

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

О.А. Левтеров

АКУСТИЧНІ МЕТОДИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКІВ ЗАГОРЯННЯ

Монографія

Харків

2023

УДК 351.861

*Акустичні методи раннього виявлення осередків загоряння: монографія /
О.А. Левтєров. НУЦЗУ. — Харків: Видавництво «НУЦЗУ», 2023. 143с.*

У монографії йдеться про одне з можливих використань феномена акустичних хвиль, що супроводжують багато природних та фізико-хімічних процесів. Явище акустичної емісії зовсім недавно, з 70-х років 20-го століття, розпочало свій шлях з методу акустичної емісії неруйнівного контролю, тепер широко відомого та застосовуваного. У міру вдосконалення інформаційних та комп'ютерних технологій, обчислювальних інструментів, використання штучного інтелекту метод почав проникати у різні галузі науки і техніки, медицину та фармакологію. У монографії представлено використання цього дивовижного природного ефекту супроводжувати звуковими випромінюваннями процеси горіння на всіх стадіях його розвитку та сформовані умови попередження розвитку пожежі всередині та поза контрольованим об'єктом. За допомогою лабораторної установки реалізовано фізичну модель процесу горіння різних горючих матеріалів та розглянуто можливість «діагностики» джерела горіння: факт загоряння, ідентифікація виду будь-якого пального матеріалу (рідкий – твердий; деревина чи бавовна; нафта чи спирт тощо). Виявлення, реєстрація та обробка сигналу, подальший його аналіз та процес ідентифікації скорочені до мінімуму завдяки використанню традиційних та фрактальних форм подання акустичної хвилі, що випромінюється від джерела горіння; створена еталонна база акустичних образів матеріалів, що найчастіше сприяють самозайманню; забезпечується висока дискретність реєстрації рахунок рівня деталізації процесу отриманих варіаційних параметрів, а результативність і масовість – з допомогою евристичних алгоритмів обробки процесу ідентифікації. Керуючий алгоритм контролю над розвитком горіння реалізується з допомогою мереж нейроно-подобних елементів і робото-технічних систем, що значно скорочує час прийняття рішень за підсумками спостережень. Кожен етап досліджень забезпечується математичним описом та відповідним програмним забезпеченням як стандартних програм, так і програм, розроблених автором.

Монографія розрахована на широке коло наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проблемами протипожежного захисту об'єктів різного призначення, науково-педагогічних працівників і здобувачів вищої освіти закладів спеціального призначення. Дослідження може бути корисним винахідникам для виявлення та належного застосування невідомих особливостей акустичних хвиль.

Рецензенти:

А.В. АВРАМЕНКО, д.т.н., старший дослідник, завідувач відділу водневої енергетики інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України

Р.І. ШЕВЧЕНКО, д.т.н., професор, начальник кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій факультету пожежної безпеки НУЦЗ України

ЗМІСТ

Вступ	6
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКУ ЗАГОРЯННЯ	9
1.1. Традиційні способи виявлення осередку займання	9
1.2. Акустичні випромінювання при горінні як фактор виявлення осередку загоряння	12
2. АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ЯК МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІДКРИТОГО ГОРІННЯ	28
2.1. Фізична модель відкритого горіння	28
2.2. Фрактальний аналіз часових рядів акустичного сигналу зони горіння	33
2.3. Спектральний аналіз акустичних випромінювань осередку горіння. Енергетичний критерій факту загоряння	49
2.4. Порівняння результатів R/S та спектрального аналізів акустичних образів осередку горіння з еталонними характеристиками з бази даних	68
3. ФОРМУВАННЯ УМОВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ УНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ НА БАЗІ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	76
3.1. Загальні положення безпеки розвитку пожежі та виконання умов її попередження	76
3.2. Акустичний метод раннього виявлення осередку горіння і попередження надзвичайної ситуації всередині об'єкту	83
3.3. Акустичний метод раннього виявлення осередку горіння і попередження надзвичайної ситуації зовні об'єкту	88
4. ЛАБОРАТОРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	112
4.1. Лабораторна база експериментальних досліджень акустичних	112

випромінювань із зони горіння та методика проведення експерименту

4.2. Розрахунково-аналітичне визначення вимог до характеристик та формування складу реєстраційно-вимірювальної апаратури лабораторних установок	114
4.3. Оцінка похибки результатів експериментальних вимірювань та порівняння їх з результатами імітаційного моделювання	131
РЕЗЮМЕ	137
Список літератури	139

ВСТУП

Усвідомлене використання вогню, а потім енергії горіння стало запорукою соціального розвитку людства, що не убезпечило його від надзвичайних ситуацій, пов'язаних з одним із руйнівних явищ техногенного та природного характеру – пожежею. Світова статистика показує, що збитки від пожеж у розвинених країнах щорічно становлять 1% валового національного продукту. Відзначено, що на початку XXI століття у світі щорічно відбувається 10 – 12 млн. пожеж із загибеллю 100 – 120 тисяч осіб [1]. В Україні за даними [2] у середньому кожних 7 хвилин відбувається пожежа, а щодня у вогні гине 5 людей.

Пожежі впливають не лише на стан економіки, а й супроводжуються непоправною втратою людських життів, культурної спадщини, архівних документів, завдають шкоди живій природі. Очевидно, що проблема пожежної безпеки неминуча, тому завдання попередження пожежі, раннього її виявлення та вдосконалення технологій виявлення та придушення завжди актуальне.

Забезпечення пожежної безпеки на науковому рівні із залученням нових прикладних загальнонаукових, міждисциплінарних методів, що з'являються з розвитком нових знань про фізико-хімічні процеси горіння, інформаційних технологій об'єктивно обумовлено і завжди вимагає вирішення та вдосконалення. При реалізації та побудові систем забезпечення безпеки об'єктів різного призначення та складу головне завдання – створити ефективну систему виявлення початкової фази розвитку пожежі, використовуючи для цього всі можливі явища та ознаки, що супроводжують горіння: тепло, дим, відеозображення, зміна концентрації різних газів у навколишньому середовищі (CO_2 , CO , O_2 , HCl тощо), а також ультрафіолетове, інфрачервоне, радіаційне, звукове випромінювання. На жаль, будь-який із цих параметрів не є абсолютним критерієм повною мірою. Крім того, ускладнення пожежонебезпечного стану в сучасних умовах розвитку науково-технічного прогресу пов'язане з появою нових та широко застосовуваних легкозаймистих та горючих речовин та матеріалів, технологій та обладнання, що потребують спеціального захисту.

Пожежі відносяться до складних фізико-хімічних процесів, опис виникнення та перебігу яких можливий лише за допомогою системного підходу, що включає сукупність досліджень процесів горіння, фізико-хімічних перетворень палаючої речовини та явищ, що супроводжують горіння. Більшою мірою це стосується багатопараметричного невідконтрольного горіння, пов'язаного з виникненням та розвитком пожеж, що залежать від великої кількості факторів та граничних умов. Організація заходів щодо виявлення пожежі залежить від конкретних вихідних умов потенційно пожежонебезпечних місць. Як контрольовані об'єкти можуть бути природні масиви, відкриті майданчики, різного роду будівлі, складські приміщення, промислові підприємства, об'єкти підвищеної небезпеки, атомні та інші енергетичні об'єкти, шахти, рудники тощо.

Опис пожеж потребує підходу, підпорядкованого єдиній меті – пожежної безпеки. І, мабуть, головна складова у досягненні мети – раннє виявлення осередку загоряння, а отже, попередження та локалізація пожежі, що випливає з цього. Існують різні способи отримання об'єктивної інформації від пожежної безпеки, які забезпечують первинні перетворювачі, що визначають конструкцію приладу, його надійність і точність вимірювань. Йде постійне вдосконалення та створення нових первинних перетворювачів, датчиків, детекторів.

Очевидно, що захист від пожежі – проблема комплексна. У цьому доцільно звернути увагу на явище акустичної емісії (АЕ), яка за останні два десятиліття років переживає буквально революцію у використанні її можливостей у різних галузях науки та техніки. Йдеться про клас явищ, у яких пружні хвилі, генеровані швидким вивільненням енергії з локалізованих джерел, поширюються зі швидкістю звуку. АЕ супроводжує горіння на всіх його стадіях - тління, піролізу, стійкого та полум'яного горіння. Доцільно та перспективно розглянути цей ефект для раннього діагностування можливого осередку загоряння.

Сучасні досягнення у сфері інформаційних технологій і комп'ютерної техніки разом із обчислювальними математичними методами, у сфері вимірювальних приладів і датчиків дають можливість створення з урахуванням явища акустичної емісії системи раннього виявлення пожежі, що може поєднувати у собі

мультикритеріальні властивості на відміну інших способів виявлення вогню. Тому розробка такої системи та її теоретичне та практичне обґрунтування актуальна як така, що має соціально-економічне значення у розширенні можливостей організації пожежної безпеки на об'єктах різного призначення: складів, офісів, музеїв, архівосховищ, об'єктів військового призначення. Рання фіксація вогнища загоряння забезпечить запобігання пожежі або вибуху, що може спричинити загибель людей, екологічну катастрофу, велику матеріальну шкоду або втрату архівних та культурних цінностей.

При написанні монографії автор керувався основними положеннями фізичної акустики, фізико-хімічних процесів горіння, термодинаміки, хімотології; методами обробки та аналізу сигналів хвильових процесів, інформаційних технологій, методами автоматичного управління в технічних системах, а також матеріалами авторських статей.

Основний зміст роботи викладений у 4-х розділах. У вступі обґрунтовано тему роботи та завдання дослідження. Далі послідовно викладено: основні традиційні принципи виявлення джерел загоряння та обґрунтовано пропонується до розгляду для цього методу акустичної емісії. Суть методу раннього виявлення джерела загоряння, експериментальні результати досліджень на спеціальному лабораторному комплексі акустичних сигналів із зони загоряння, їх аналіз та математичний опис характерних процесів при горінні різних матеріалів, принципи порівняння цих процесів викладено у другому розділі. Крім того на базі акустичного методу виявлення горіння створена база еталонних акустичних образів, що несуть у собі небезпеку самозаймання. Усе це дозволило розробити науково-обґрунтований інженерно-технічний метод контролю пожежної безпеки як усередині, так і зовні об'єкту того чи іншого призначення.

