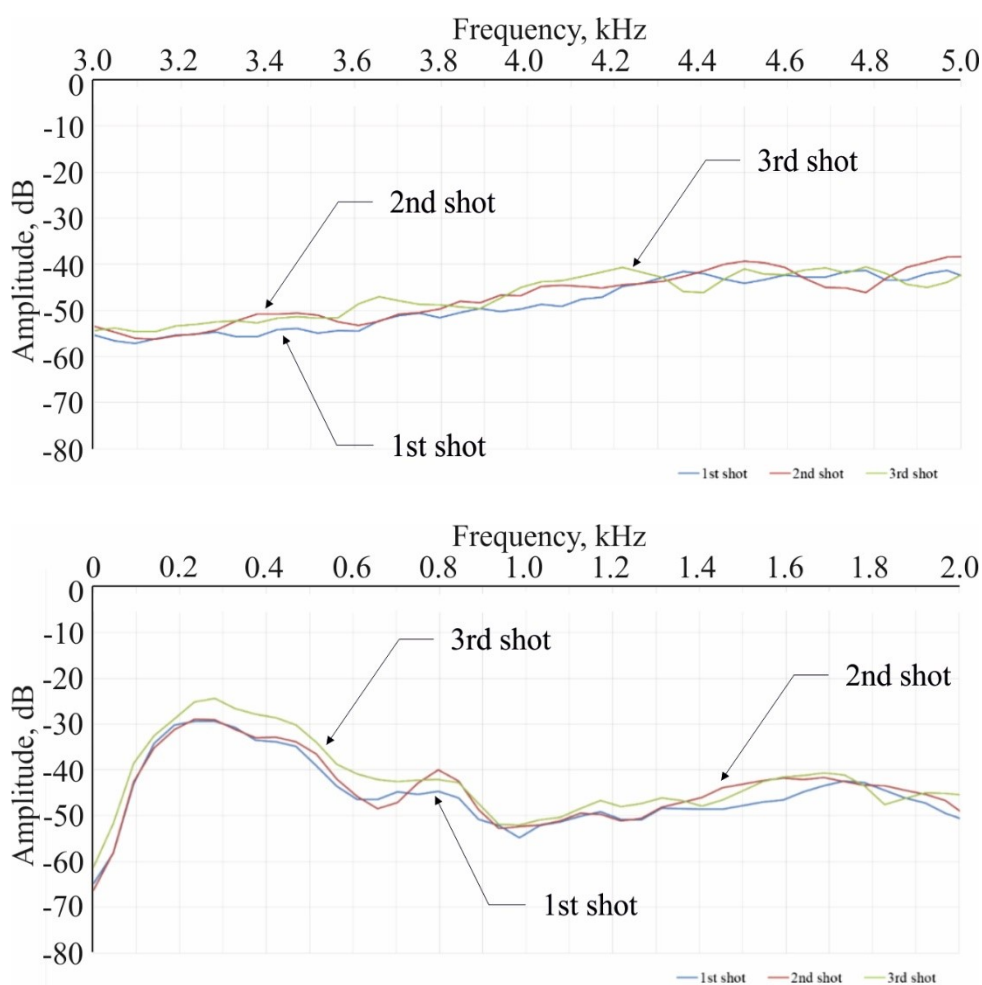


Рис. 3.22. Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів автомата АК-74 калібру 5,45 мм

Після застосування процедури віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів, результати наведені на рис. 3.26, можна зробити висновок, що лише один з представлених спектрів при цьому методі дає

результат, що наближається до нуля. Це свідчить про те, що отриманий сигнал з високою ймовірністю 0,95 відповідає еталонному, а саме постріл з автомата АК-74 калібру 5,45 мм.

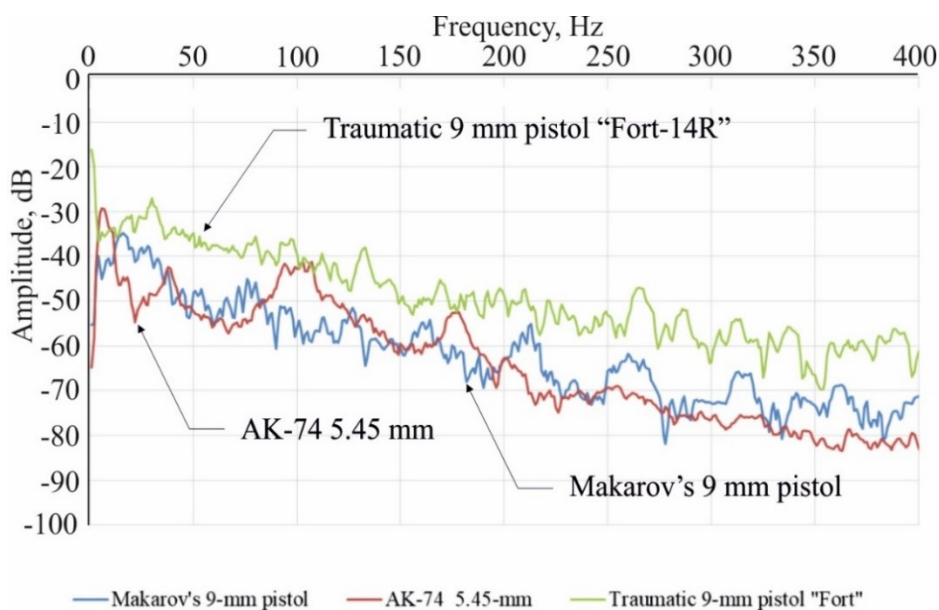


Рис. 3.23. Загальна амплітудно-частотні характеристики трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» та автомата АК-74 калібру 5,45 мм

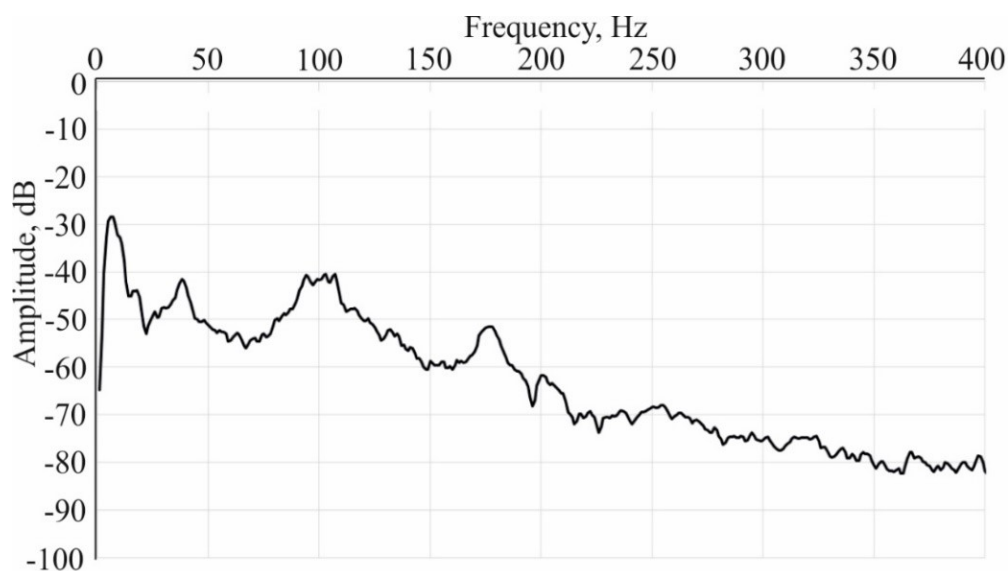


Рис. 3.24. Амплітудно-частотна характеристика еталонного спектра пострілу

Отримані результати дають змогу розробити функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів

вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу [127].

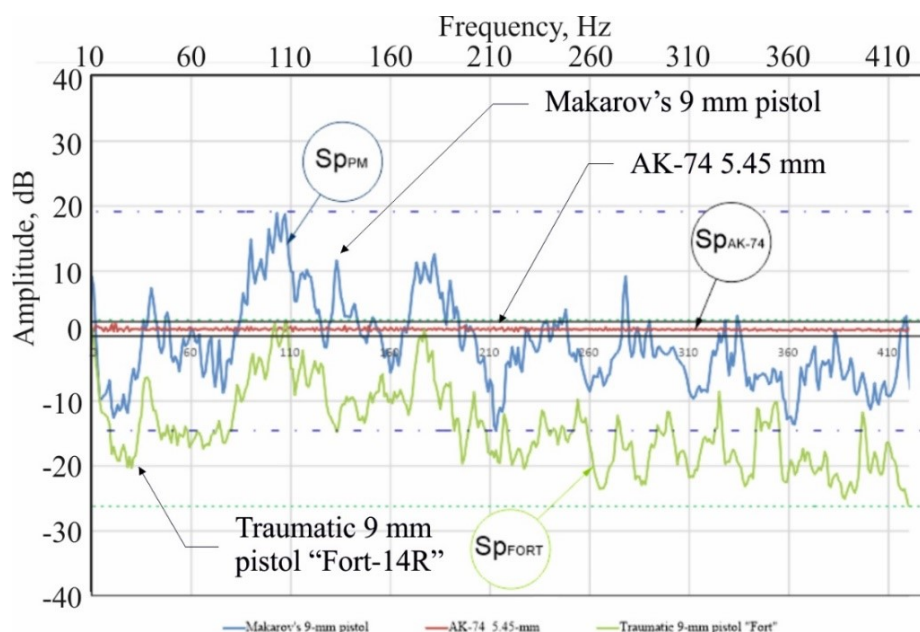


Рис. 3.25. Максимально допустиме значення  $S_p$  пострілів

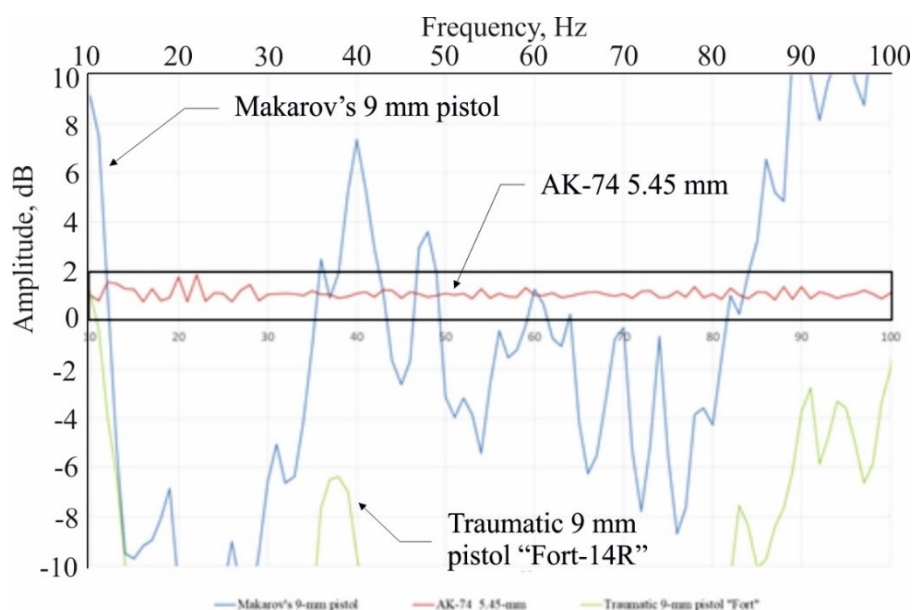


Рис. 3.26. Результати віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів

Функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними

властивостями прийнятого акустичного сигналу представлено на рис. 3.27.

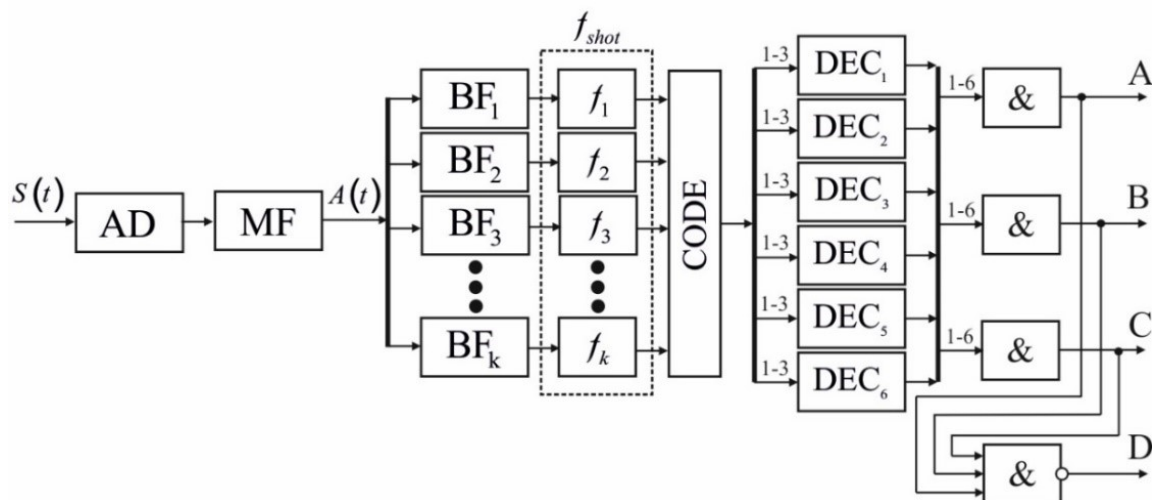


Рис. 3.27. Функціональна схема ідентифікації вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу:  $S(t)$  – вхідний акустичний сигнал, амплітуда якого змінюється у часі  $t$ ; AD – акустичний датчик; MF – медіанний фільтр;  $BF_k$  – смугові фільтри, де  $k$  – кількість смугових фільтрів;  $f_{shot}$  – блок характеристикних частот пострілів; DEC – декодер; & – логічний елемент «Кон’юнкція»

Реальний аналоговий акустичний сигнал від пострілу вогнепальної зброї надходить до акустичного датчику 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 фільтру MF.