Монографія розрахована на широке коло наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проблемами протипожежного захисту об'єктів різного призначення; викладачів, аспірантів, здобувачів вищої освіти та студентів пожежно-технічних та технічних навчальних закладів. Дослідження може бути цікаво просто допитливим читачам, і вони зможуть виявити інші особливості акустичних хвиль та знайти їм належне застосування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКУ ЗАГОРЯННЯ

Небезпеку у техногенній та природній сферах становлять два взаємопов'язані явища – пожежі та вибухи: у будівлях, на об'єктах видобутку, переробки та зберігання легкозаймистих, горючих та вибухових речовин, на промислових об'єктах хімічного, біологічного виробництв; у метрополітенах, шахтах; у зонах та складах зберігання та знаходження боєприпасів. Найбільші збитки від пожеж та вибухів зазначаються в енергетиці, у нафтогазовидобувній та переробній промисловості, на хімічних підприємствах, сільському господарстві. Величезний також збиток, завданий довкіллю.

1.1. Традиційні способи виявлення осередку займання

Найважливішим завданням для запобігання пожежі є фіксація початку пожежної ситуації за мінімальний час від початку процесу, який у реальних умовах прагне нуля. Технології виявлення пожежі постійно розвиваються, з метою виявлення джерела горіння нині використовуються пожежні сповіщувачі різного призначення та принципів дії, зокрема «резервуарні» теплові сповіщувачі, налаштовані на порогову температуру. Відомі теплові лінійні та нелінійні сповіщувачі контактного, оптичного та електронного принципу дії. Сучасні, часто застарілі системи виявлення пожежі можуть відрізнятися некоректністю, помилковими спрацьовуваннями, низькою чутливістю. У основі вони використовують алгоритми, засновані на статистичних параметрах [3-5]. Вибір і вдосконалення технологій виявлення пожежі неможливі без хоча б мінімального екскурсу в розуміння фізико-хімічних процесів горіння. Пожежа – це неконтрольована екзотермічна реакція горіння палива в будь-якому агрегатному стані: газу, рідини, твердого матеріалу, яка є стохастичною за своєю суттю. Як явище пожежа може приймати різні форми, але, зрештою, все зводиться до хімічної реакції

між горючою речовиною та киснем повітря або іншим паливом з виділенням теплової енергії. Супроводжується горіння різними фізичними явищами – виділенням тепла та його перенесенням, свіченням, димом, полум'ям, сукупністю газоподібних продуктів згорання, ультрафіолетовим та інфрачервоним випромінюванням електромагнітного спектру. Ці явища, що супроводжують процеси горіння, мають різні прояви залежно від матеріалу, що згорає. Фізичні та хімічні явища (фактори), що супроводжують горіння, відрізняються багатою різноманітністю та дають можливість використовувати їх для створення систем раннього виявлення вогнища займання. Загальним принципом роботи всіх пристроїв виявлення спалаху є своєчасна реєстрація фактору та оцінка його фізичної величини. Горючі матеріали та уповільнений час реакції на пожежу є основними причинами поширення пожеж, становлячи 40% та 28% усіх пожеж відповідно [6]. Відстрочення прийняття рішення залежить від продуктивності обладнання та складності алгоритмів прийняття рішень, встановлених у системах виявлення пожежі. Впровадження методів штучного інтелекту значно підвищує ефективність технології раннього виявлення вогню та його ліквідації, сприяє виявленню ситуацій, які важко класифікувати, використовуючи особливості одержуваних даних зондування потенційно небезпечної зони.

З розвитком досягнень в інформаційних технологіях, мікроелектроніці та системах зв'язку, а також з поглибленням знань у фізико-хімічних процесах горіння, розвиваються нові та вдосконалюються відомі методи та способи виявлення пожежі. Крім того, в даний час доступні методи вимірювання практично будь-яких стійких газоподібних різновидів, що з'являються до і під час горіння.

Системи виявлення пожежі можуть бути двох видів:

- обробка сигналу про пожежу та прийняття рішень здійснюється у детекторі;
- ідентифікація ознак пожежі та прийняття рішень виконується на панелі керування.

Детектори без мікропроцесорів та схем підтримки менш складні та надійніші. Потужний центральний процесор може бути вбудований у панель керування, щоб

система використовувала складні алгоритми обробки сигналу для ідентифікації ознак пожежі та її характеристик.

Кожен датчик, розташований у декількох місцях і має ідентифікатор адреси, передає інформацію на панель управління та прийняття рішень. Це може забезпечити можливість швидкого виявлення осередку пожежі. Дані від різних розподілених по об'єкту датчиків CO, CO₂, диму, тепла на загальному пульті керування знижують частоту помилкових спрацьовувань. На панелі керування можна отримати дані про точне розташування осередку пожежі за даними просторової системи виявлення.

З метою зменшення помилкових тривог, системи виявлення пожежі інтегруються з іншими системами, що обслуговують об'єкт, що охороняється: системами евакуації та системами гасіння пожежі

Фази процесу горіння і матеріал, що горить, зумовлюють вибір відповідної технології виявлення пожежі. Останні десятки років характеризуються тенденцією заміни натуральних ізоляційних, будівельних та меблевих матеріалів синтетичними матеріалами. Радикально, у зв'язку з цим, змінився рівень ризику при пожежі. Згорання синтетичних матеріалів відбувається зі значно більшою швидкістю, з виділенням небезпечних токсичних парів та більшим утворенням чадного газу. Крім іншого, спостерігається збільшення помилкового спрацьовування сигналізації, яке приносить багатомільйонні втрати.

Технології виявлення пожежі визначаються проявами займання в осередку його виникнення (дим, полум'я, виділення газу, різного роду випромінювання, відео зображення) та засобами, за допомогою яких здійснюється виявлення.

У зв'язку з цим розрізняються технології на основі диму, полум'я та відео. Використання детекторів може бути різним. Відеокамери не дають хибних даних у видимому випромінюванні від загальних фонових джерел, що усуває хибне спрацьовування, обробляють кілька спектральних зображень у режимі реального часу на великих відстанях за короткий час, визначають координати пожежі. Це відносно нова технологія зі зростаючою популярністю.

Широке застосування отримала газочутлива технологія, яка використовується не тільки для виявлення загорання, але і в області виявлення метану та чадного газу

в шахтах, в автомобільній промисловості як газоаналізатор вихлопних газів, в медицині, в екологічному моніторингу ґрунту, парникових газів, вимірюванні профілів тропосферного озону.

1.2. Акустичні випромінювання при горінні як фактор виявлення осередку загоряння

Аналіз робіт з моделювання поширення полум'я та виникнення пожеж дозволяє сформулювати основні вимоги до систем раннього виявлення та попередження пожеж. У якій би системі датчик не знаходився, бажана його відповідність деяким загальним вимогам:

- робота за кімнатної температури;
- робота у навколишньому середовищі без подачі кисню чи повітря;
- відсутність зовнішнього стимулятора;
- низька межа виявлення аналіту;
- швидке реагування (відгук) та швидке відновлення після кожного впливу аналіту;
- висока чутливість, селективність (виборчість);
- низька вартість та екологічність.

У загальному випадку можна сказати, що такі системи повинні мати високі метрологічні параметри – чутливість, селективність і стабільність вимірювань. Тобто, для вирішення проблеми раннього попередження займання та пожеж, необхідно вирішити завдання «3S» – sensitive, selectivity, stability, яке стоїть практично перед будь-яким аналітичним методом.

Технології виявлення пожежі все ще стикаються з проблемами, пов'язаними з помилковим спрацьовуванням, недостатньою чутливістю датчиків, динамічністю відгуку, необхідністю надійного забезпечення безпеки для цінних, складних або небезпечних установок. Це стосується музейних експонатів, архівів, музеїв загалом,

сховищ радіоактивних відходів та атомних електростанцій. І це додаткові проблеми, які потрібно вирішувати.

Аналіз існуючих систем та методів виявлення та протидії розвитку пожежонебезпечної ситуації показує їх малу ефективність у галузі ідентифікації осередку загоряння у початковій стадії, хоча сучасні досягнення науки та техніки у тій чи іншій мірі для цієї мети застосовуються.

Методи контролю, засновані на наведених фізичних явищах (тепло, дим, виділення газу, відео, різного роду випромінювання) фіксують процес пожежі, що відбувся. У той самий час, фізична сутність загоряння – деструкція речовини внаслідок швидкого підвищення температури, не розглядається. Але це і є початок моменту загоряння, яке необхідно зафіксувати. Отже, для достовірного та раннього виявлення пожежі може і має стати аналітичний контроль фактору, що супроводжує весь процес згоряння та його початок. І такий фактор є. Це акустичні випромінювання (або акустична емісія), що супроводжують фізико-хімічні процеси.

Горіння, крім видимих проявів – диму, полум'я, свічення та ін. супроводжується випромінюванням пружних акустичних хвиль. У зв'язку з цим доцільно звернути увагу на техніку методу акустичної емісії (АЕ), який за останні два десятки років переживає буквально революцію у використанні своїх можливостей у різних галузях науки та техніки. Мова йде про клас явищ, при яких за будь-якої зміни структури матеріалу пружні хвилі, що генеруються швидким незворотним вивільненням енергії з локалізованих джерел, поширюються зі швидкістю звуку. Метод АЕ дозволяє досліджувати деструкційні процеси, діагностувати ранні стадії їх розвитку. Випромінювання акустичних сигналів супроводжують горіння на всіх його стадіях – тління, піролізу, стійкого і полум'яного горіння як наслідок термодеструкції палаючого матеріалу, про що свідчать багато наукових праць у галузі вивчення процесів згоряння в енергетичних установках різного типу, при дослідженні характеристик нових палив, особливо важких, ракетних.

Акустична емісія просто і зручно реєструється, дозволяє в режимі реального часу здійснювати спостереження за процесом, що особливо важливо для швидких реакцій, до яких відносяться реакції горіння.

Метод акустичної емісії успішно поширюється на багато сфер науки, техніки, медицини та практичного використання, однак як засіб раннього виявлення потенційно можливої пожежі не розглядався. Це пояснюється недостатніми дослідженнями явища акустичного випромінювання у процесах горіння різних матеріалів та речовин та відсутністю безпосереднього розгляду цього ефекту для виявлення займання. У монографії представлені дослідження акустичних випромінювань у процесі горіння різних горючих речовин та метод їх використання для раннього виявлення загоряння як усередині об'єкта, що контролюється, так і зовні.

Акустична емісія – це процес випромінювання енергії у вигляді пружних хвиль, що виникає в результаті локальної деструкції речовини під зовнішнім досить швидким впливом: при пластичній деформації твердих матеріалів; при фазових перетвореннях; при плавленні, сольватації та кристалізації; при зміні меж магнітних ділянок (доменів). Водночас частотний спектр акустичних випромінювань лежить у межах від інфразвуку до десятків МГц. У макромасштабах – це землетруси, грім; а в мікромасштабах – руйнування та виникнення кристалів, фазові перетворення, корозія. Метод акустичної емісії є одним із провідних серед надійних інтегральних методів достовірного діагностування.

Прийнято поділяти явище АЕ залежно від фізичного джерела на такі види:

- АЕ матеріалу, викликана локальною динамічною перебудовою структури матеріалу;
- АЕ витоку, спричинена гідродинамічними та (або) аеродинамічними явищами при протіканні рідини або газу через наскрізний не суцільний простір об'єкту випробувань;
- АЕ тертя, викликана тертям поверхонь твердих тіл;
- АЕ при фазових перетвореннях, пов'язана з фазовими перетвореннями в речовинах та матеріалах;

- магнітна АЕ, пов'язана з випромінюванням звукових хвиль при перемагнічуванні матеріалів;
- АЕ радіаційної взаємодії, що виникає внаслідок нелінійної взаємодії випромінювання з речовинами та матеріалами;
- АЕ при хімічних та електрохімічних реакціях, включаючи різноманітні корозійні процеси.

Метод АЕ є одним з провідних серед надійних інтегральних методів достовірного діагностування технічного стану небезпечних виробничих об'єктів і неруйнівного контролю дефектів, що зароджуються, в матеріалах, прогнозування довговічності, оцінки терміну функціональності [7, 8].

Для виявлення дефектів у твердих матеріалах метод використовується давно і затребуваний досі. Тестування за допомогою АЕ – безперервний процес, який не потребує додаткових конструкцій. Сигнали АЕ, зазвичай, реєструються стаціонарними п'єзоелектричними датчиками (датчики працюють в діапазоні від 1 до 1200 кГц), що перетворюють акустичні хвилі в електричну напругу, яка потім вимірюється та посилюється [9].

Для виробництва цементу потрібні великі витрати енергії. Потенційною альтернативою цьому може стати геополімерний цемент, контроль за утворенням механічних та хімічних властивостей і гідратацією якого виконується за допомогою АЕ, що генерується в ході процесу виробництва. [10]. Неруйнівний метод контролю та метод динамічної ідентифікації пошкоджень [11] дозволяють отримати інформацію про стабільність та місцезнаходження дефекту, об'єднує обидва ці методи для спостереження за станом конструкцій великих будівель та споруд.

З перманентним старінням соціальної структури - мостів, тунелів, дорожнього покриття виникає зростаючий попит на оцінку їх поточного стану. Метод АЕ при цьому допомагає скоротити людський ресурс для спостереження за контрольованими об'єктами, зменшити матеріальні витрати. У роботі [12] широкосмуговий понадакустичний датчик MEMS (мікроелектронна система) порівнюється зі звичайним комерційним акустичним датчиком за якістю хвильових

спектрів, що реєструються, за допомогою вейвлет-перетворення і підтверджується його перевага.

Інфраструктура комунального господарства, водопостачання, тепломережі трубопровідна арматура постійно потребують спостереження за можливими витокami. Акустика є надійним засобом аналізу витоків, вібрації та кавітації [13]. Виявлення витоків є однією з найважливіших проблем і в нафто-і газогонах, оскільки їх наявність призводить до матеріальних втрат, а також серйозних наслідків для людини і навколишнього середовища [14, 15].

У машинобудівних конструкціях (коробки передач, редуктори), з деталями, що обертаються та високонавантажені, успішно діагностуються тріщини та інші дефекти за допомогою методу АЕ [16, 17]. Кількісний моніторинг зростання втомних тріщин проводиться методами дистанційного спостереження за станом залізничних рейок, в яких неминуча структурна деградація матеріалу від контактної втоми, згинального напруження та впливів навколишнього середовища [18].

Область використання методу АЕ постійно поширюється. Крім неруйнівного контролю, метод знаходить застосування моніторингу різних процесів. Властивість ефекту АЕ пропонується використовувати і як безперервний контроль за радіоактивними відходами, що зберігаються в спеціальних ємностях. За допомогою характерного сигналу АЕ спостерігається перебіг процесу насичення металу воднем при гальванічному гідруванні, наприклад фіксується момент формування гідриду паладію. Контроль та управління процесом шліфування в металургії та машинобудуванні відносно нова технологія, заснована на аналізі акустичної енергії, що генерується при згорянні матеріалу в процесі шліфування, можливе також вимірювання зносу інструменту при фрезерній обробці.

У реальних промислових процесах кристалізації АЕ використовується як стеження за перебігом процесу за різних умов і різних типів кристалізації, а потім для аналізу отриманих кристалів [19].

Про можливість і доцільність ефекту АЕ як прикладного інструмента виявлення вогню в літаках, різних складах йдеться у статті [20]. У роботі наводиться опис експериментальної перевірки: на відстані 3 дюймів від свічки, що дає тепло,

розташовуються предмети з матеріалів різної структури - скляна та сталева тарілки, ковпак із ПХВ. Акустичні сигнали уловлюються лазерним інтерферометром.

Теплові та акустичні характеристики лісової пожежі з погляду горючого матеріалу розглядалися у [21]. Проводились як лабораторні, так і польові випробування зі спалювання сміття, листя, хмизу, чагарника з урахуванням зовнішніх умов середовища: вологості, вітру, сонячної радіації, рельєфу місцевості. Метою досліджень було отримання оцінки акустичних спектрів від різних матеріалів, що згоряють, за спеціальним алгоритмом, оцінювався вплив теплового випромінювання на оптоволоконні датчики з відкритими кабелями. Передбачалося за результатами досліджень створення нової системи моніторингу лісових пожеж.

Ефект виникнення акустичних випромінювань у ході хімічних реакцій аналізувався вже у 70-х та 80-х роках ХХ століття. Подальше осмислення та обґрунтування цього процесу дозволило проводити тестування, контроль та діагностику процесів у рідких та твердорідних реакційних середовищах, отримувати важливу (часто унікальну) інформацію щодо хімічної кінетики та фізико-хімічних процесів. Інтерес у цих роботах представляє висновок універсальності явища акустичної емісії, тобто, про виникнення в будь-якому реакційному середовищі або фізико-хімічному процесі, генерації та синхронності акустичних коливань в окремих ділянках системи. Застосування такого чинника виявлення горіння може мати ряд переваг перед іншими чинниками раннього виявлення вогню. По-перше, час виявлення акустичного сигналу менше за час виявлення датчиком температури і його можна порівняти з аналогічними показниками детектора диму. По-друге, датчик АЕ може не мати прямого контакту з вогнем (полум'ям), оскільки акустичний сигнал може передаватися через середовище, поверхні та інші елементи конструкцій. По-третє, використання ефекту акустичних випромінювань для виявлення пожежі дозволяє виявляти його в закритих відсіках (серверні сховища, паливні кожухи, прориви трубопроводів та магістралей з подальшим займанням тощо).

Пояснення виникнення викиду енергії як пружних акустичних хвиль у процесі відкритого горіння потрапляє у область термодинаміки. Горіння матеріалу пов'язане

із зміною його агрегатного стану, з фазовими переходами першого та другого роду протягом процесу горіння залежно від зовнішніх умов. У природі здебільшого фізичні системи є відкритими. Розглядаючи осередок загорання як відкриту термодинамічну систему, та застосовуючи до неї закони термодинаміки, зокрема поняття про вільну енергію Гіббса, отримаємо пояснення появи акустичних випромінювань внаслідок стрибкоподібної зміни внутрішньої енергії системи, в якій через термодеструкцію речовини, внаслідок хімічних реакцій окислення, відбувається речовини та енергії у вигляді перерозподілу мас та пружних акустичних хвиль.

Що стосується термодинамічних систем з перерозподілом мас внаслідок хімічних реакцій або (і) фазових переходів зведене рівняння I та II законів термодинаміки [22], набуває вигляду

$$dU = TdS - pdV + \sum \mu_i dm_i.$$

Рівняння показує, що в цьому випадку мають місце три типи взаємодій – термічну, механічну та хімічну, які визначають зміну внутрішньої енергії системи. Причину виникнення фазових переходів та хімічних перетворень пояснює теорія Гіббса, згідно з якою причину цих змін слід шукати у неоднорідностях, що виникають у самій системі. Введення поняття хімічного потенціалу у термодинаміку показало, що неоднорідність поля хімічних потенціалів призводить до процесів перерозподілу мас. У виразі роботи хімічних сил у процесах хімічних і фазових перетворень з'являються хімічні потенціали компонентів (або молей) μ . Нерівноважність хімічних процесів, що характеризують горіння, може виражатися лише у перерозподілі маси всередині системи.