Виділення характеристикних частот ( $f_i, \text{де } i = 1, \dots, k$ ) 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 спектру). Результати аналізу експериментальних даних формують базу даних – блок характеристикних 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 з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» 9 мм та автомата АК-74 калібру 5.45 мм представлено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4. – Комбінації двійкового коду відповідно до характеристик частот спектрів пострілів досліджуваних зразків вогнепальної зброї

| Вид зброї        | Канал | Резонансна частота смугового фільтру, 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<br>9 мм       | A     | 1                                         | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1        | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 1        | 0        | 0        |
| АК-74<br>5.45 мм | B     | 0                                         | 0     | 1     | 1     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        |
| Форт-14Р         | C     | 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 розряди (рис. 3.27), шляхом застосування декодерів (DEC) та логічних елементів «Кон'юнкція». В залежності від результатів аналізу, в каналах А, В та С 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 дозволяє розробити засіб автоматичного визначення типу вогнепальної зброї, функціонування якого спирається на кодуванні гармонік прийнятого акустичного сигналу на характеристичних частотах та порівняння отриманих результатів з 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 наступних процедур:

1) розміщення по території міста наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору; 2) збір та систематизація інформації про стан акустичного простору міста; 3) ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу; 4) моделювання розвитку НС терористичного характеру на території міста; 5) розробку 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 пістолету Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолету «Форт-14Р» та автомату 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**

В основу методу автоматизованої ідентифікації різних типів БПЛА покладено особливості АЧХ акустичних сигналів при польоті БПЛА. Цей підхід дозволяє виділити ключові характеристики сигналу, що є унікальними для кожного типу БПЛА.

Запропонований у роботі [128] метод ідентифікації було реалізовано шляхом проведення експериментів із використанням різних типів БПЛА. Для цього акустичні

дані реєструвалися за допомогою спеціально створеної лабораторної установки (рис. 3.28).

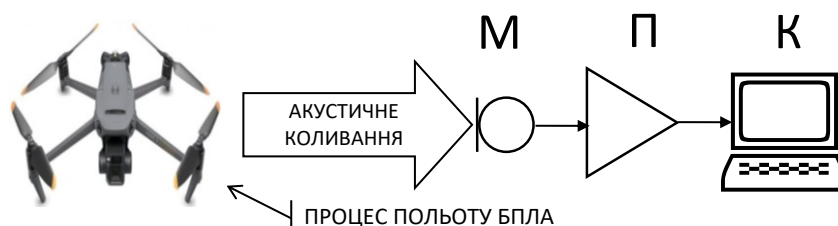


Рис. 3.28. Схема лабораторної установки для аналізу амплітудно-частотних характеристик акустичних коливань процесу польоту різних типів безпілотнох літальних апаратів: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням

Під час експерименту були зібрані 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.

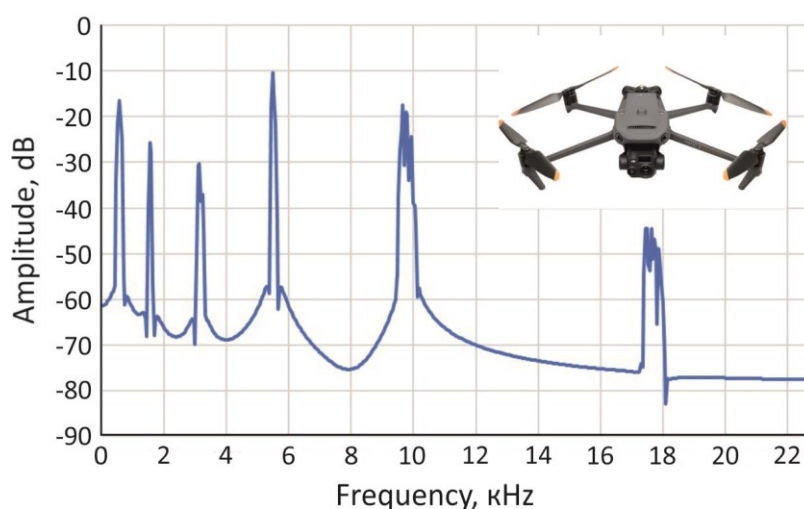


Рис. 3.29. Спектр акустичного сигналу польоту безпілотнох літального апарату типу DJI Mavic 3t

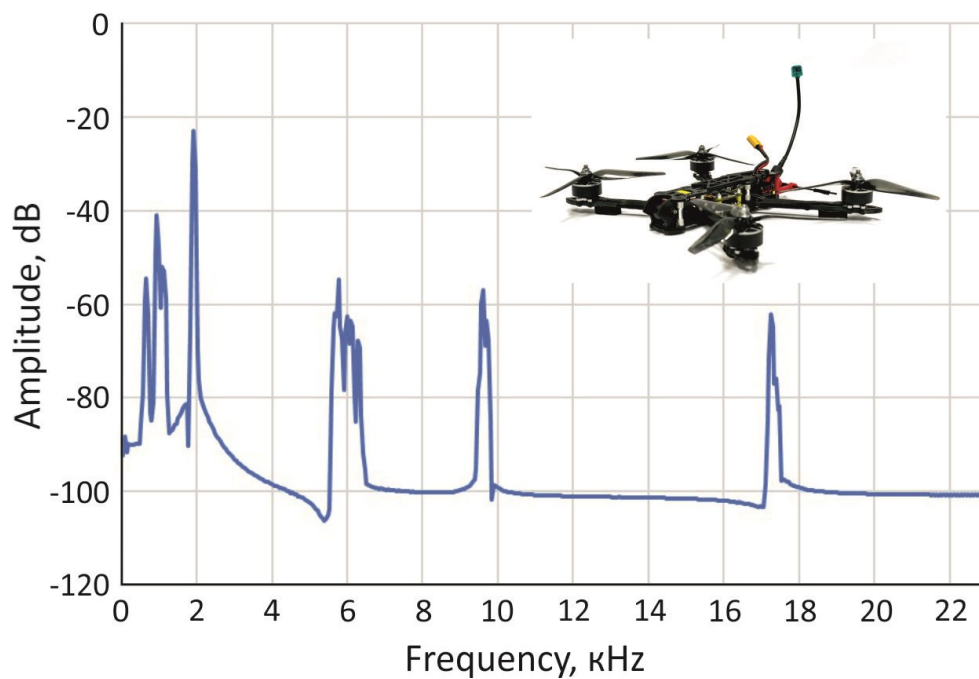


Рис. 3.30. Спектр акустичного сигналу польоту безпілотного літального апарату типу FPV 7inch ProDrone

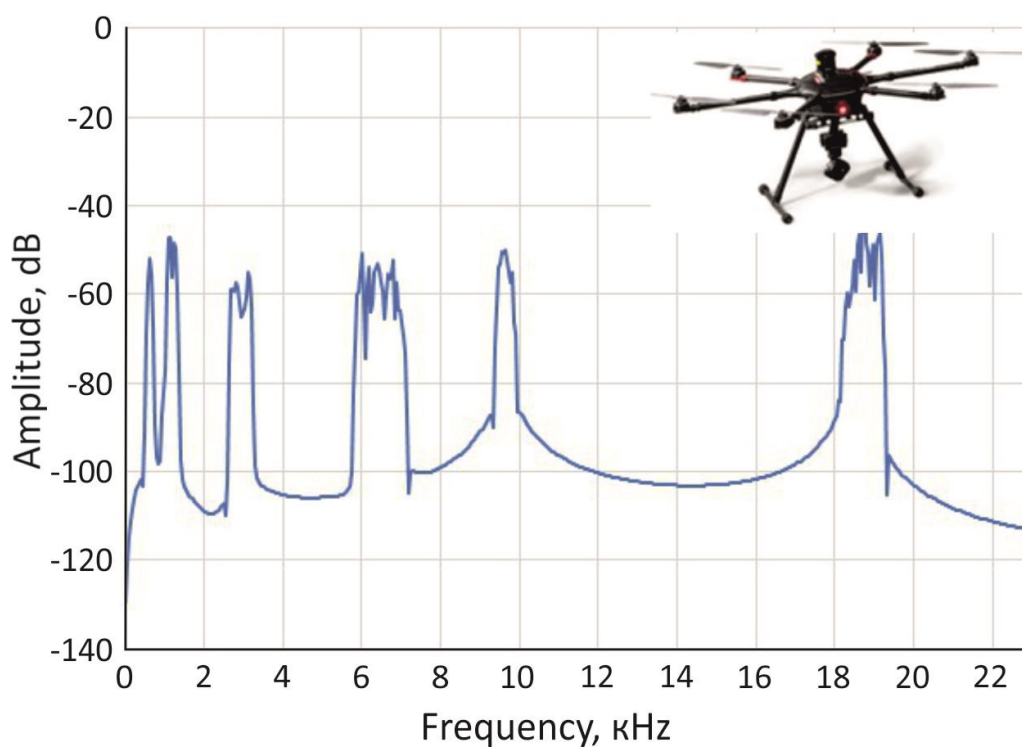


Рис. 3.31. Спектр акустичного сигналу польоту безпілотного літального апарату типу Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK

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 дозволяє відокремити характерні частоти, відповідні конкретному типу БПЛА. Такий підхід було використано авторами у роботі [127] при ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів. Цей підхід також було використано при виявленні та класифікації БПЛА, амплітудно-частотні характеристики яких наведено на рис. 3.29–3.31.

Представлені на рис. 3.29–3.31 спектральні характеристики вказують на їх унікальність та можливість розробки достовірного експрес методу ідентифікації різних типів БПЛА за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів, які утворюються в процесах польотів дронів.

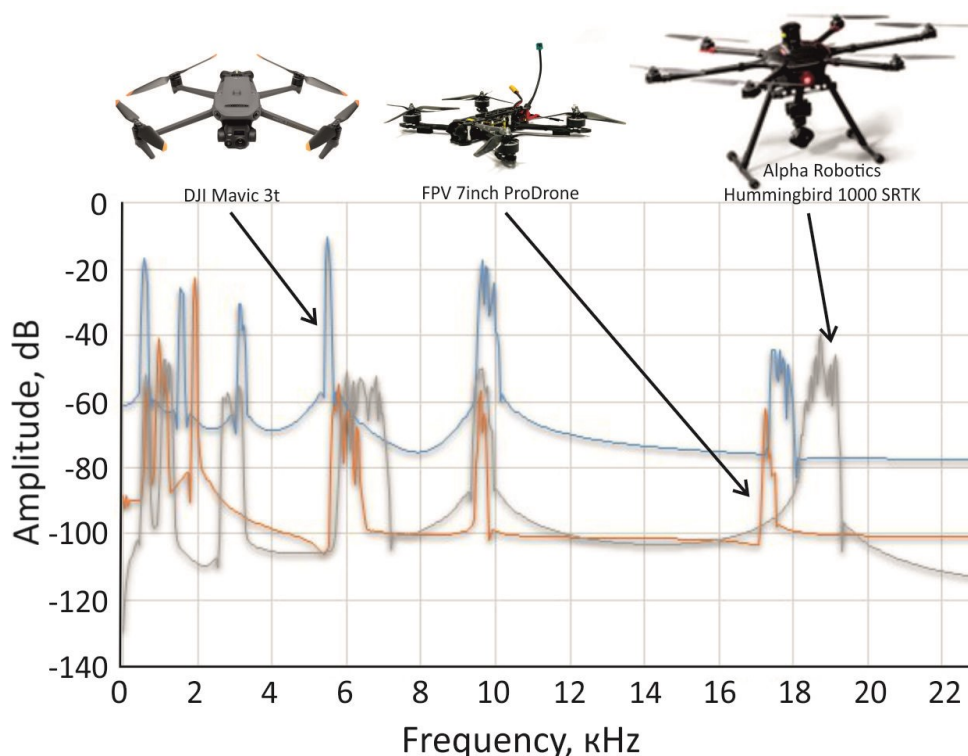


Рис. 3.32. Спектри акустичних сигналів польотів трьох безпілотних літальних апаратів: DJI Mavic 3t; FPV 7inch ProDrone; Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK

З метою визначення характеристичних частот акустичних сигналів від досліджуваних зразків БПЛА на рис. 3.32 представлено сумарний графік амплітудно-частотної характеристики цих моделей БПЛА. На графіку відображено залежність амплітуди від частоти для кожної моделі, що дає змогу оцінити їхні 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 задач ідентифікації БПЛА в реальних умовах.

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.

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 агрегативних 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 агрегативних 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.

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 амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів від кожного БПЛА. Результати кластеризації частотних гармонік за амплітудою представлено у вигляді дендрограми на рис. 3.33.

Представлені на рис. 3.33 результати кластеризації дозволили на рівні 20 одиниць евклідової відстані об'єднати гармоніки амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів польотів досліджуваних БПЛА у чотири кластера. До першого кластера увійшли гармоніки з однаковими рівнями амплітуд, які характерні для усіх трьох БПЛА. Контроль складових цього кластера дозволить ідентифікувати факт появи у охоронюваній зоні БПЛА. До другого, третього та четвертого кластерів увійшли гармоніки, які є індивідуальними для кожного типу БПЛА. Так, до другого кластеру увійшли гармоніки які є характерними для амплітудно-частотної характеристики акустичних сигналів польоту БПЛА типу DJI Mavic 3t. До третього кластеру увійшли гармоніки які є характерними для амплітудно-частотної характеристики акустичних сигналів польоту БПЛА типу FPV 7inch ProDrone. До четвертого кластеру увійшли гармоніки які є характерними для амплітудно-частотної характеристики акустичних сигналів польоту БПЛА типу Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK. Контроль складових другого, третього та четвертого кластерів дозволить ідентифікувати тип БПЛА, що з'явився у охоронюваній зоні.