Вільна енергія Гіббса як функція стану для системи зі змінним числом частинок має вигляд

$$dG = -SdT + VdP + \mu dN.$$

Відмінною особливістю фазових переходів 1 роду є стрибкоподібна зміна об'єму V та ентропії S , оскільки $S = -(\partial G/\partial T)_p$ та $V = (\partial G/\partial P)_T$.

При цьому одночасно можлива і стрибкоподібна зміна других похідних від вільної енергії. Фазові переходи I роду супроводжують зміну агрегатного стану. Енергії Гіббса кожної із фаз ($G1$, $G2$) є різними функціями термодинамічних параметрів. До процесів зміни агрегатного стану речовини відносяться: випаровування, конденсація, плавлення, сублімація. Цілком сюди відноситься і процес горіння твердих і рідких матеріалів. Можна провести порівняння процесу руйнування матеріалу від механічного впливу та термодеструкцію матеріалу (зміна агрегатного стану) при його горінні.

На рис.1.1 [23] представлений профіль процесу розвитку пожежі та обмеження його виявлення за допомогою різних технологій встановлення загоряння. Враховуючи, що акустичні випромінювання фіксуються не тільки в зоні самозаймання та подальшого розвитку процесу, а й до початку відкритого горіння: у фазі піролізу, тління, взагалі у фазі початку термічних змін у структурі матеріалу, можна говорити про перспективність методу акустичної емісії у галузі пожежної безпеки.

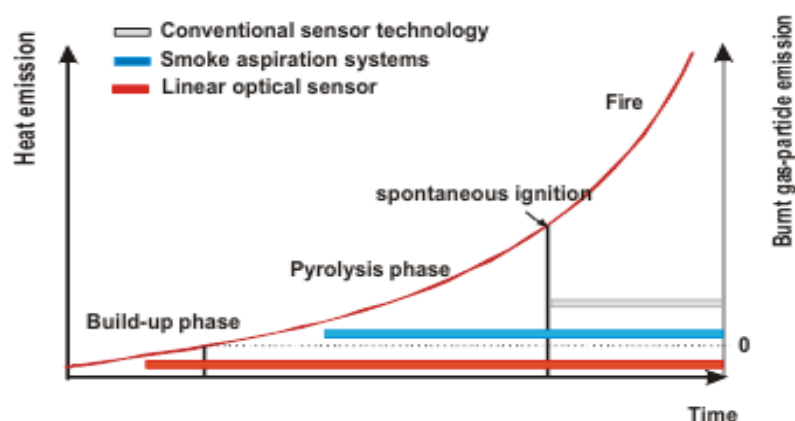


Рис. 1.1. Профіль процесу пожежі та обмеження різних технологій виявлення

Публікацій, що пов'язують АЕ та процеси горіння рідких та твердих речовин, мало, зі зрозумілих причин, виключаються вибухові процеси з виділенням великої

кількості енергії, що супроводжується ударною хвилею, що трансформується в акустичні коливання. Процеси горіння, як правило, розглядаються стосовно енергетичних установок, що перетворюють енергію горіння на механічну роботу. Цікава робота [24], де методами акустичної емісії аналізується процес горіння твердого ракетного палива в заданих діапазонах тиску і температури, що спалюється в пальнику, розташованому під водою. Дослідження отриманих акустичних спектрограм дозволило зробити висновки про найважливіші характеристики палива: швидкість горіння, період затримки займання, локальні згасання.

Як індикатор пожежі акустичні випромінювання розглядалися в [20,25], вивчалися низькі частоти, що спостерігаються як мерехтіння полум'я через вихорові структури в основі вогню, було показано, що акустичні хвилі є періодичними з частотою, зворотно пов'язаною з квадратним коренем від площі осередку пожежі. При акустичному методі виявлення сенсори практично не чутливі до води, пилу, високої температури, легко реєструють акустичне випромінювання, можуть виявляти та ідентифікувати пожежі, пов'язані з рідким паливом, також практично не мають обмежень щодо просторового розміщення. Застосування газових сповіщувачів пов'язане з використанням джерела живлення чутливого елемента датчика, чого, як правило, не потрібно для акустичних датчиків. Також, за наявності в базі даних спектрального відбитка палаючої речовини, не потрібно налаштування датчиків на окремі параметри, виявлення загоряння проводиться за аналізом акустичних спектрів.

Таким чином, акустичний метод, маючи низку переваг (висока чутливість, легкість реєстрації в режимі реального часу, широка область покриття, можливість отримання швидкої реакції у відповідь, класифікація ступеня небезпеки, достовірність реєстрації), може значно підвищити можливості відомих традиційних методів раннього виявлення осередку загоряння. Виявлення полум'я за акустичним спектром реакції горіння дозволяє виявити полум'я в реальному часі і не вимагає складних і витратних за часом алгоритмів аналізу відеозображень та знаходження акустичних сенсорів безпосередньо в зоні візуального контролю полум'я та відстань до осередку загоряння не обмежена, не залежить від концентрації диму та інших

частинок процесу горіння. Крім цього, для підвищення надійності не потрібно кілька відеокамер, що є витратним і економічно може бути невиправданим.

Під акустичним випромінюванням маються на увазі, перш за все, поздовжні хвилі, що викликають коливання середовища, нормальні фронту поширення. Під сигналом розуміються перші вступі поздовжніх хвиль, що прийшли на чутливі елементи системи.

Щоб зробити висновок про можливість використання акустичних випромінювань з осередку горіння для встановлення факту загоряння, ідентифікації природи горючого матеріалу та, якщо потрібно, координат джерела початку горіння, необхідно дослідити якісні характеристики процесу випромінювань, за якими можна буде проводити діагностику пожежонебезпеки.

Загально прийнято умовний поділ всього різноманіття сигналів АЕ на два типи. До першого типу відносяться імпульсні сигнали, що складаються з окремих високо-амплітудних сплесків (вибухів емісії), які є перехідним загасаючим процесом. Другий тип являє собою безперервний шумоподібний сигнал з відносно малою амплітудою. Спектр безперервної емісії містить більшу частку високих частот порівняно з емісією вибухового типу. Безперервна АЕ генерується у разі, коли кількість елементарних джерел велике, а їх енергія мала. В результаті малі сигнали перекривають один одного, створюючи безперервний низько-енергетичний сигнал.

Апарати, що використовуються для реєстрації сигналів та подальшого опису форми звукової хвилі, дотримуються аналогових схем. Головне завдання правильно прийняти сигнал та проаналізувати процес, який вони відображають. Відкрите горіння – складна фізична система з непередбачуваною поведінкою. Природньо розглядати сигнал АЕ як безперервний випадковий процес. Дійсно, довільний сигнал АЕ відображає стохастичний характер руху термодеструкційних процесів палаючої речовини з переміщенням великої кількості молекул і атомів у випадковому полі неоднорідного середовища. Складна, непередбачувана поведінка стохастичної системи обумовлена випадковими змінами її параметрів випадковим зовнішнім впливом, розвитком у системі різноманітних нестійкостей. Вочевидь, що статистичні методи, розроблені теорії випадкових процесів, цілком застосовні для

кількісної характеристики АЭ. Але очевидно і те, що розглядати акустичні випромінювання з потенційного осередку горіння необхідно в режимі реального часу практично миттєво, коли немає необхідного часу на збір відповідної кількості інформації, її обробку згідно зі статистичним методом.

В останні роки набули поширення і деякі менш відомі способи обробки сигналів та хвильових процесів, засновані на фрактальному, мультифрактальному аналізах та вейвлет-перетвореннях. Методи відрізняються універсальністю, придатними для економічних, природних, гуманітарних явищ, які можна охарактеризувати з погляду самоподібності як основної характеристики фракталу. Фрактали, схоже, можна назвати мовою природи та геометрії динамічного хаосу. У наукових дослідженнях фрактальний підхід (якому ледве набирається років 30) застосовується як безпосередньо до опису форм фізичних тіл, так і до геометричних образів, що виникають у процесі досліджень – безлічі особливих точок, графіків та траєкторій процесів.

Однією з основних цілей аналізу акустичних випромінювань є визначення характеристик і параметрів акустичного шуму, подальша інтерпретація яких дасть можливість отримання інформації про процеси, що протікають в системі зароджуваного горіння. Акустичні шуми багато що можуть розповісти, і розповідають про зношування в деталях, про вади в серці, про фізичні процеси космічних утворень. Головне видалити шумові перешкоди та встановити інформаційні складові акустичного сигналу у часовій та частотній області. Будуватимемо фрактальну акустичну модель ідентифікації джерела випромінювань, звертаючись до фрактального уявлення акустичних сигналів, та спираючись на праці Херста і Петерса.

Важливою характеристикою стохастичних сигналів (їх часто називають шумами) є спектральні залежності. Вибір методу спектрального аналізу більшою мірою залежить від бажаного компромісу між дисперсією і роздільною здатністю майбутньої оцінки, а також від доступної кількості даних. Останнє визначається фізичними параметрами досліджуваного процесу та можливостями реєструючої апаратури.

Спектр – дуже важлива характеристика сигналу і пов'язана з тимчасовим видом сигналу взаємно-однозначною залежністю. З математичної точки погляду сигнал це функція. Існує два способи опису сигналу: у вигляді функції $y = f(t)$ від незалежної змінної часу (t), у вигляді функції $y = f(\omega)$ незалежної змінної частоти (ω). Ці два представлення сигналу пов'язані один з одним перетворенням Фур'є і, отже, метод обробки сигналу вимагає знання властивостей перетворення Фур'є. Якщо відомий вид сигналу, спектр сигналу може бути обчислений за допомогою перетворення Фур'є. І навпаки.

За формою сигналу та його спектру можна будувати висновки про природу джерела акустичних випромінювань. І це дуже важливо. При цьому слід пам'ятати, що вихідна форма хвилі, що виникає безпосередньо біля джерела, зазнає значних викривлень, обумовлених дисперсією пружних хвиль, поверхневими ефектами, викривленнями вимірювальної системи, іншими зовнішніми, часом випадковими факторами. І це необхідно враховувати під час аналізу звукового сигналу. Тому етапи обробки сигналу повинні передбачати коригування, згладжування та нормалізацію отриманих спектрограм.

Фур'є-образ будь-якої функції визначений для усіх значень частоти (позитивних і негативних). Усі класичні спектральні аналізатори та Фур'є-перетворювачі обчислюють спектр та Фур'є-образи лише для позитивних частот. Може здатися, що в цьому полягає протиріччя, але насправді його немає. Коли деякий пристрій обчислює Фур'є-образ фізичної функції, він оперує з речовими функціями (отриманими при вимірюваннях), без уявних складових. Визначити Фур'є-образ для негативних частот можна, неврахування частини Фур'є-образу, що відповідає негативним частотам, може призвести до великих похибок. Тому в представлених у монографії дослідженнях використовувалося обчислення Фур'є-образу комплексної функції (цей випадок має місце при використанні зворотного перетворення Фур'є). Взагалі кажучи, Фур'є-образи, якщо вони існують, і спектральні щільності речових сигналів мають властивість ермітової симетрії. Завдяки цій властивості достатньо знайти відповідну спектральну густину тільки для позитивних частот.

Для точного обчислення Фур'є-образів зазвичай застосовуються не аналогові, а дискретні перетворювачі Фур'є. Про інтенсивність акустичної хвилі можна судити за її енергетичними показниками. Спектральний аналіз – класичний метод оцінки енергетичних показників спектрів сигналу як функції часу, чи як функції частоти пов'язаний з перетворенням Фур'є. Однією з основних властивостей перетворення Фур'є є незалежність амплітудного спектру від зсуву сигналу у часі. При переміщенні функції змінюється лише фазовий спектр. Будь-яка передача інформації пов'язана з передачею енергії. Середня потужність на проміжку часу завдовжки T визначається формулою

$$P(t_0, T) = 1/T \int_0^{t_0+T} x(t) \cdot x^*(t) dt.$$

Якщо $x(t)$ – речова інтегрована функція (випадок фізичних сигналів), то

$$P(t_0, T) = 1/T \int_0^{t_0+T} [x(t)]^2 dt.$$

Для будь-якої функції $x(t)$, дійсної або комплексної із символічного запису $x(t) \leftrightarrow *X(\omega)$ витікає $x^*(t) \leftrightarrow X^*(-\omega)$ (z^* і z — комплексно-сполучені величини). Функція $X(\omega)$ називається фур'є-образом функції $x(t)$.

У загальному випадку функція $X(\omega)$ — комплексна та її дійсна та уявна частини обчислюються за формулами

$$\text{Re}[X(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos 2\pi \omega t dt,$$

$$\text{Im}[X(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin 2\pi \omega t dt.$$

Енергія сигналу дорівнює інтегралу від потужності з усього проміжку існування сигналу. Тимчасова функція потужності називається просто потужністю;

частотну функцію потужності називають спектральною потужністю чи просто СПЕКТРОМ. Повна енергія сигналу відповідає виразу

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \cdot dt.$$

Для виявлення осередку горіння ця величина відіграє вирішальну роль, оскільки, безперечно, свідчить про ступінь інтенсивності процесу термодеструкції в матеріалі. Значення повної енергії, визначені з часового та частотного представлень сигналу, збігаються.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega.$$

Для класичних методів спектральна роздільна здатність та дисперсія можуть бути визначені відповідно до табличних даних, у яких ці величини в загальному випадку знаходяться відповідно у прямій та зворотній залежності від кількості наявних відліків. Залежність роздільної здатності від вікна, що використовується, виражається в залежності від ширини головної пелюстки, визначеної за рівнем ЗдБ.

Безперервний сигнал акустичного випромінювання, що надходить після вимірювального пристрою, фіксується в певні моменти часу, дискретизується з метою подальшого аналізу. Спостереження проводяться через постійний проміжок часу, у такому випадку часовий інтервал становив 22 мкс, тобто дискретизація здійснювалася з частотою 1/22 МГц. Вплив дискретизації на безперервний сигнал у монографії розглядався спеціально.

Безперервний випадковий процес не може бути повністю представлений у вигляді ряду Фур'є, інакше довелося б передбачити періодичність сигналу та інтегрованість функції за нескінченним інтервалом часу, щоб виконати умову

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty.$$

Тому при використанні перетворення Фур'є з безперервного сигналу виділяється ділянка тривалістю $(-\Theta/2, \Theta/2)$. Вже цей сигнал подається на вхід системи протягом часу, і обробляється частина сигналу, визначена на цьому проміжку часу Θ . Цей етап називається віконним перетворенням Фур'є, він рівносильний множенню сигналу на прямокутну функцію, яка називається природним часовим вікном.

Використовуються різні різновиди віконних функцій (Хеммінга, Хеннінга, Гауса, Чебишева, Розенфілда та ін.), У роботі під час обробки сигналу використовувалося вікно Хеммінга.

Ще одним важливим етапом методу акустичної емісії є виділення корисного сигналу з шуму. Викривлення сигналу, що вносяться вимірювальною системою, каналами передачі, зовнішніми факторами – це головна проблема в техніці реєстрації АЕ та подальшій обробці даних, тим більше, що джерела шуму відрізняються завидною різноманітністю: акустичні, теплові, електромагнітні, шуми аналого-цифрового перетворення, шуми вимірювального тракту. У разі неможливості визначення амплітуди шумової компоненти необхідний процес фільтрації. У роботі за це відповідали спеціально розроблені алгоритми управління всією сукупною системою методу раннього виявлення осередку горіння хвильовими акустичними випромінюваннями, забезпечене програмним супроводом кожного етапу методу спеціальними стандартними програмами і програмами, розробленими автором.

При аналізі процесу горіння розглядається безпороговий метод детектування та реєстрації безперервного сигналу акустичних випромінювань, що свідчить про генерацію акустичних хвиль із осередку горіння у навколишнє середовище та поширення у ньому. Хоча поділ АЕ на безперервну і імпульсну є досить умовним, оскільки можливість роздільної реєстрації імпульсів АЕ залежить лише від характеристик використовуваної апаратури та її можливостей. Ключовий недолік порогового принципу реєстрації – втрата інформації про «передісторію» значень амплітудно-часової характеристики сигналу АЕ. Реєстрація числових характеристик

сигналу знижує інформативність результату в порівнянні з реєстрацією амплітудно-часових, але підвищує швидкодію системи.

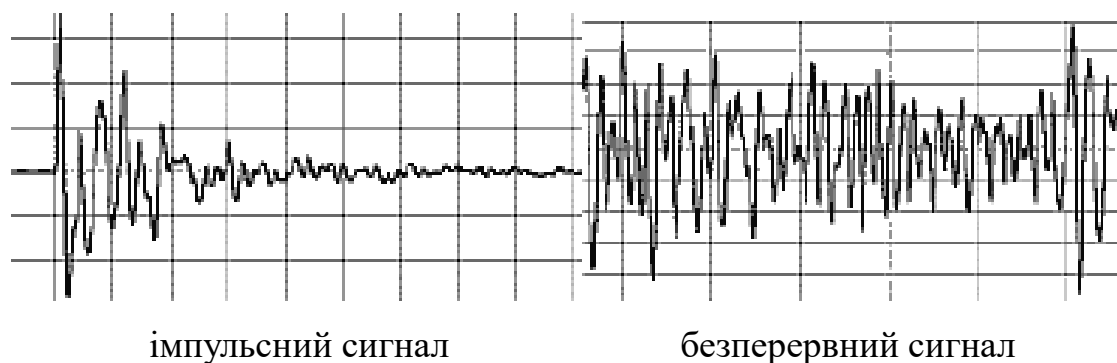


Рис. 1.2. Тип імпульсного та безперервного сигналу в залежності від реєстрації

У середині безперервного сигналу неможливо однозначно виділити характерні імпульси коливань. Імпульси АЕ характеризуються амплітудою; тривалістю; формою; частотним спектром та часом появи. Потік сигналів АЕ можна характеризувати: амплітудним розподілом; амплітудно-тимчасовим розподілом; середнім значенням амплітуди імпульсів; дисперсією амплітуди; розподілом часових інтервалів між імпульсами; середньою частотою їхньої появи; спектральною густиною; кореляційною функцією. Частота за визначенням є кількість коливань за одиницю часу T і, отже, дорівнює відношенню кількості коливань N до інтервалу часу $\Delta t = NT$:

$$f = \frac{N}{\Delta t} = \frac{N}{\Delta T} = \frac{1}{T}$$

Частота значною мірою визначає характер взаємодії коливань із довкіллям. Встановлено їх класифікацію за частотними діапазонами: коливання частинок середовища з частотою менше 16 (20) Гц – інфразвук, з частотами від 16 (20) Гц до 20 кГц – звук, від 20 кГц до 109 кГц – ультразвук, гіперзвук – те, що вище 109 кГц. Слід зазначити, що найбільш ефективно в технічній діагностиці неруйнівного

контролю АЕ використовуються саме ультразвукові коливання (метод активного впливу).

У разі реєстрації акустичних сигналів із зони горіння необхідний аналіз початкової частини сигналу, що реєструється. Це важливий, але складний метод дослідження. Так дослідники у сфері випробування матеріалів і неруйнівного контролю більшою мірою зацікавлені у отриманні статистичних оцінок параметрів акустичної емісії, ніж у докладному вивченні характеристик окремих джерел емісії. Вони використовують вузько-смугову апаратуру, що дозволяє вимірювати лише деякі параметри форми сигналів, але водночас реєструвати великі потоки сигналів на секунду.

Розвиток сучасних технологій сприяє поширенню способів реєстрації та аналізу хвильових процесів. Система попередження пожежі та її розвитку незалежно від зони та місця виникнення небезпеки, характеру причини, що викликала загоряння (природна, техногенна, антропогенна) має бути перш за все спрямована на раннє та достовірне виявлення виниклого осередку горіння. Технології раннього виявлення осередку займання постійно розвиваються на тлі нових досягнень у різних галузях науки та техніки.