За результатами кластерного аналізу розроблено керуючий алгоритм удосконаленого методу виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів БПЛА. Схема представлена на рис. 3.34.

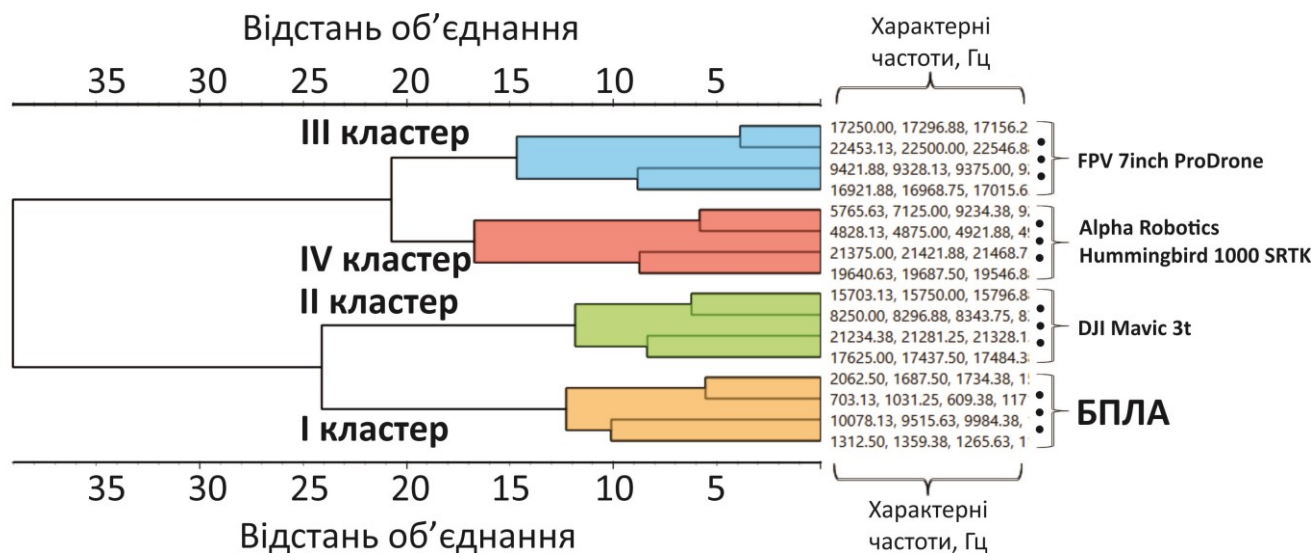


Рис. 3.33. Дендрограма кластеризації гармонік амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів польотів досліджуваних безпілотних літальних апаратів

Представлений алгоритм передбачає виконання наступних процедур:

- 1) моніторинг акустичного простору охоронюваної зони 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 амплітудно-частотної характеристики прийнятого сигналу із складовими I кластеру. В залежності від кількості збігів визначається ймовірність виявлення/невиявлення БПЛА;
- 5) ідентифікація виявленого БПЛА, шляхом одночасного порівняння гармонік амплітудно-частотної характеристики прийнятого сигналу із складовими II, III та IV кластерів. В залежності 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 єдиної державної системи цивільного захисту та виконання її складовими задач за призначенням, спрямованих на запобігання виникненню НС або її ліквідацію та мінімізацію наслідків.

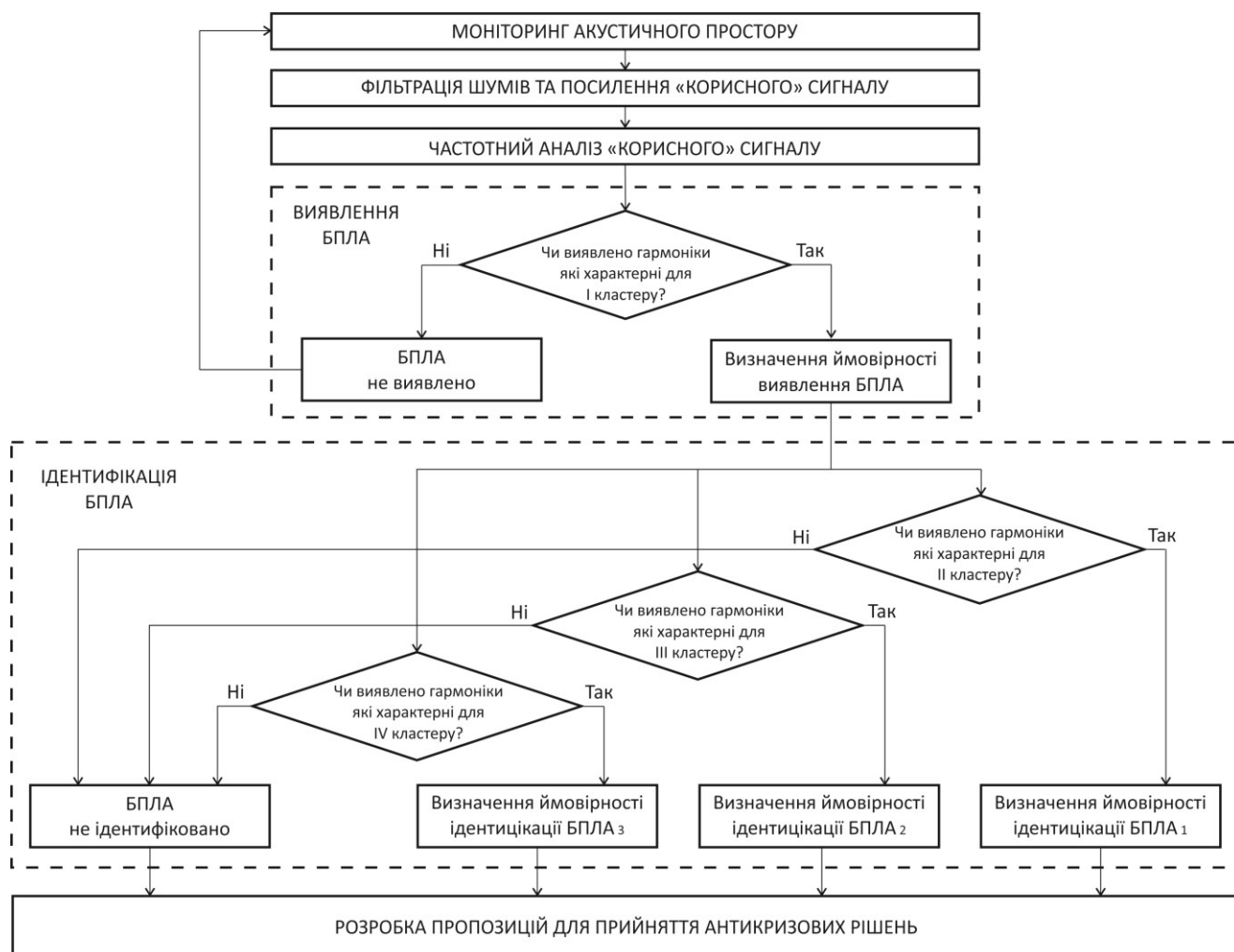


Рис. 3.33. Алгоритм виявлення та ідентифікації за АЧХ акустичних сигналів БПЛА

Для реалізації представленого на рис. 3.34 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 спектру для різних моделей БПЛА. Перехід до вейвлет-перетворення пов'язаний з тим, що час для

аналізу акустичних сигналів від БПЛА значно довший порівняно з тривалістю звуків пострілів, що забезпечує більш детальну та якісну обробку даних.

Тому, у основу автоматичного виявлення БПЛА та визначення їх типів в роботі покладено аналіз частотно-часових характеристик акустичних сигналів від БПЛА, що дозволяє 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 часова і частотна 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 більший масштаб, тим нижча 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, при стабільному положенні, після певного періоду часу відбувається корекція його розташування в просторі, і він переходить до роботи зі збільшеною потужністю.

У якості прикладу, на рис. 3.35 наведено відклики на акустичному спектрі БПЛА типу FPV 7inch ProDrone. У зазначеному діапазоні виділяються середні

значення з максимальними амплітудами частот:  $f_1 = 0,65 \text{ кГц}$ ,  $f_2 = 2,5 \text{ кГц}$ ,  $f_3 = 6 \text{ кГц}$ ;  $f_4 = 10 \text{ кГц}$  та  $f_5 = 17 \text{ кГц}$ . Якщо амплітуда в цих діапазонах частот перевищує задане значення ( $Magnitude_1 = 1$ ) запускається операція підрахунку відліків протягом 15 с з їх накопиченням.

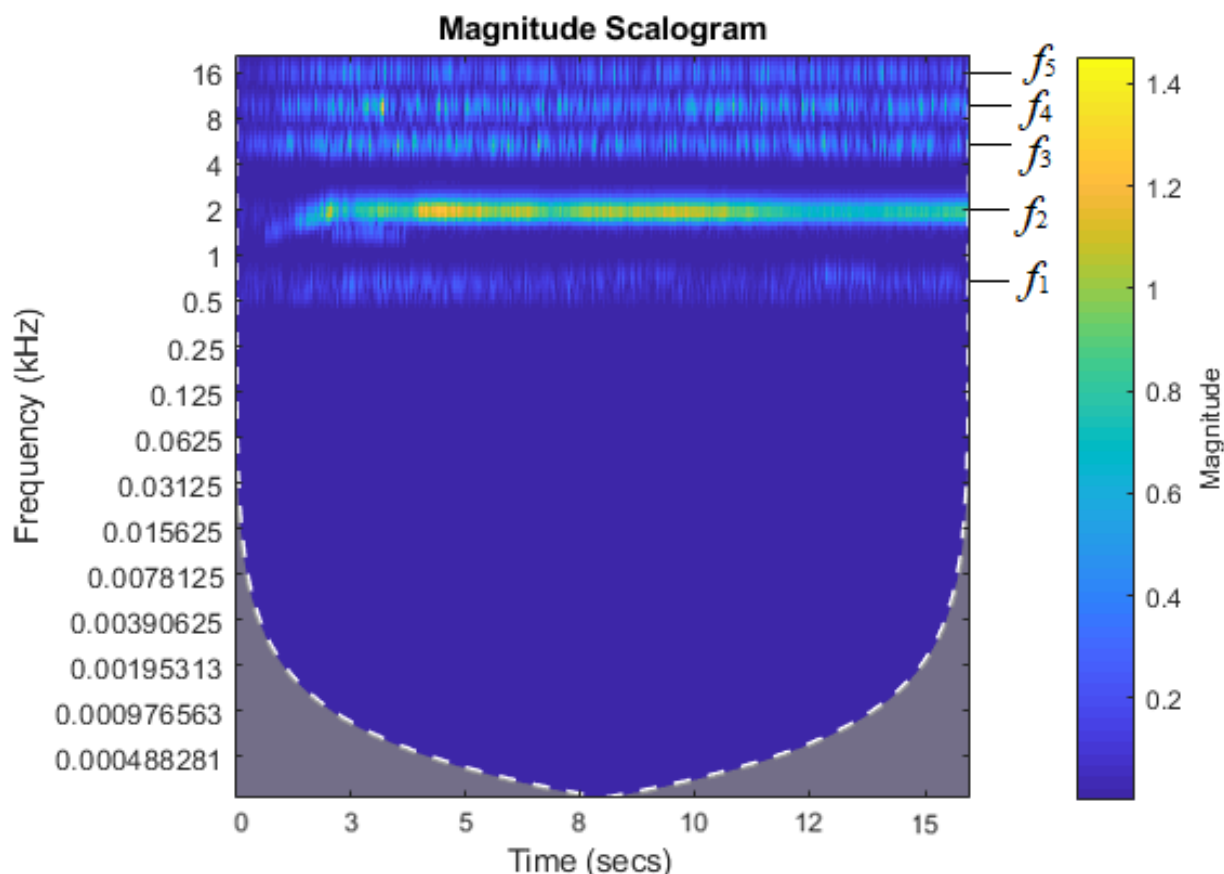


Рис. 3.35. Скалограма частотно-часової характеристики акустичного сигналу безпілотного літального апарату типу FPV 7inch ProDrone

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 наступні умови:

1) якщо відліки характерних частот акустичного сигналу повторюються протягом 15 с більше 200 разів, то з ймовірністю 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 SR TK, DJI Mavic 3t та FPV 7inch ProDrone дозволило з ймовірністю 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 дозволяє отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектру БПЛА.

### **Висновки по розділу 3**

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

Досліджено ефект «спалаху», тобто час первинного процесу горіння парів РОР, та встановлено однозначну залежність тривалості даного процесу від парціального тиску парів над чистим розчинником та температурою спалаху або займання. Встановлено, що чим більше парціальний тиск парів і менше температурою 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 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 акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких органічних речовин, що дозволяє зменшити ступінь помилкових спрацьовувань акустичного пристрою виявлення на території міста джерел масштабних пожеж та встановлення природи пального матеріалу в осередку займання.

2. 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 пістолету Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолету «Форт-14Р» та автомату 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. 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 дозволило з ймовірністю 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 дозволяє отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектру БПЛА.

## **РОЗДІЛ 4**

### **УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАПОБІГАННЯ ВИНИКНЕННЮ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ 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 надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня**

**4.1.1 Аналіз причинно-наслідкових взаємозв'язків між елементами функціональної системи гіпотетичного об'єкту 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, стале 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 [129, 130].

Захист КІ, як одна із 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 [131].

Одним з актуальних напрямків 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 виникнення НС на різного роду ОКІ [132].