Методи акустичної емісії, що за останні кілька десятків років зарекомендували себе в науковому та практичному застосуванні в багатьох сферах від неруйнівного контролю до фармакології, заслуговують на увагу дослідження, спрямованого на аналіз акустичних процесів, що відбуваються в осередку загоряння на всіх стадіях розвитку горіння.

РОЗДІЛ 2

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ЯК МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІДКРИТОГО ГОРІННЯ

2.1. Фізична модель відкритого горіння

Вивчення процесів горіння з позицій фізичних та хімічних законів, механізму поширення полум'я та вигорання газоподібних, рідких та твердих речовин, а також вплив умов горіння на швидкість процесу дозволяє визначити критичні умови виникнення, розвитку та припинення горіння та, як наслідок, обрати заходи, спрямовані на забезпечення запобігання пожежонебезпечній ситуації. Розвиток мікроелектроніки та інформаційних технологій поряд з подальшим осмисленням фізики та хімії процесів горіння дозволили в останні роки дослідити та використовувати ефект акустичної емісії у різних технологічних процесах. Розглянемо можливості цього ефекту для раннього діагностування можливого осередку займання.

Процес відкритого горіння (відкритої термодинамічної системи) досліджуваних однорідних за структурою і складом горючих матеріалів і речовин (легкозаймисті рідкі і тверді целюлозо-місткі) будемо вважати випадковим процесом, що супроводжується послідовним випромінюванням акустичного сигналу змінної інтенсивності. Фізична модель відкритого горіння реалізується за допомогою експериментальної лабораторної установки.

Раніше зазначалося, що акустичні випромінювання, що супроводжують горіння, є результатом термічної деструкції матеріалу. При виборі зразків для експериментальних досліджень керувалися набором матеріалів, притаманних для типових приміщень та об'єктів: побутових, архівних, музейних, промислових будівель, складів різного типу (від паперу та фарб до боєприпасів). Через війну визначено список досліджуваних матеріалів: деревина, вата, папір, бинт, тканина,

сира нафта й низка нафтопродуктів, спирти, ацетон, пластик. Зразки зі списку досліджуваних матеріалів однакові за вагою (тверді) або об'ємом (рідкі) .

Генерація акустичних коливань характеризується амплітудно-частотною характеристикою з енергетичним показником, що залежить від частоти (f) і часу (t) випромінюваного акустичного спектру (образу) $\Psi^j(t)$.

Акустичний образ будь-якої хімічної реакції має квазістаціонарний характер і є наслідком виділення або поглинання енергії, що призводить до виникнення хвиль пружності в реакційному середовищі, які можна виявити, використовуючи датчики, що забезпечують прийом слабких сигналів на тлі власних шумів. Отже, інформація про стан матеріалу й процесів, що супроводжують деструкцію цього матеріалу, являє собою характеристичний частотний спектр механічних коливань, який характеризується частотно-часовим енергетичним показником $[W_{\text{небезпека}}^{\text{Акуст}}(F,t)]$.

У зв'язку з тим, що процес акустичної емісії характеризується імпульсами тривалістю ($10^{-8} - 10^{-4}$) с, що обумовлено швидкістю хімічної реакції, а енергія окремого імпульсу становить від 10^{-9} до 10^{-5} Дж, то частотний спектр акустичного образу перебуває в широких межах – від області інфразвуку й частот чутного звуку до десятків і сотень МГц.

Інтенсивність імпульсів акустичної емісії залежить від об'єму простору, в якому речовина піддається деструкції, а також від зміни об'єму продуктів хімічної реакції. Значення амплітуди механічних коливань (звукові хвилі) в твердих тілах при хімічних реакціях, знаходяться в межах від $1 \cdot 10^{-4}$ до 5 мм.

На основі вище викладеного можна стверджувати, що характерний частотний діапазон хімічних реакцій, виходить за область частотних діапазонів, властивих для виробничих приміщень та приміщень, де перебувають люди рис. 2.1.

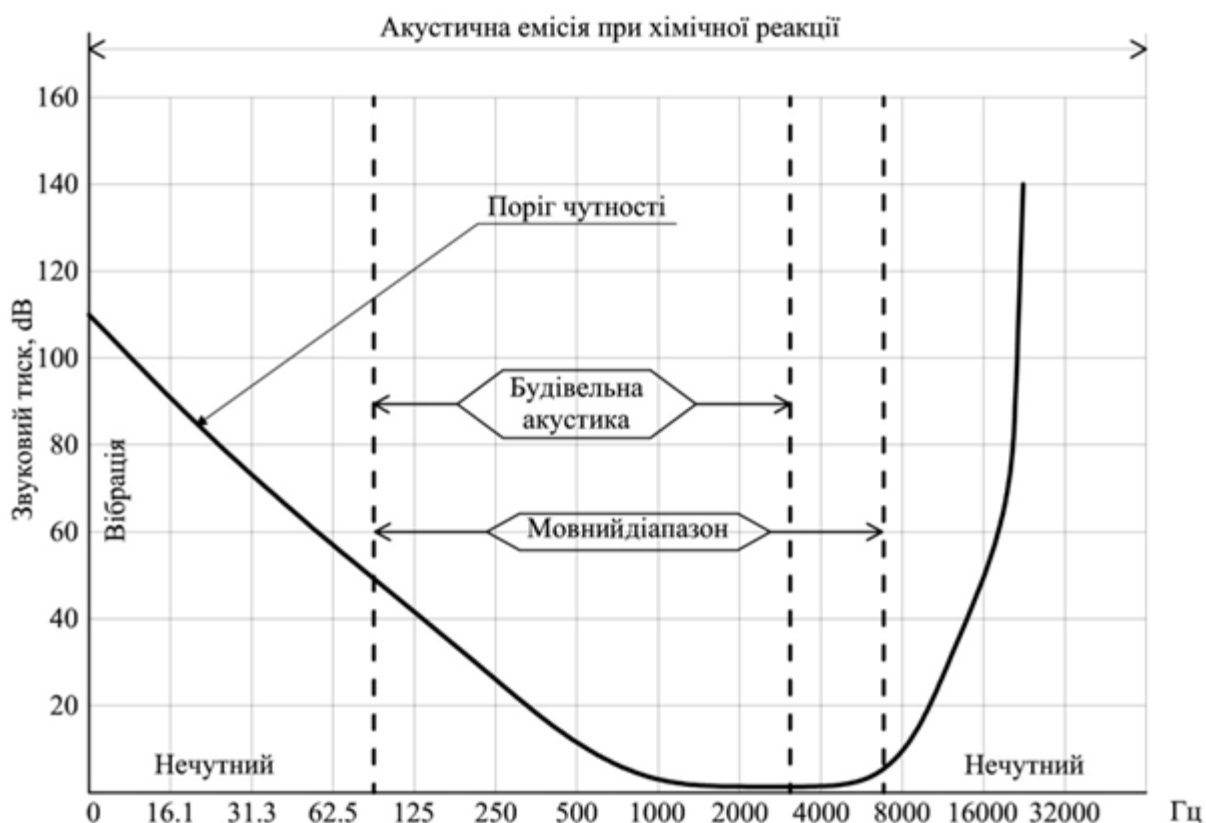


Рис. 2.1. Спектральні характеристики ефекту акустичної емісії хімічної реакції, будівельної акустики й мовного діапазону

Алгоритм обробки акустичних сигналів, що супроводжують хімічні реакції горіння дослідних зразків займистих речовин, будується за умови існування часового ряду $X(t)$. Множина імпульсів безперервного акустичного сигналу реєструється в часі. Як правило, інформація про поведінку фізично складних динамічних систем отримується у вигляді саме таких експериментальних даних, аналіз яких проводиться різними способами та засобами. Видів аналізу часових рядів багато (перетворення Фур'є, спектральний аналіз, вейвлет-перетворення, фрактальний аналіз, аналіз тренду та багато інших). Однак завжди переслідуються дві основні мети аналізу часових рядів: визначення природи ряду та прогнозування поведінки системи (прогнозування майбутніх значень часового ряду за поточними та минулими значеннями).

Підчас експерименту досліджувалась і аналізувалась можливість розпізнавання типу зразків палаючих речовин і, крім того, міра подібності між

зразками одного класу, тобто між результатами експериментів, що стосуються однієї й тієї ж речовини. Вже перші результати обробки даних експерименту показали характерну різницю у вигляді хвильового процесу при горінні різних матеріалів.

На рисунках нижче (2.2, 2.3, 2.4) для прикладу наведено типову форму спектра випромінювання, часовий ряд і амплітудно-частотну характеристику акустичного сигналу, що реєструється в процесі горіння деяких речовин.