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. Критична інфраструктура 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 можливе 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 дозволяє 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 [133].

Враховуючи вищезазначені переваги когнітивного моделювання, проведемо на його основі дослідження функціонування гіпотетичного ОКІ та впливу загроз на

рівень захищеності об'єкту. Схема взаємозв'язків між складовими функціонування ОКІ представлена на рис. 4.1.

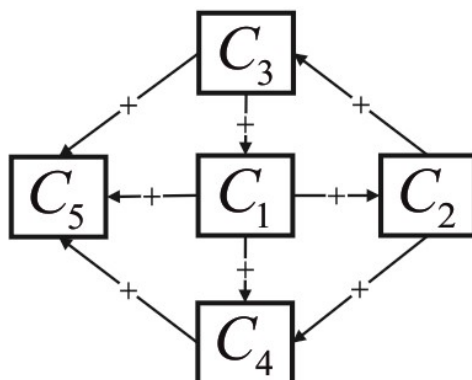


Рис. 4.1. Схема взаємозв'язків між складовими повсякденного функціонування ОКІ

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 наступних елементів:

1) концепт  $C_1$  – обладнання. Обладнання забезпечує завантаження виробничої потужності відносно максимального рівня. Це основа системи критичної інфраструктури, 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  $C_6$  – 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, якості 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 дозволяє виявляти критичні точки, які потребують уваги для забезпечення безперебійного функціонування об'єкта. У дослідженні метод експертних оцінок був інтегрований із використанням 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 дозволяють 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 представленні 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 у момент часу  $t$ ;  $A_j(t)$  – значення  $j$  концепту у 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.

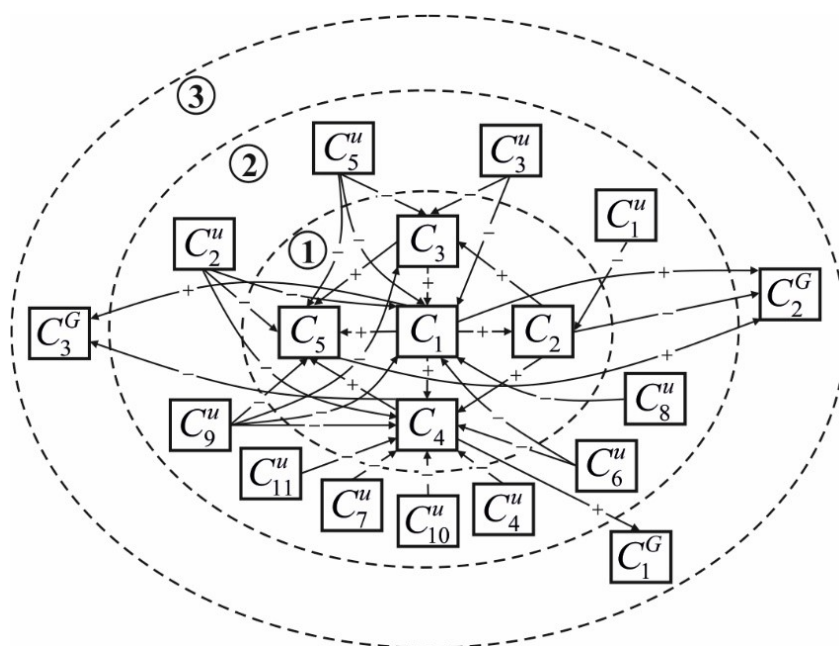


Рис. 4.2. Концептуальна схема дослідження методом НКК рівня захищеності ОКІ. Концепти об'єднані у три групи: 1 – складові повсякденного функціонування; 2 – складові зовнішніх та внутрішніх загроз; 3 – наслідки від небезпек

Сформований перелік концептів  $C_1 - C_5$  дозволяє оцінити силу взаємного впливу між кожною парою концептів шляхом аналізу даних, отриманих у результаті експертного опитування. Для цього використовується нечітка лінгвістична шкала, яка представляє 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’єкту вимагає вживання негайних заходів щодо недопущення виникнення аварійної чи надзвичайної ситуації. В умовах аварійного режиму роботи ОКІ враховуються зовнішні та внутрішні фактори, які відображені на концептуальній моделі рис. 4.2 у вигляді зовнішніх стрілок.

У результаті проведення аналізу можливих загроз безпеки 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, витоки 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 (витоки інформації, кібератаки та інші дії, пов’язані з порушенням інформаційної безпеки);  $C_7^u$  – не якісне 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 додані 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.

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 проаналізована модель причинно-наслідкових взаємозв'язків стану ОКІ при загрозі виникнення аварійної ситуації та виявленні найвагоміші загрози з відповідними значеннями змінних в умовах уведення в державі правового режиму воєнного стану. Результати представлено у табл. 4.1.

Проаналізувавши значення даних показників можна визначити, що в умовах уведення в державі правого 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 4.1. – Значущість впливу концептів зовнішніх та внутрішніх загроз на функціонування 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       |
| $C_7^u$ – не якісне 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 наведені в табл. 4.1, 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 значимість компонента у моделі на основі його взаємозв'язків.

#### 4.1.3 Дослідження сценаріїв впливу загроз на рівень безпеки об'єкту 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 з 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 характерні 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.

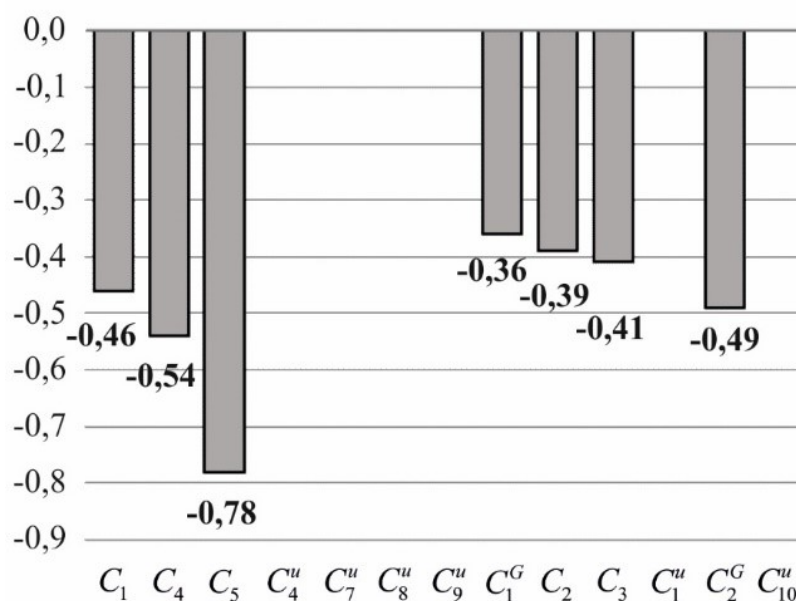


Рис. 4.3. Гістограма реакції стану функціонування ОКІ на максимально негативні зміни концепту  $C_5^u$  – загрози застосування БПЛА

Згідно даних рис. 4.3, у досліджуваній системі концепт  $C_5''$  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.

*Сценарій 2.* Дослідження ступеню зміни концептів функціонування ОКІ при максимальному збільшенні негативного впливу на них концепту  $C_{11}''$  – загрози застосування вогнепальної зброї.

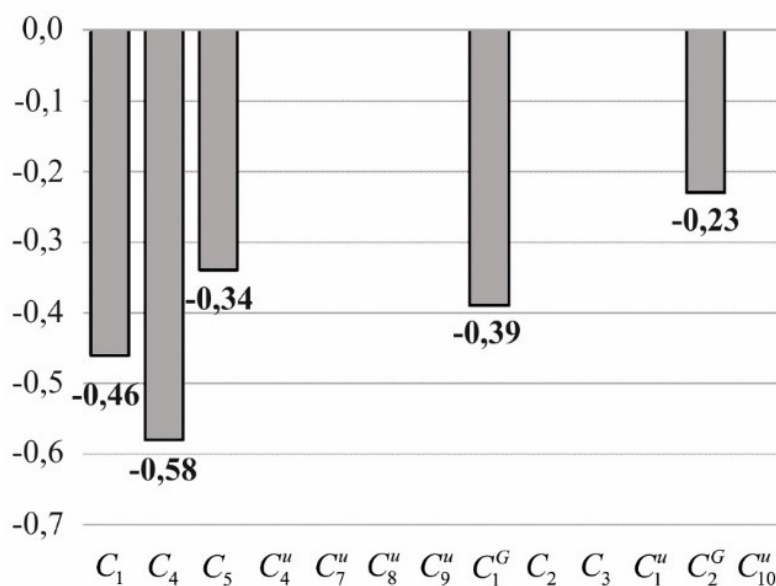


Рис. 4.4. Гістограма реакції стану функціонування ОКІ на максимальні негативні зміни концепту  $C_{11}''$  – загрози застосування вогнепальної зброї

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.

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.

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  $0,57$ .

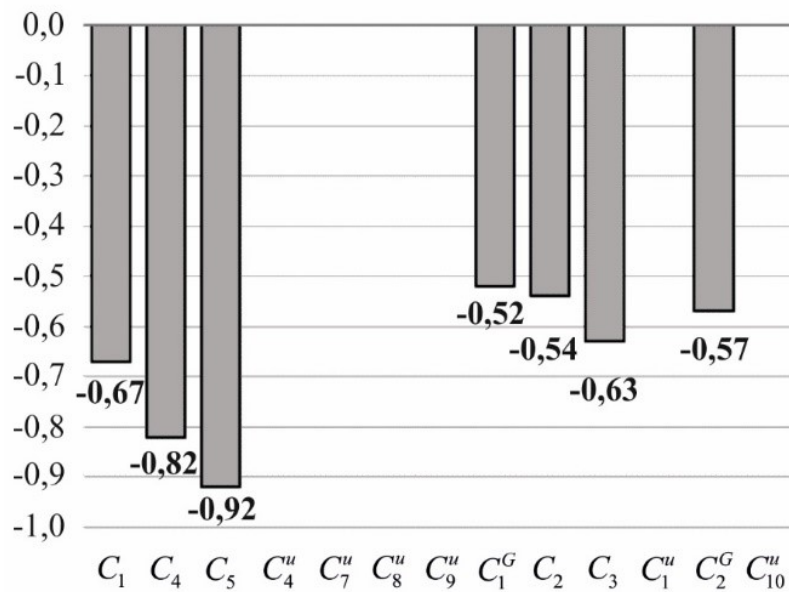


Рис. 4.5. Гістограма реакції стану функціонування ОКІ на максимально негативні зміни концепту  $C_9^u$  – пожежні загрози

#### 4.1.4 Дослідження впливу впровадження системи акустичного моніторингу на рівень захисту об'єкту 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 системі є своя база даних зі збереженими характерними частотами відповідних загроз. Якщо у системі не виявилося таких загроз вона буде оновлювати свої дані для розширення своїх можливостей щодо ідентифікації загроз НС.

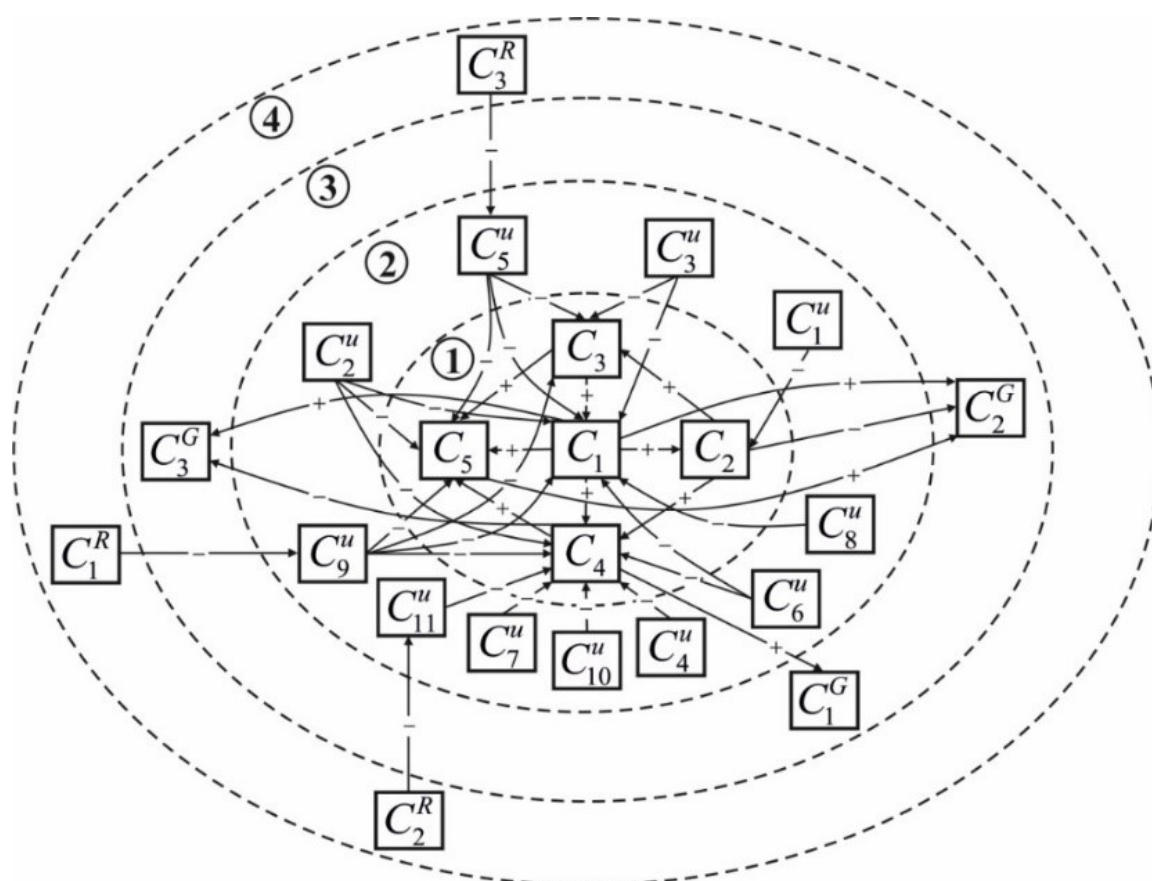


Рис. 4.6. Концептуальна схема дослідження методом НКК ефективності впровадження на ОКІ системи акустичного моніторингу

На рис. 4.6 концепти об'єднані 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 представлена гістограма реакції концептів зовнішніх/внутрішніх загроз, а відповідно і концептів повсякденного функціонування ОКІ, від впровадження системи акустичного моніторингу.