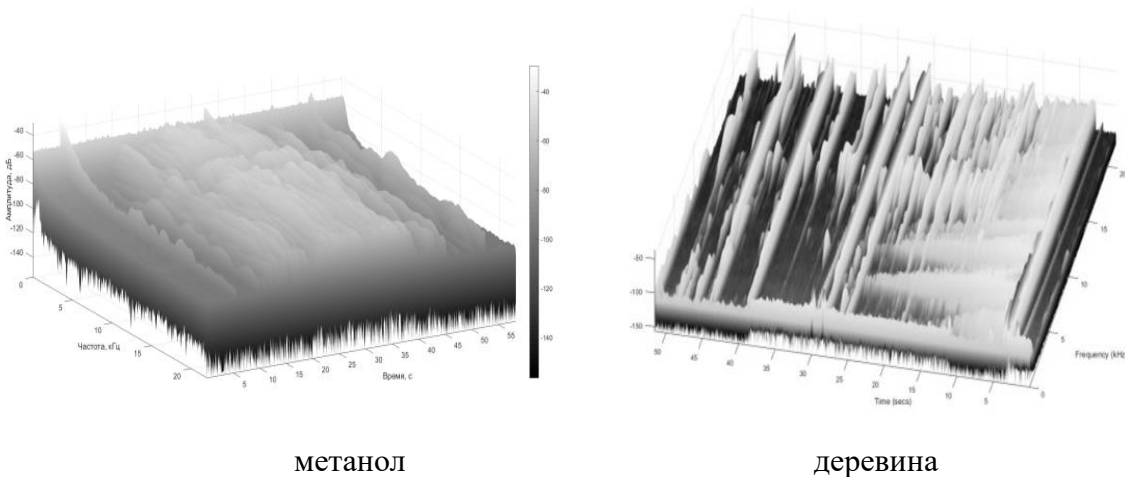


Рис. 2.2 – Спектрограми акустичних випромінювань у процесі горіння метанолу та деревини

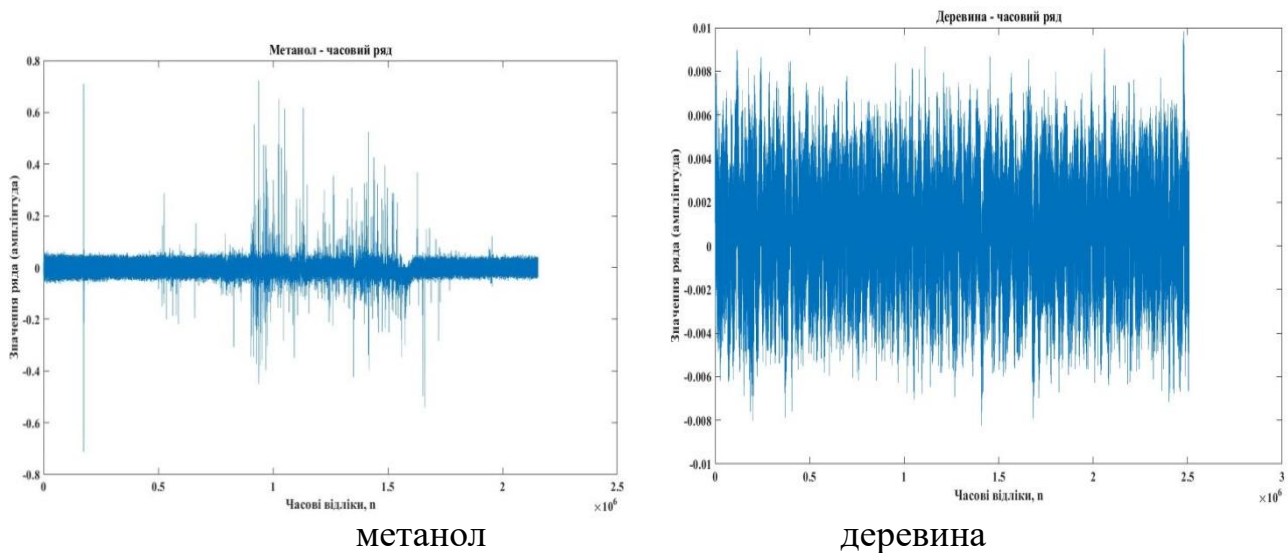


Рис. 2.3 – Часові ряди звукового сигналу під час горіння метанолу та деревина

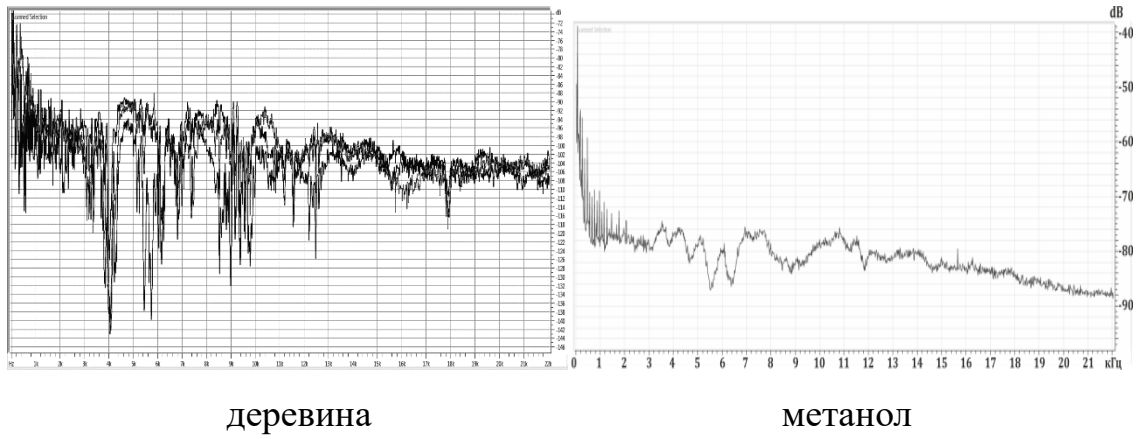


Рис. 2.4 – Амплітудно-частотна характеристика звукового сигналу при горінні метанолу та деревини

Алгоритм обробки акустичних сигналів у ході експерименту відповідає схемі на рис. 2.5

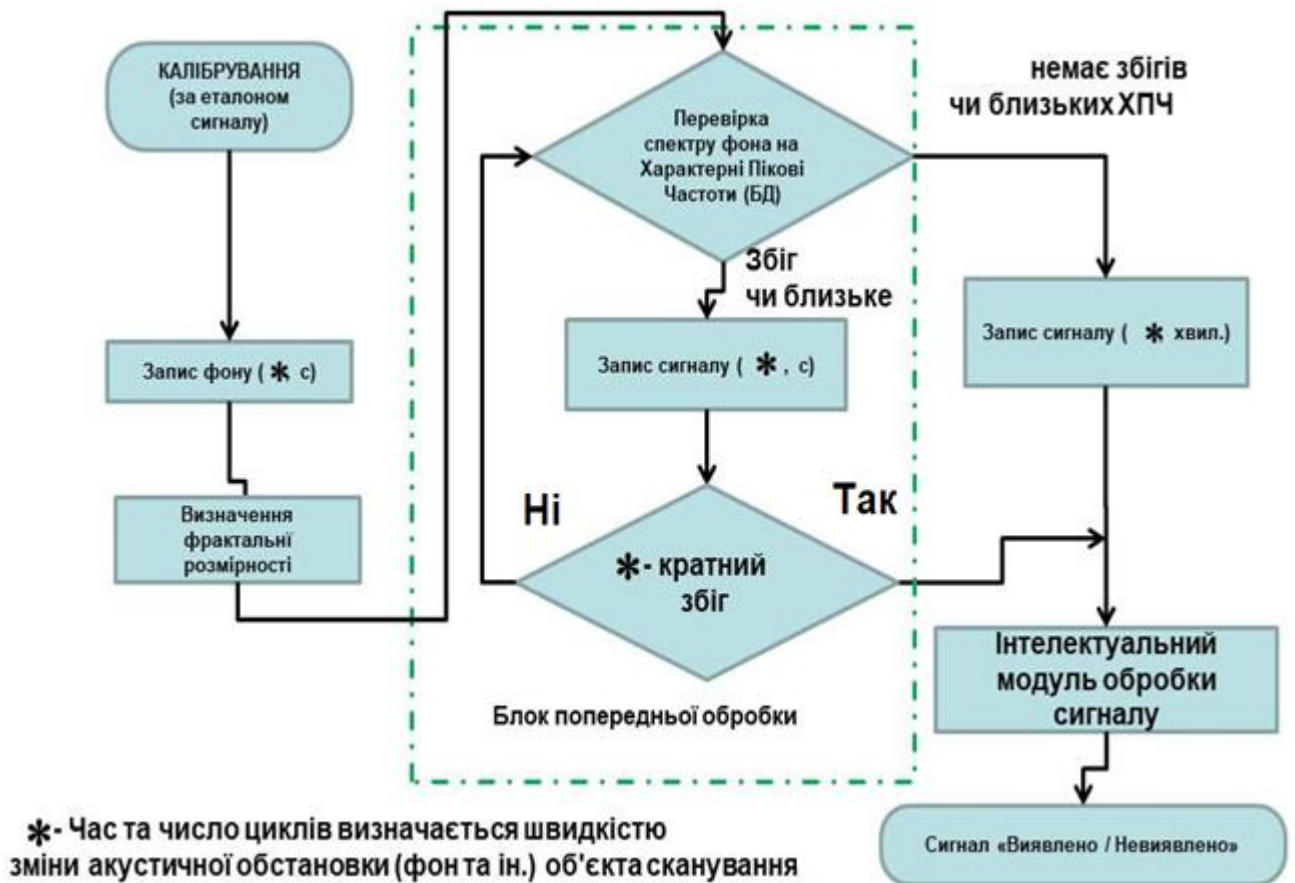


Рис. 2.5 – Алгоритм обробки спектра акустичних випромінювань із зони горіння

Алгоритм включає модуль перевірки працездатності системи виявлення осередку загоряння по еталонному сигналу і модуль запису фонового сигналу в середовищі, де проводиться детектування, з урахуванням особливостей частотно-амплітудних характеристик фону; модуль попередньої обробки сигналу; модуль запису корисного сигналу, його обробки та передачі інформації на виконання та прийняття рішення.

2.2. Фрактальний аналіз часових рядів акустичного сигналу зони горіння

Далеко не всі процеси, особливо природні явища, можна описати аналітично: диференціальними рівняннями, традиційними методами теорії ймовірностей і математичної статистики. Відомо, що процес фазового перетворення, як правило, являє собою еволюцію складних самоподібних структур. Опис таких процесів дає поняття фрактала в одній із перших робіт американського гідролога Херста [26], яке широко застосовується в різних галузях науки та в методах прогнозу поведінки систем як прикладний інструмент.

Аналіз фрактальних і мультифрактальних властивостей часових рядів є одним із перспективних інструментів для врахування поведінки системи як на даний момент, так і її передісторії, а фрактальна розмірність є показником складності процесу, за величиною якої можна передбачати поведінку системи [27].