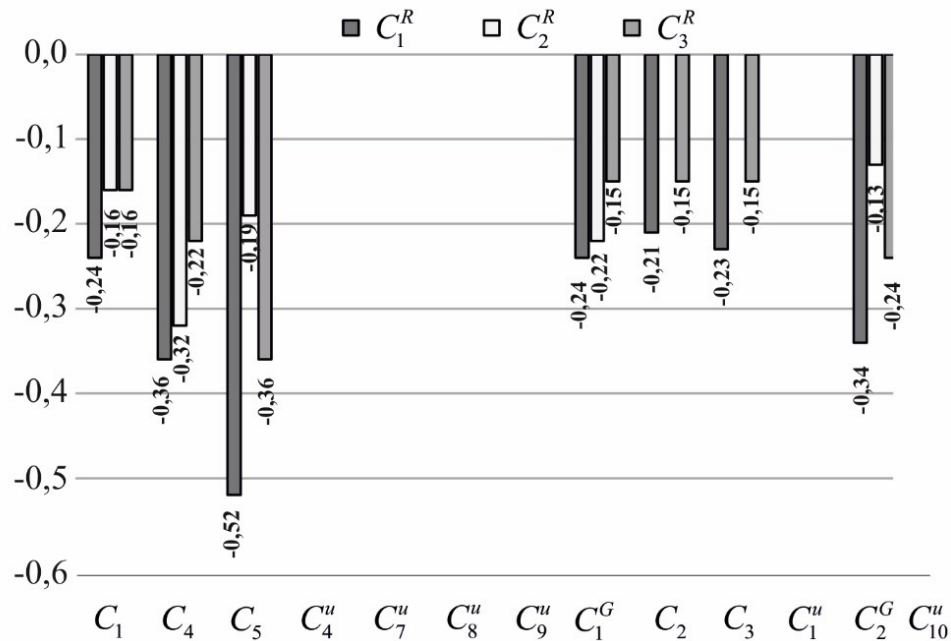


Рис. 4.7. Гістограма реакції концептів зовнішніх/внутрішніх загроз та повсякденного функціонування ОКІ від впровадження системи акустичного моніторингу:  $C_1^R$  – моніторингу джерел пожежної небезпеки;  $C_2^R$  – моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї,  $C_3^R$  –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

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 наступними 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 %.

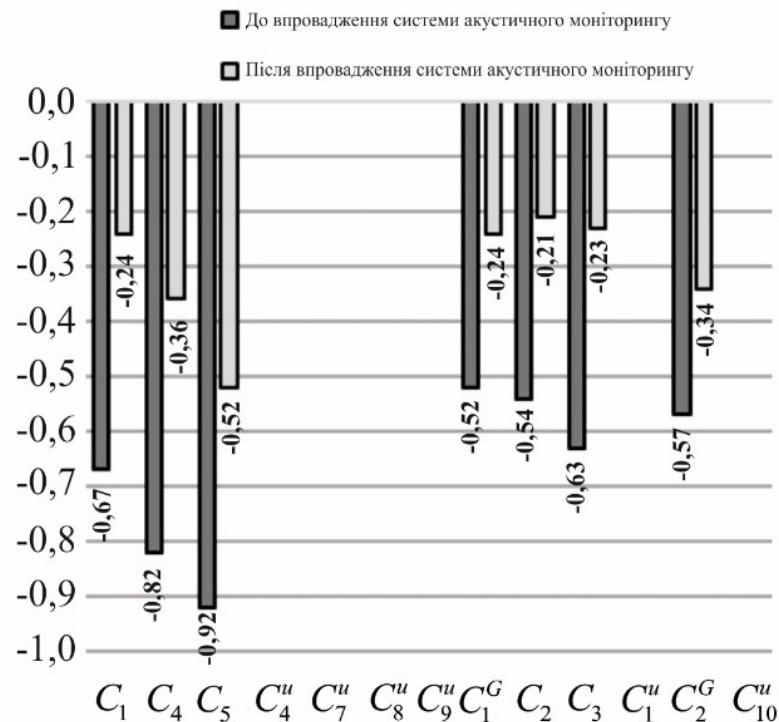


Рис. 4.8. Порівняльна гістограма рівня загроз для концептів ОКІ до та після впровадження системи акустичного моніторингу джерел пожежної небезпеки

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 %.

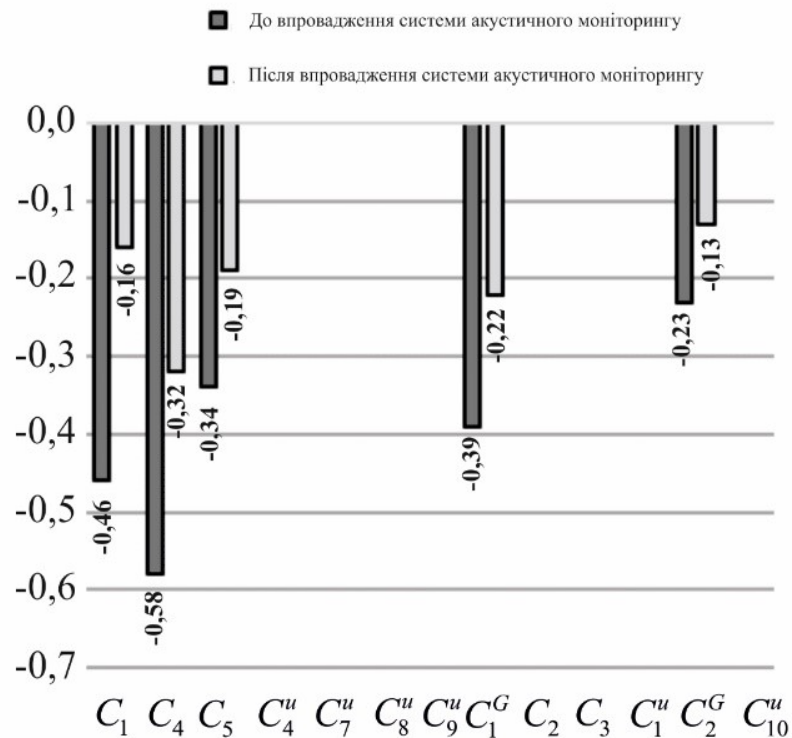


Рис. 4.9. Порівняльна гістограма рівня загроз для концептів ОКІ до та після впровадження системи акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї

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  $59,0\%$ .

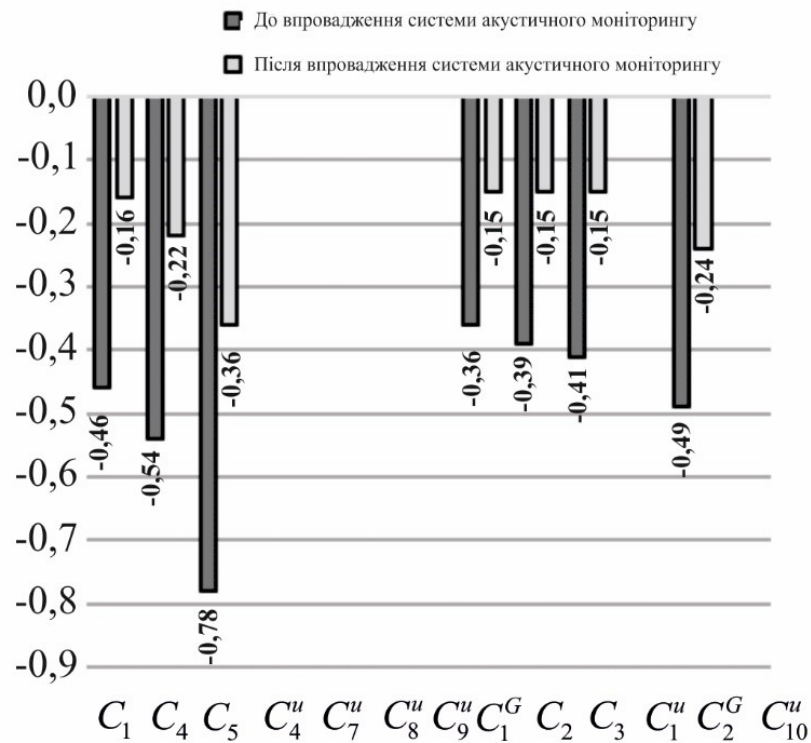


Рис. 4.10. Порівняльна гістограма рівня загроз для концептів ОКІ до та після впровадження системи акустичного моніторингу джерел НС, які пов'язані із застосуванням БПЛА

Аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати науково обґрунтований план організації заходів, спрямованих на підвищення рівня захищеності систем, які функціонують в межах ОКІ. Такий підхід забезпечує можливість своєчасного прийняття рішень для запобігання, локалізації або мінімізації впливу потенційних загроз. Для цього пропонується у якості методу отримання даних про стан функціонування ОКІ застосування акустичного методу моніторингу, який забезпечує оперативне виявлення загроз у режимі реального часу та дозволяє враховувати

динамічну зміну умов у зовнішньому та внутрішньому середовищах. Важливим аспектом є врахування специфіки взаємодії компонентів ОКІ з зовнішнім середовищем, що дозволяє підвищити ефективність системи безпеки та адаптувати її до сучасних ризиків і загроз, які характерні 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 розбиті 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'єкту. 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 значимість. Зокрема, проаналізувавши значення складових побудованих НКК визначено, що в умовах введення в державі правого 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 призводить 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 методу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору**

При розробці керуючого алгоритму запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору в дисертаційній роботі 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 керуючого алгоритму запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору складається із п'яти етапів (рис. 4.11).

Першим етапом алгоритму є проведення моніторингу акустичного простору міста, як потенційної зони НС, що передбачає реєстрацію потенційно небезпечної події на території міста. Моніторинг здійснюється за допомогою розподілених акустичних датчиків, які фіксують АЧХ звукових сигналів в реальному часі. Ці пристрої розміщуються у просторі як горизонтально (в різних географічних точках), так і вертикально (на певних висотах).

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

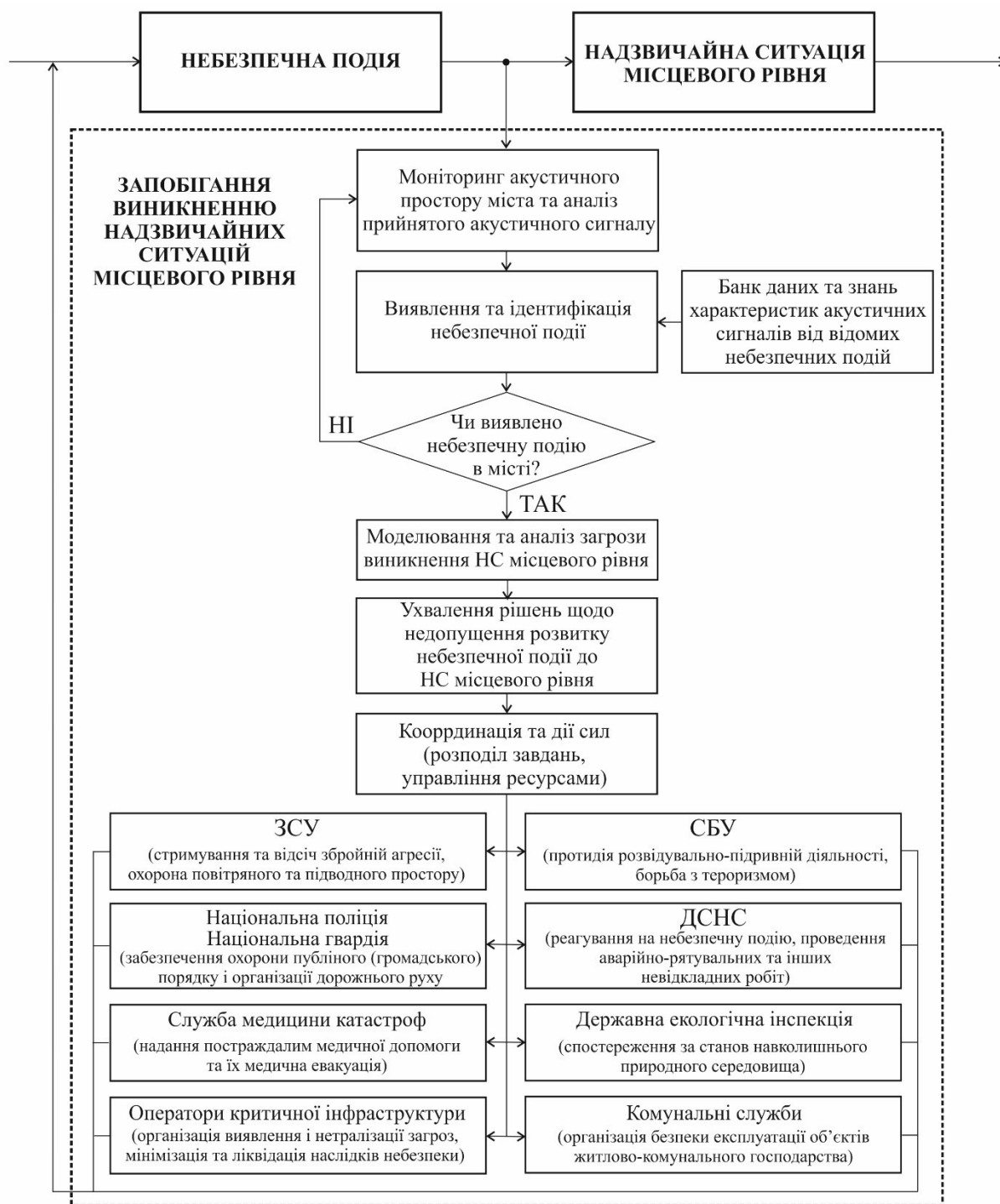


Рис. 4.11 Керуючий алгоритм запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору

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 ідентифікації небезпечної події. Отримана засобами контролю первинна інформація передається до центру інформаційних технологій, де отримані акустичні дані проходять аналіз, який представлений в третьому розділі дисертаційного дослідження, із використанням штучного інтелекту та алгоритмів обробки сигналів. Програмні модулі порівнюють прийняті АЧХ звукових сигналів з базою даних, що дозволяє ідентифікувати джерело небезпечної події за «корисним» акустичним сигналом на фоні шуму.

Третій етап алгоритму – моделювання та аналіз загрози виникнення НС воєнного характеру 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 їхні 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 воєнного характеру 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 в 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 [134, 135].

Експерти ситуаційного центру, що приймають рішення, задають критерії для прогнозування розвитку НС воєнного характеру 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 неминуча, мінімізувати її наслідки. Затверджене рішення передається до системи виконання, яка формалізує його та доводить до виконавців, що безпосередньо впливають на джерела небезпек в місті.

Координація дій відповідних служб міста є завершальним (п'ятим) етапом алгоритму запобігання виникненню НС воєнного характеру 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 воєнного характеру місцевого рівня, активуються відповідні служби та відбувається розподіл обов'язків між ними для забезпечення оперативного реагування та координації дій [136].

Основні служби міста об'єднують підрозділи Збройних Сил України, Служби безпеки України, Міністерства внутрішніх справ України, Національна гвардія України, Національна поліція України, Державної служба України з НС, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, оператори критичної інфраструктури 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 [137, 138].

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 [139].

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-підбивній 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 [140].

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 [141].

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 [142].

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 [143].

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 критичної інфраструктури – юридичні особи будь-якої форми власності та/або фізичні особи – підприємці, що на правах власності, оренди або на інших законних підставах здійснює управління ОКІ та відповідає 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 [144].

В процесі виконання службами міста функцій щодо запобігання виникненню НС воєнного характеру місцевого рівня впливають на джерела небезпек, які виникли на території міста. Зміни стану функціонування міста та зміни стану небезпеки в ньому викликатимуть 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 воєнного характеру 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 амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних

подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС воєнного характеру військового характеру місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС воєнного характеру місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

Показано, що основні служби міста об'єднують підрозділи Збройних Сил України, Служби безпеки України, Міністерства внутрішніх справ України, Національна гвардія України, Національна поліція України, Державної служба України з надзвичайних ситуацій, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, оператори критичної інфраструктури та комунальні служби, функції яких взаємопов'язані у мирний час, а також в особливий період, у тому числі в умовах воєнного стану, в умовах надзвичайного стану та під час виникнення кризових ситуацій.

#### **Висновки по розділу 4**

1. Розроблено когнітивну модель функціонування ОКІ в умовах впливу різного роду загроз, де ключові компоненти системи розбиті 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'єкту. 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 значимість. Зокрема, проаналізувавши значення

складових побудованих НКК визначено, що в умовах уведення в державі правого 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 призводить 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 правого 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 методу запобігання виникненню НС воєнного характеру 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 амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення НС воєнного характеру місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до НС воєнного характеру місцевого рівня; 5) координація дій відповідних служб міста.

Показано, що основні служби міста об'єднують підрозділи Збройних Сил України, Служби безпеки України, Міністерства внутрішніх справ України, Національна гвардія України, Національна поліція України, Державної служба України з надзвичайних ситуацій, Державної служби медицини катастроф, Державної екологічної інспекції, оператори критичної інфраструктури та комунальні служби, функції яких взаємопов'язані у мирний час, а також в особливий період, у тому числі в умовах воєнного стану, в умовах надзвичайного стану та під час виникнення кризових ситуацій.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача у сфері цивільного захисту, а саме підвищення ефективності процесу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня, шляхом впровадження системи акустичного моніторингу для виявлення та ідентифікації на території міст їх джерел.

1. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня пов'язано з розробкою комплексу ефективних правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання рівня безпеки функціонування цивільної та критичної інфраструктури міста, проведення оцінки рівнів ризику виникнення на території міста небезпечних подій різного характеру, а також завчасне реагування на них, особливо за умов введення 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 напрямків раннього виявлення на території міста джерел надзвичайних ситуацій 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 трьох рівнявою декомпозицією процесів управління людськими ресурсами, утворення (розбудова) міста, забезпечення відповідного соціально-економічного рівня життєдіяльності та забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності, що 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 потоки, які характеризуються соціально-демографічними та фінансово-економічними показниками, а також вихідними потоки, які характеризуються рівнями економічної, соціальної, інформаційної, екологічної, науково-технічної, військової небезпеки та рівнем виникнення надзвичайних ситуацій у місті. Результати моделювання забезпечують комплексне вирішення задачі реалізації ефективних заходів запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня, маючи за мету розробку міської системи оперативного моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій 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. Проведені експериментальні дослідження можливостей акустичного методу для ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня, які пов'язані з масштабними пожежами рідких органічних речовин, застосуванням вогнепальної зброї та безпілотних літальних апаратів. Для цієї цілі розроблено вимірювальну схему, з багатомірною обробкою експериментальних даних шляхом поєднаного використання спектрального, фрактального, кластерного і вейвлет аналізів амплітудно-часових характеристик 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 надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня.

4. Розроблено когнітивну модель функціонування об'єктів критичної інфраструктури міста в умовах впливу різного роду загроз, де ключові компоненти системи розбиті на чотири групи: 1) складові повсякденного функціонування 2) складові зовнішніх та внутрішніх загроз 3) наслідки від небезпечних подій; 4) елементи системи акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій. За результатами проведеного сценарного моделювання впливу результатів впровадження системи акустичного моніторингу на показники зовнішніх та

внутрішніх загроз на нормальне функціонування об'єктів критичної інфраструктури, встановлено підвищення рівня захисту критичної інфраструктури міста на 40–50 %.

За результатами проведених досліджень розроблено керуючий алгоритм методу запобігання виникненню надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня за умов функціонування міської системи оперативного акустичного моніторингу небезпечних подій в місті і прогнозування надзвичайних ситуацій воєнного характеру 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 амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу з даними банку даних та знань характеристик акустичних сигналів від відомих небезпечних подій); 3) моделювання та аналіз загрози виникнення надзвичайних ситуацій воєнного характеру місцевого рівня; 4) ухвалення рішень щодо недопущення розвитку небезпечної події на території міста до надзвичайної ситуації воєнного характеру 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). С. 131–140. URL: <http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/258455/255221>
2. Назаренко Ю., Сирбу О. Стратегія розвитку міст: удосконалення підходів. Приклад Києва. URL: <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. Вип. 4(132). С. 114–118. URL: [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»*. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3348>
5. Жирак Р.М. Феномен життєстійкості як складова розвитку урбоекосистем. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2022. Вип. 64. С. 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 с. URL: [https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212\\_planuvannya.pdf](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. URL: <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. URL: <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. URL: <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. URL: <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. URL: <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 с. URL: <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). С. 75–84. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14237>

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

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

16. Пожежа в Рені: у порту вибухнув бензовоз, є жертви. URL: <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. URL: <https://bukinfo.com.ua/nadzvychni-sytuacii/naslidkypozhezhi-bilya-azs-u-chernivcyah>

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

19. Окупанти потужно обстріляли Нікополь: виникла пожежа на АЗС, пошкоджено багатоповерхівки і фабрику. URL: <https://tsn.ua/ato/okupanti-potuzhnoobstrilyali-nikopol-vinikla-pozhezha-na-azsposhkodzhenobagatopoverhi-vki-i-fabriku-2190190.html>

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. URL: <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. URL: <https://tsn.ua/exclusive/pid-kiyevomstalasya-masshtabna-pozhezha-na-zappravci-spalahnuvbenzovoz-foto-video-2286691.html>
22. У Харкові сталася пожежа на АЗС, коли рф вдарила по місту. URL: <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. URL: <https://www.unian.ua/incidents/nakijivshchini-vibuhnuv-benzovoz-vodiy-zaginuva-na-miscistalasya-znachna-pozhezha-foto-video-novini-kiyeva-12269862.html>
24. Вогняне пекло у Києві: пожежа на АЗС спалахнула через наїзд авто на колонку. URL: <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. URL: <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. URL: <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. 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. Вип. 3(39). С. 67–80. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-39-3-67-80.  
URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18114>

28. Стрілянина в супермаркеті Walmart у США: загинули до 10 людей. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-63726537>
29. У центрі Львова 24-річний чоловік влаштував стрілянину в готелі URL: [http://zaxid.net/u\\_tsentri\\_lvova\\_24\\_richniy\\_cholovik\\_vlashtuvav\\_strilyaninu\\_v\\_goteli\\_n155396](http://zaxid.net/u_tsentri_lvova_24_richniy_cholovik_vlashtuvav_strilyaninu_v_goteli_n155396)
30. Стрілянина в Римі: троє загиблих, четверо поранених. URL: <https://tsn.ua/svit/strilyanina-v-rimi-troye-zagiblih-chetvero-poranenih-2220880.html>
31. 39-річного чоловіка затримали за стрілянину біля лісу на Закарпатті. URL: [https://zaxid.net/39\\_richnogo\\_cholovika\\_zatrimali\\_za\\_strilyaninu\\_bilya\\_lisu\\_na\\_zakarpatti\\_n1555003](https://zaxid.net/39_richnogo_cholovika_zatrimali_za_strilyaninu_bilya_lisu_na_zakarpatti_n1555003)
32. Стрілянина в центрі Парижа: троє людей вбиті, кілька поранених. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-64078090>
33. В американській школі сталася стрілянина: є загиблі. URL: <https://tsn.ua/svit/v-amerikanskiy-shkoli-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-2249953.html>
34. Озброєний автоматом чоловік увірвався до посольства Азербайджану в Ірані і влаштував стрілянину. URL: <https://tsn.ua/svit/ozbroyniy-avtomatom-cholovik-uvirvavsya-u-posolstvo-azerbaydzhanu-v-irani-i-vlashtuvav-strilyaninu-video-2252779.html>
35. У США сталася стрілянина: повідомляють про 10 загиблих. URL: <https://tsn.ua/svit/u-ssha-stalasya-strilyanina-povidomlyayut-pro-10-zagiblih-foto-2248942.html>
36. У США сталася чергова масова стрілянина: є жертви. URL: <https://tsn.ua/svit/v-ssha-stalasya-cherгова-masova-strilyanina-ye-zhertvi-2254741.html>
37. В університеті штату Мічиган сталася стрілянина: є загиблі та поранені. URL: <https://tsn.ua/svit/v-universiteti-shtatu-michigan-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-ta-poraneni-2265409.html>
38. Друга масова стрілянина у Каліфорнії за кілька днів – семеро загиблих. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-64383486>
39. Спочатку вбив батька, а потім ще 15 людей: журналіст про деталі наймасовішої стрілянини в історії Чехії. URL: <https://tsn.ua/exclusive/spochatku-vbiv->

[batka-a-potim-sche-15-lyudey-zhurnalyst-pro-detali-naymasovishoyi-strilyanini-v-istoriyi-chehiyi-2477170.html](https://batka-a-potim-sche-15-lyudey-zhurnalyst-pro-detali-naymasovishoyi-strilyanini-v-istoriyi-chehiyi-2477170.html)

40. У Стамбулі сталася стрілянина в італійській церкві – одна людина загинула. URL: <https://pmg.weukraine.tv/novyny/u-stambuli-stalasja-striljanina-v-italijskij-tserkvi-odna-ljudina-zahinula/>

41. У Грузії внаслідок стрілянини на ринку загинуло четверо людей. URL: [https://zaxid.net/u\\_gruziyi\\_vnaslidok\\_strilyanini\\_na\\_rinku\\_zaginulo\\_chetvero\\_lyudey\\_n1579717](https://zaxid.net/u_gruziyi_vnaslidok_strilyanini_na_rinku_zaginulo_chetvero_lyudey_n1579717)

42. У Детройті внаслідок стрілянини у парку поранення отримали 9 осіб. Серед них мама і два сини. URL: [https://lb.ua/world/2024/06/16/619152\\_detroyti\\_vnaslidok\\_strilyanini.html](https://lb.ua/world/2024/06/16/619152_detroyti_vnaslidok_strilyanini.html)

43. У школі в США сталася стрілянина: загинули щонайменше четверо людей, підозрюють 14-річного підлітка. [URL: <https://nv.ua/ukr/world/countries/strilyanina-u-ssha-pidlitok-vidkriv-vogon-po-lyudyah-chotiri-lyudini-zaginuli-50448394.html>]

44. На Тернопільщині чоловік розстріляв людей біля сільської школи. URL: <https://lenta.te.ua/society/2024/08/15/203395.html>

45. У Анкарі стався теракт біля об'єкта аерокосмічної компанії: є загиблі та поранені. URL: <https://espresso.tv/svit-u-ankari-stavsya-terakt-bilya-obekta-aerokosmichnoi-kompanii-e-zagibli-ta-poraneni>

46. Нелегальна зброя в Україні. URL: <https://uavz.org/nelegalna-zbroya-v-ukraini-povna-versiya-dokumentu-vid-small-arms-survey/>

47. На Херсонщині внаслідок російського обстрілу загинули волонтери з Франції. URL: [https://zaxid.net/na\\_hersonshhini\\_vnaslidok\\_rosiyskogo\\_obstrilu\\_zaginuli\\_volonteri\\_z\\_frantsiyi\\_n1579227](https://zaxid.net/na_hersonshhini_vnaslidok_rosiyskogo_obstrilu_zaginuli_volonteri_z_frantsiyi_n1579227)

48. Росіяни атакували дроном автомобіль на Сумщині, загинуло подружжя. URL: [https://zaxid.net/rosiyani\\_atakuvali\\_dronom\\_avtivku\\_na\\_sumshhini\\_zaginulo\\_podruzhhya\\_n1592211](https://zaxid.net/rosiyani_atakuvali_dronom_avtivku_na_sumshhini_zaginulo_podruzzhya_n1592211)

49. Російська армія влучила FPV-дроном у рейсовий автобус на Сумщині.

URL:

[https://zaxid.net/rosiyska\\_armiya\\_fpv\\_dronom\\_vluchila\\_v\\_reysoviy\\_avtobus\\_na\\_sumshhi\\_ni\\_n1594334](https://zaxid.net/rosiyska_armiya_fpv_dronom_vluchila_v_reysoviy_avtobus_na_sumshhi_ni_n1594334)

50. У Херсоні авто швидкої допомоги стало мішенню ворога. URL:

<https://tsn.ua/ato/u-hersoni-avto-shvidkoyi-dopomogi-stalo-mishennyu-voroga-scho-vidomo-pro-naslidki-2684487.html>

51. Внаслідок російської атаки в Одесі загинула людина, ще понад десяток постраждали. URL:

[https://zaxid.net/vnaslidok\\_rosiyskoyi\\_ataki\\_v\\_odesi\\_zaginula\\_lyudina\\_shhe\\_ponad\\_desy\\_atok\\_postrazhdali\\_n1597477](https://zaxid.net/vnaslidok_rosiyskoyi_ataki_v_odesi_zaginula_lyudina_shhe_ponad_desy_atok_postrazhdali_n1597477)

52. Четверо постраждалих і пошкоджені авто: деталі ворожої атаки БПЛА на Харків. URL:

<https://armyinform.com.ua/2024/11/13/chetvero-postrazhdalyh-i-poshkodzheni-avto-detali-vorozhoyi-ataky-bpla-na-harkiv/>

53. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02 жовтня 2012 року № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

54. Про затвердження Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій: Наказ МВС України від 06 серпня 2018 року № 658. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0969-18#Text>

55. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019-2010. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text>

56. Про затвердження Порядку класифікації НС техногенного та природного характеру: Постанова Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 року № 368.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/368-2004-%D0%BF#Text>

57. 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*, October, 2019, pp. 295–299. URL:

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10259>

58. Система містобудівної документації: ДБН Б.1.1-5:2007. Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. 28 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-172>

59. Про місцеве самоврядування в Україні: Закон України від 21 травня 1997 року № 280/97-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80#Text>

60. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту: ДБН В.1.2-4:2020. Київ: Мінрегіон України, 2020. 47 с.

61. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16 листопада 2021 року № 1882-ІХ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#top>

62. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 року № 1109. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>

63. Про затвердження Порядку проведення моніторингу рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 22 липня 2022 року № 821. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/821-2022-%D0%BF#Text>

64. Про затвердження Регламенту обміну інформацією між суб'єктами національної системи захисту критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 року № 1174. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1174-2022-%D0%BF#Text>

65. Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України: Постанова Кабінету Міністрів України від 10 травня 2024 року № 535. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/535-2024-п#Text>

66. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту: Постанова Кабінету Міністрів України від 09 січня 2014 року № 11. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>

67. Питання мережі ситуаційних центрів: Постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2023 року № 535. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/705-2023-%D0%BF#Text>

68. Про затвердження Методичних рекомендацій з організації ситуаційних центрів: Наказ ДСНС від 06 серпня 2018 року № 514.

69. Операційний центр запобігання та моніторингу надзвичайних ситуацій.  
URL: <https://magneticonemt.com/operatsijnyj-sytuatsiinyi-tsentr/>
70. Федеральне агентство з управління надзвичайними ситуаціями (FEMA).  
National Response Coordination Center (NRCC). URL: <https://www.fema.gov/>
71. Кабінет Міністрів Великобританії. Crisis Management. URL:  
<https://www.gov.uk/government/organisations/cabinet-office>
72. Японське метеорологічне агентство. Earthquake Information. URL:  
<https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
73. Уряд Австралії. Australian Government Crisis Coordination Centre. URL:  
<https://www.gov.au/government/organisations/department-of-home-affairs>
74. 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.
75. Бонк А. Захист критичної інфраструктури: досвід США. ІГС Україна. 2019.  
URL: <https://ig-security.tech/zahist-kritichnoi-infrastrukturi-dosvid-ssha.html>
76. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). Critical Infrastructure Security and Resilience. URL: <https://www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience>
77. TÜV Informationstechnik GmbH. KRITIS – Kritische Infrastrukturen. URL:  
<https://www.tuvit.de/de/leistungen/informationssicherheitsmanagement/kritis>
78. National Cyber Security Centre (NCSC). Official Website. URL:  
<https://www.ncsc.gov.uk>
79. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). Approaches to Protecting Critical Information Infrastructures within National Cyber Security Strategies. URL:  
<https://resilience.enisa.europa.eu/enisas-ncss-project/CIIPApproachesNCSS.pdf>
80. Rheinmetall brings Acoustic Shooter Locating System (ASLS) to market. URL:  
<https://www.defencweb.co.za/land/land-land/rheinmetall-brings-acoustic-shooter-locating-system-asls-to-market/>

81. Acoustic shooter locating system. URL: <https://www.rheinmetall.com/en/products/c4i/reconnaissance-and-sensor-systems/asls-acoustic-shooter-locating-system#anchor-optional>
82. Boomerang Shooter Detection Technology. <https://milcom-security.com/wp-content/uploads/BoomerangGeneral-102010-5.pdf>
83. Projectile Detection and Cueing (PDCue). URL: [https://defense-update.com/20070511\\_pdcue.html#google\\_vignette](https://defense-update.com/20070511_pdcue.html#google_vignette)
84. PEARL – Gunshot detection sensor for personal or group weapons. URL: [https://issuu.com/robertbreedveld/docs/bss\\_holland\\_gunshot\\_detectie\\_pearl](https://issuu.com/robertbreedveld/docs/bss_holland_gunshot_detectie_pearl)
85. Surveillance and Threat Detection Systems. URL: <https://www.dbkes.com.tr/brosur/pilarw.pdf>
86. Офіційний сайт компанії Microflown Avisia. URL: <https://www.microflown-avisia.com/technology>
87. Sniper Egg. Detecting the threat. Protecting our forces. URL: <https://defenceforumindia.com/attachments/sniper-egg-pdf.8391/>
88. PinPoint™ – Dismount Shot Detection Systems. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/11476334/pinpointtm-dismount-shot-detection-systems>
89. Локатор джерела пострілу. URL: <https://ames.kpi.ua/lokator-dzherela-postrilu/>
90. 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. Vol. 21, 4953. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4953>
91. Utebayeva D., Ilipbayeva L., Matson E.T. Practical Study of Recurrent Neural Networks for Efficient Real-Time Drone Sound Detection: A Review. *Drones*. 2023. Vol. 7. 26. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/1/26>
92. SoundCom Technologies. URL: <https://www.soundcom.net/>
93. DroneShield is the world-leading innovator in counterdrone solutions. URL: <https://www.droneshield.com/>

94. ParaZero Drone Safety Solutions. URL: <https://parazero.com/home/>
95. DRONELOCK ~ Drone Against Drone System. URL: <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/27749-dronelock-drone-against-drone-system>
96. Microflown Avisa URL: <https://www.microflown-avisa.com/>
97. Сокольський С.О., Мовчанюк А.В. Алгоритм оброблення аудіосигналів із використанням методу машинного навчання. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2023. Вип. 93. С. 39–51. DOI: 10.20535/RADAP.2023.93.39-51.  
URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/5d1e6e37-6af3-45cf-b0df-af91b2397ae4/content>
98. Данченко О.Б. Практичні аспекти реінжинірингу бізнес-процесів. Київ: Університет економіки та права «КРОК», 2017. 238 с.  
URL: [https://library.krok.edu.ua/media/library/category/navchalni-posibniki/danchenco\\_0001.pdf](https://library.krok.edu.ua/media/library/category/navchalni-posibniki/danchenco_0001.pdf)
99. 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. С. 178–184.  
URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/169765/13-Latysheva.pdf?sequence=1>
100. Тютюник В.В., Тютюник 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). С. 58–76. DOI: 10.33269/nvcz.2023.2.58-76. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19263>
101. Левтеров О.А., Калугін В.Д., Тютюник В.В. Пат. 127254 Україна, МПК (2006) A62C 3/00, G01R 29/26 (2006.01), G08C 19/00, G08B 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. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8423>

102. 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. Вип. 1(40). С. 75–84. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14232>
103. Николишин М.Й. Проектування радіотехнічних систем. Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2023. 360 с.
104. Гончаренко Ю.Ю. Фізична модель знімання мовної інформації. *Системи обробки інформації*. Харків. Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. 2014. Вип. 7(123). С. 18–23.
105. 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. Т.16. № 1,2. С. 18–22. URL: [https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific\\_editions/are\\_3.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/are_3.pdf)
106. 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). С. 29–35.
107. 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. Вип. 25(І). С. 58–75. URL: <http://znp.zvir.zt.ua/article/view/299286/291834>
108. 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. Vol. 78, Iss. 9. P. 759–770.

109. 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). С. 49–59.
110. Чернишев 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. С. 61–66.
111. 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 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11382>
112. Ghadarah N., Ayre D. A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of Polymer-Based composites. *Sensors*. 2023. 23. 6945. URL: <https://doi.org/10.3390/s23156945>
113. 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. pp. 3517–3532. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08598-8>
114. Huijter 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. URL: <https://doi.org/10.3390/s21206926>
115. Fevotte G., Wang X.J., Ouabbas Y. Acoustic emission, a new sensor for monitoring industrial crystallization processes. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. 47. 3. pp. 2727–2733. URL: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01478>
116. Dang V.H., Beroual A., Rozga P. Fractal dimensions analysis of branching streamers propagating in mineral oil. *Archives of Electrical Engineering*. 2022. 71(3). pp. 659–669. URL: <https://doi.org/10.24425/aee.2022.141677>
117. 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.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107105>

118. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100106>

119. 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. pp. 16519–16531. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00199>

120. Левтеров О.А., Тютюник 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. Т.16. № 1–2. С. 23–40. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5938>

121. Левтеров О.А., Тютюник 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. Вып.42. С. 72–84.

URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5939>

122. Levterov A.A. Acoustic research method for burning flammable substances. *Acoustical Physics*. 2019. 65. 4. pp. 444–449.

URL: <https://doi.org/10.1134/S1063771019040109>

123. 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). С. 111–127. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127>

124. 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. No. 6. pp. 203–212. DOI: [10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212)
125. 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. URL: <https://doi.org/10.1002/ese3.772>
126. 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. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012071>
127. Тютюник В.В., Левтеров О.А., Тютюник О.О., Усачов Д.В. Розвиток науково-технічних основ акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2024. Вип. 2(40). С. 269–292. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-19. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24173>
128. 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), С. 300–312. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26>
129. Про Концепцію (основи державної політики) національної безпеки України: Постанова Верховної Ради України від 16 січня 1997 р. № 569-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3/97-%D0%B2%D1%80#Text>
130. Кулешов М.М., Садковий В.П., Тютюник В.В. Державна система цивільного захисту. Харків: Друкарня «Мадрид». 2020. 232 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11130>
131. Салієва О.В., Яремчук Ю.Є. Симпліціальний аналіз структури когнітивної моделі для дослідження захищеності об'єкта критичної інфраструктури.

*Реєстрація, зберігання і обробка даних.* 2020. Т.22. № 3. С.68–75. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001200603>

132. Євсєєв В.О. Можливі шляхи удосконалення захисту критичної інфраструктури України з урахуванням світового досвіду. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил.* 2016. № 4. С. 168–172. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS\\_2016\\_4\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2016_4_35)

133. 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. С. 78–85. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs\\_2018\\_4\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2018_4_10)

134. 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.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text>

135. 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. pp. 261–266.

136. 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. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/43-2018-%D1%80>

137. 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.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-16#Text>

138. Про затвердження Інструкції про порядок взаємодії територіальних органів поліції та міжрегіональних територіальних органів Національної поліції України під час реагування на надзвичайні ситуації, у випадку введення 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.

[URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0085-17#Text>

139. Про Збройні Сили України: Закон України від 06 грудня 1991 року № 1934-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1934-12#Text>

140. Про Службу безпеки України: Закон України від 25 березня 1992 року № 2229-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2229-12#Text>

141. Про Національну поліцію: Закон України від 02 липня 2015 року № 580-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/580-19#Text>

142. Про Національну гвардію України: Закон України від 13 березня 2014 року № 876-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/876-18#Text>

143. Про затвердження Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій: Постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 року № 1052. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1052-2015-%D0%BF#Text>

144. 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. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/409-2015-%D0%BF>

## ДОДАТОК А

## Список публікацій за темою дисертації

**Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

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

1. 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. No. 6. P. 203–212. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-151-6-203-212> (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, DOAJ, EBSCOhost, BASE, CAS Source Index, ROAD, MIAR, CrossRef).

*Здобувачу особисто належить побудова графіків зміни у часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) метанолу.*

2. Тютюник В. В., Тютюник 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). С. 58–76. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).58-76](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).58-76) (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

*Здобувачу особисто належить аналіз нормативної бази щодо наявності відповідних механізмів розвитку системи «Smart city» в Україні, створення алгоритму моделювання за методологією IDEF0 для забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста.*

3. 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). С. 111–127. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127> (Включено до

міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Index Copernicus, CiteFactor, The Journals Impact Factor, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Research Bible, WorldCat).

*Здобувачу особисто належить збір та аналіз статистичних даних щодо масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами, перевірка достовірності отриманих результатів залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик горіння рідких органічних речовин.*

4. Тютюник В. В., Левтеров О. А., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Розвиток науково-технічних основ акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків. 2024. Вип. 2(40). С. 269–292. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-19> (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

*Здобувачу особисто належить аналіз інтернет-джерел щодо терористичних актів пов'язаних із використанням вогнепальної зброї, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень.*

5. 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), С. 300–312. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.26> (Включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

*Здобувачу особисто належить збір, обробка та проведення кластеризації спектральних характеристик акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів.*

6. 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), С. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.2.18> (Включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

*Здобувачу особисто належить збір та аналіз даних щодо взаємодії між службами при ліквідації надзвичайних ситуацій, розробка алгоритму дій для*

запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня на основі даних акустичного моніторингу.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. Тютюник В. В., **Усачов Д. В.** Геоінформаційна система акустичного моніторингу надзвичайних ситуацій місцевого рівня. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: збірник тез доповідей круглого столу (вебінару). м. Харків. НУЦЗ України. 23 лютого 2023 року. С. 135–139. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить опис процесу функціонування системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору.*

8. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Геоінформаційна система акустичного моніторингу джерел різного роду загроз для об'єктів критичної інфраструктури міста. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph – NGO Institute for Cyberspace Research (Detroit, Michigan, USA). 2023. С. 271–276. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить перевірка достовірності результатів акустичної ідентифікації джерела небезпеки, обґрунтування ефективності методу.*

9. **Усачов Д. В.** Інформаційна система оперативного моніторингу надзвичайних ситуацій у місті за результатами аналізу акустичного простору. Інформаційна безпека та інформаційні технології: збірник тез доповідей VI Все-української науково практичної конференції молодих учених, студентів і курсантів «Інформаційна безпека та інформаційні технології». м. Львів. ЛДУ БЖД. 30 листопада 2023 року. С. 448–450. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить постановка задачі дослідження та визначення системного підходу для ефективного моніторингу акустичного простору міста.*

10. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Особливості реалізації акустичного моніторингу джерел небезпек для підвищення ефективності діяльності сил охорони правопорядку в місті. Актуальні питання розвитку та удосконалення логістичного забезпечення в національній гвардії України. Науково-практична

конференція. м. Вінниця. НАНГУ. 30 листопада 2023 року. С. 211–212. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить аналіз нормативної бази щодо наявності відповідних механізмів розвитку системи «Smart city» в Україні.*

11. Тютюник В. В., **Усачов Д. В.** Акустичний моніторинг масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами на території міста. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: збірник тез доповідей круглого столу (вебінару). м. Харків. НУЦЗ України. 29 лютого 2024 року. С. 229–232. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить збір та аналіз статистичних даних щодо масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами, визначення головних причин виникнення таких надзвичайних ситуацій.*

12. Тютюник В. В., Левтеров О. А., **Усачов Д. В.** Виявлення на території міста масштабних пожеж за акустичними спектрами процесу горіння рідких органічних речовин. Проблеми пожежної безпеки 2024: матер. Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків. НУЦЗ України. 2024 року. С. 198–200. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить створення діаграми декомпозиції системи реєстрації загроз для життєдіяльності міста.*

13. Тютюник В. В., **Усачов Д. В.** Розробка науково-технічних основ моніторингу масштабних пожеж на території міста за допомогою спектрального аналізу. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матер. ХІХ Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. м. Львів. ЛДУ БЖД. 28–29 березня 2024 року. С. 81–84. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить перевірка достовірності отриманих результатів залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик горіння рідких органічних речовин.*

14. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Апаратна реалізація методу ідентифікації вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого

акустичного сигналу. The 4th International scientific and practical conference “Development of higher education: trends and prospects” (January 28–31, 2025) Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2025. P. 241–244. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

*Здобувачу особисто належить обробка акустичних сигналів пострілів із досліджувальної зброї та визначення їх амплітудно-частотних характеристик.*

15. Тютюник В. В., Тютюник О. О., **Усачов Д. В.** Акустичний моніторинг джерел надзвичайних ситуацій пов’язаних із застосуванням вогнепальної зброї. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: збірник тез доповідей круглого столу (вебінару). м. Черкаси. НУЦЗ України. 28 лютого 2024 року. С. 4–5. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить створення алгоритму ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілі.*

**ДОДАТОК Б****Акти впровадження результатів досліджень****Додаток Б.1**

 **ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Т.в.о. першого заступника начальника  
ГУ ДСНС України у Харківській області  
Олексій ЧАПЛИГІН  
\_\_\_\_\_ 2025 р.

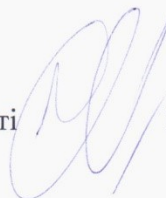
**АКТ**

впровадження результатів науково-дослідної роботи  
«Дослідження особливостей запобігання надзвичайним ситуаціям  
місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору»  
авторського колективу Тютюнника В.В., Усачова Д.В., Левтерова О.А.

Комісія в складі: начальника управління організації заходів цивільного захисту ГУ ДСНС України у Харківській області Володимира НАЗАРЕНКА; заступника начальника управління-начальника відділу планування заходів цивільного захисту управління організації заходів цивільного захисту ГУ ДСНС України у Харківській області Леоніда МАЗУРА; начальника відділу інженерно-технічних заходів та оповіщення управління організації заходів цивільного захисту ГУ ДСНС України у Харківській області Юрія ТУЛЬНОВА, склала цей акт про впровадження матеріалів науково-дослідної роботи «Дослідження особливостей запобігання надзвичайним ситуаціям місцевого рівня за результатами моніторингу акустичного простору» та стверджує, що результати науково-дослідної роботи у вигляді пропозиції щодо створення системи акустичного моніторингу акустичного простору для виявлення джерел пожежної небезпеки, джерел терористичних небезпек, які пов'язані із застосуванням вогнепальної зброї, та джерел надзвичайних ситуацій, які пов'язані із застосуванням безпілотних літальних апаратів, були передані для практичного використання у діяльності Управління організації заходів цивільного захисту Головного управління ДСНС України у Харківській області при розробці заходів щодо захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій, а також евакуації населення із зон ураження у мирний час та особливий період.

Акт не є підставою для отримання авторським колективом премій та інших винагород з фондів Головного управління ДСНС України у Харківській області за використання результатів науково-дослідної роботи.

Начальник управління організації  
заходів цивільного захисту  
ГУ ДСНС України у Харківській області



Володимир НАЗАРЕНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Заступник начальника управління-начальник  
відділу планування заходів  
цивільного захисту управління  
організації заходів цивільного захисту  
ГУ ДСНС України у Харківській області



Леонід МАЗУР

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Начальник відділу інженерно-технічних  
заходів та оповіщення управління  
організації заходів цивільного захисту  
ГУ ДСНС України у Харківській області



Юрій ТУЛЬНОВ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Г.В.О. начальника Головного управління  
Державної служби України з надзвичайних  
ситуацій у Хмельницькій області

Олександр СВІРЧУК

\_\_\_\_\_ 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
УСАЧОВА Дмитра Володимировича

Комісія в складі: начальника відділу організації заходів цивільного захисту ГУ ДСНС України у Хмельницькій області Андрія САВЧУКА; головного фахівця відділу організації заходів цивільного захисту ГУ ДСНС України у Хмельницькій області Юлії САМОЛЮК; провідного фахівця відділу організації заходів цивільного захисту ГУ ДСНС України у Хмельницькій області Альони ВОЙТОВИЧ склала цей акт про впровадження матеріалів дисертаційних досліджень Дмитра УСАЧОВА та стверджує, що результати дисертаційних досліджень у вигляді методики моніторингу акустичного простору для виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, а також у вигляді практичних рекомендацій з визначення, за даними моніторингу акустичного простору, відповідних рішень щодо запобігання виникненню масштабних пожеж, терористичних дій із застосуванням вогнепальної зброї та безпілотних літальних апаратів, були передані для практичного використання у діяльності відділу організації заходів цивільного захисту Головного управління ДСНС України у Хмельницькій області при розробці заходів щодо захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного, природного та військового характеру, а також при плануванні евакуаційних заходів на території області при повсякденній діяльності та у разі стихійних лих, аварій, катастроф, надзвичайних ситуацій, терористичних проявів.

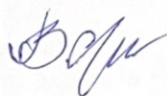
Акт не є підставою для отримання УСАЧОВИМ Дмитром Володимировичем премій та інших винагород з фондів Головного управління

ДСНС України у Хмельницькій області за використання результатів його дисертаційних досліджень.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом УСАЧОВИМ Дмитром Володимировичем дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Начальник відділу організації  
заходів цивільного захисту

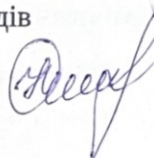
ГУ ДСНС України у Хмельницькій області



Андрій САВЧУК

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Головний фахівець відділу організації заходів  
цивільного захисту ГУ ДСНС України  
у Хмельницькій області



Юлія САМОЛЮК

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Провідний фахівець відділу організації заходів  
цивільного захисту ГУ ДСНС України  
у Хмельницькій області



Альона ВОЙТОВИЧ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор із навчально-методичної роботи  
Львівського державного університету  
безпеки життєдіяльності,  
кандидат технічних наук, доцент

Олександр ПРИДАТКО

2025 р.

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

матеріалів дисертаційних досліджень Усачова Дмитра  
Володимировича за темою «Запобігання виникненню надзвичайних  
ситуацій місцевого рівня за результатами акустичного моніторингу їх  
джерел» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека»

Комісія у складі: начальника кафедри цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, кандидата технічних наук, доцента Василя ЛОЙКА, професора кафедри цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, доктора технічних наук, професора Василя КАРАБІНА, професора кафедри цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, доктора технічних наук, професора Василя КОВАЛИШИНА склала цей акт про впровадження матеріалів дисертаційних досліджень «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій місцевого рівня за результатами акустичного моніторингу їх джерел» та стверджує, що матеріали передані для практичного використання в навчальному процесі при викладенні освітніх компонентів «Управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій» та «Прикладні інформаційні технології у сфері цивільного захисту» для здобувачів вищої освіти, які навчаються у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності на другому (магістерському) рівні вищої освіти за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» за освітньо-професійною програмою «Цивільний захист».

Результати дослідження заслухані й обговорені на засіданні кафедри цивільного захисту, протокол № 19 від «12» березня 2025 року.

Зазначений акт не є підставою для фінансових зобов'язань.

Члени комісії:

начальник кафедри цивільного захисту,  
кандидат технічних наук, доцент

Василь ЛОЙК

професор кафедри цивільного захисту,  
доктор технічних наук, професор

Василь КАРАБІН

професор кафедри цивільного захисту,  
доктор технічних наук, професор

Василь КОВАЛИШИН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з навчальної роботи

Національного університету

цивільного захисту України

спеціалізація технічних наук, доцент

Олександр ДЖУЛАЙ

\_\_\_\_\_ 2025 р.



### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження УСАЧОВА Дмитра Володимировича в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України за спеціальністю 263 «Цивільна безпека»

Комісія у складі:

начальника навчально-наукового інституту цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України Сергія ТАРАСОВА, начальника кафедри управління діяльності у сфері цивільного захисту навчально-наукового інституту цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України Олександра ЗЕМЛЯНСЬКОГО, заступника начальника кафедри управління діяльності у сфері цивільного захисту навчально-наукового інституту цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України Олександра ЯЩЕНКА – склала цей акт про впровадження результатів дисертаційного дослідження у вигляді методики моніторингу акустичного простору для виявлення та ідентифікації джерел надзвичайних ситуацій, у навчальний процес при викладенні освітніх компонентів «Моніторинг надзвичайних ситуацій та теорія ризиків» та «Планування та обробка результатів експерименту у сфері цивільного захисту» для здобувачів вищої освіти, які навчаються у Національного університету цивільного захисту на другому (магістерському) та третьому

(освітньо-науковому) рівнях вищої освіти за спеціальністю 263 «Цивільна безпека».

Зазначений акт не є підставою для фінансових зобов'язань.

Члени комісії:

Начальник навчально-наукового  
інституту цивільного захисту НУЦЗ України  
кандидат наук з державного управління, доцент  Сергій ТАРАСОВ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Начальник кафедри управління  
у сфері цивільного захисту навчально-наукового  
інституту цивільного захисту  
кандидат технічних наук, доцент  Олександр ЗЕМЛЯНСЬКИЙ  
«11» квітня 2025 р.

Заступник начальника кафедри управління  
у сфері цивільного захисту навчально-наукового  
інституту цивільного захисту  
гарант ОПП "Управління у сфері  
цивільного захисту"  
кандидат економічних наук, доцент  Олександр ЯЩЕНКО  
«11» квітня 2025 р.