Одним із основних інструментів вивчення фрактальних об'єктів є хвилі різної природи, у тому числі акустичні [28]. Хвильові процеси, пов'язані з фрактальними структурами умовно можна поділити на два класи: поширення хвиль у фрактальних структурах, коли фрактал – середовище поширення та випромінювання хвиль фрактальними структурами та поширення їх у однорідному середовищі.

Основна властивість фракталів – дробова розмірність на відміну від звичної одно-дво-та тривимірної розмірності. Аналіз часового ряду сигналу АЕ дозволяє оцінити кількість незалежних змінних, необхідних для повного опису поведінки системи або свого роду кількість ступенів свободи досліджуваної системи, через

показник фрактальної розмірності D , який є основною кількісною оцінкою фракталу, введеною Хаусдорфом для компактної множини у довільному метричному просторі.

$$D = \lim \frac{\ln(Ne)}{\ln(1/e)},$$

де N_e – мінімальна кількість фігурок лінійного розміру e , що повністю заповнюють вимірюваний об'єкт.

Фрактальний аналіз часових рядів допомагає виявити та охарактеризувати фрактальні особливості поведінки явища у разі неможливості опису його аналітично; визначає ступінь стохастичності процесу, здатного функціонувати на всіх рівнях: амплітудному, частотному, фазовому, поляризаційному, тому якнайкраще підходить для обробки акустичних сигналів [29].

Частотний діапазон акустичних випромінювань хімічних реакцій виходить за межі області частотних діапазонів, притаманних для виробничих приміщень і приміщень із перебуванням людей [30]. Отже, при детектуванні сигналу можна виділити характеристичний для осередку загоряння спектр звукових хвиль, що випромінюються, на тлі загального звукового випромінювання.

Фрактальний аналіз часових рядів понад усе добре вирішує завдання ідентифікації та прогнозування щодо природних процесів. Для аналізу процесу використовується «живий» аналоговий сигнал, що надходить із зони випромінювання. Дослідження прогнозування завдань хімічної кінетики горіння стосовно динаміки розвитку процесу (характеристики, інтенсифікація, згасання) на цьому етапі не розглядалися.

Ідентифікація палаючого продукту можлива при встановленні якісного або кількісного взаємозв'язку між зареєстрованими акустичними хвилями і характеристиками продукту, і такий зв'язок встановлюється за допомогою фрактального аналізу отриманих часових рядів акустичних сигналів у процесі горіння матеріалів.

Дослідження показали, що під час горіння матеріал або речовина випромінює індивідуальні, властиві тільки йому акустичні спектри.

Під час експерименту досліджувалась і аналізувалась можливість розпізнавання типу зразків палаючих речовин і, крім того, міра подібності між зразками одного класу, тобто між результатами експериментів, що стосуються однієї й тієї ж речовини.

Для визначення параметрів випромінювань при горінні та ідентифікації речовини за акустичним сигналом проведемо фрактальний аналіз кожного зареєстрованого часового ряду відповідно до алгоритму [31, 32]. Показник Херста – H , який визначає фрактальні властивості ряду, обчислюється методом нормованого розмаху або фрактального R/S аналізу, що не містить вимог до форми розподілу, що лежить в основі [31]

$$(R/S)_n = c \cdot n^H,$$

де R – відстань, на яку переміщується система за період часу, що задається (кількість відліків n), а S – стандартне відхилення.

$$\lg(R/S)_n = \lg(c) + H \lg(n),$$

Визначення показника Херста H проводиться простою лінійною апроксимацією виразу

$$H = \lg(R/S) / \lg(n) - C,$$

де константа $C = \lg(c) / \lg(n)$.

Тангенс кута нахилу апроксимуючої прямої і є оцінка показника Херста, а відрізок, що відсікається нею по осі ординат – константа C .

Кількість точок апроксимації для кожного досліджуваного зразка визначалося шляхом послідовного розподілу відліків всього часового ряду на кількість суміжних ділянок A таким чином, щоб з наступним розподілом кількість відліків n у кожній

ділянці збільшувалася, досягаючи після завершення процедури розподілу величини $n = (N-1)/2$, де N – довжина ряду.

Для кожної ділянки довжини n із сукупності A :

– визначалося математичне очікування (середнє значення)

$$x_a^{cp} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n x_{ia}; \quad a=1, \dots, A;$$

– формувався часовий ряд накопичення відхилень

$$X_{ka} = \sum_{i=1}^k (x_{ia} - x_a^{cp}); \quad k=1, \dots, n;$$

– визначався скоригований розмах

$$R_a = \max_{1 \leq k \leq n} (x_{ka}) - \min_{1 \leq k \leq n} (x_{ka});$$

– стандартне відхилення

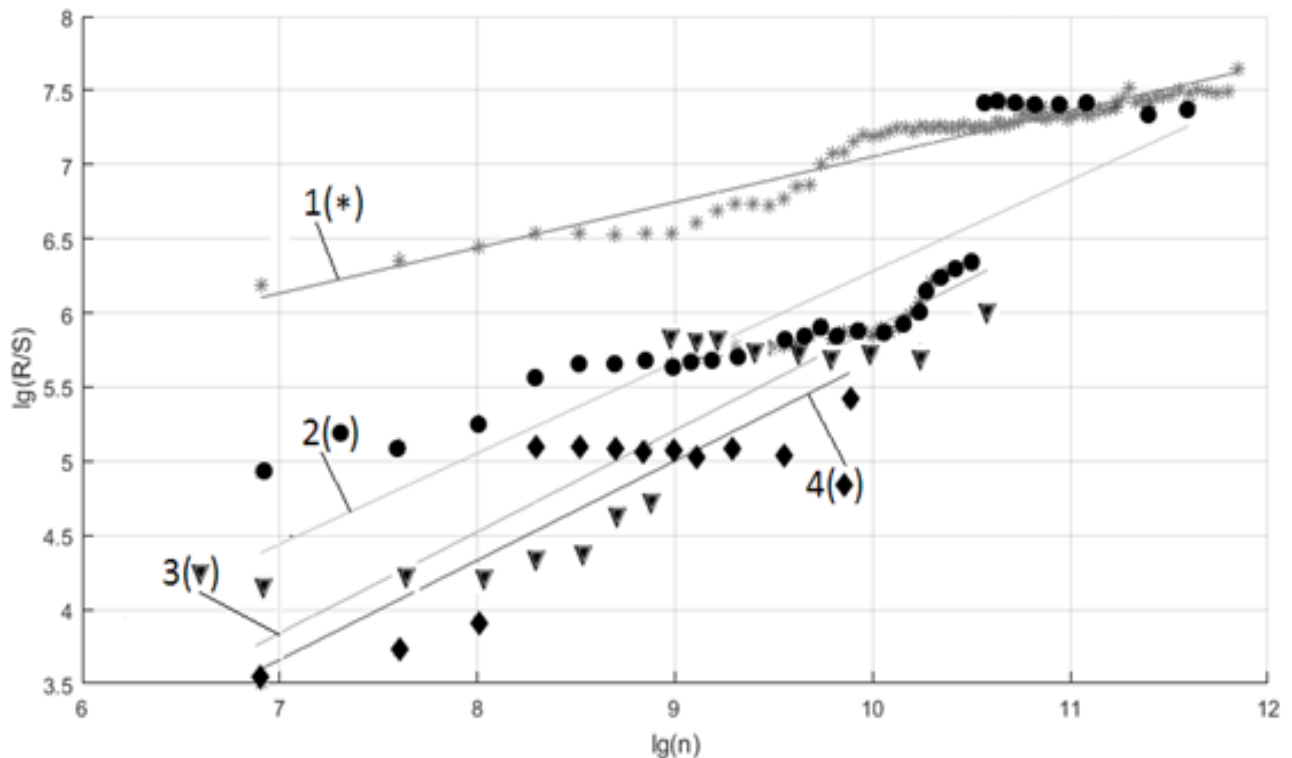
$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ia} - (x_a^{cp})^2)};$$

– і нарешті, середнє значення нормованого розмаху для першого розбиття на ділянок A довжиною n

$$(R/S)_n = 1/A \cdot \sum_{a=1}^A (R_a/S_a).$$

Розрахункова процедура повторювалася методом найменших квадратів, формуючи дані для апроксимації залежності показника Херста.

На показник Херста суттєво впливає величина часового проміжку між значеннями вибірки акустичного сигналу. На рисунку 2.6 показано, як змінюється показник H для значень часового ряду, що характеризують горіння метанолу при різних значеннях інтервалу між сусідніми відліками вибірки: ступінь точності апроксимуючої показник Херста прямий збільшується зі зменшенням часового проміжку.



$$1(*) - \tau = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ мкс}; 2(\bullet) - \tau = 11,0 \cdot 10^{-5} \text{ мкс};$$

$$3(\blacktriangledown) - \tau = 55,0 \cdot 10^{-5} \text{ мкс}; 4(\blacklozenge) - \tau = 110,0 \cdot 10^{-5} \text{ мкс}$$

Рис. 2.6 – Вплив на показник Херста величини часового проміжку між значеннями вибірки звукового сигналу під час горіння метанолу

У всіх розрахунках використана величина $\tau = 22$ мкс, яка регламентована апаратними можливостями реєструючого пристрою.

Показник Херста досліджуваних часових рядів H знаходиться в межах $0 < H < 1$. Значення $0 < H < 0,5$ характеризує систему, що змінюється, при значенні $0,5 < H < 1$ система більш стійка [17].

Фрактальна розмірність (D) з показником Херста пов'язана співвідношенням

$D = 2 - H$, яке справедливе, коли структура фрактальної функції досліджується з високим розрішенням [33]. Переходячи до фрактальної розмірності, маємо $1 < D < 2$, тобто розмірність хаотичності часових рядів, що реєструються при згорянні целюлозо-містких речовин, лежить між кривою ($D = 1$) і площиною ($D = 2$).

В одному ряду знаходяться деревина й папір ($0,3 < H < 0,32$), в іншому – звукоізолюючий наповнювач і картон ($0,16 < H < 0,27$). Показник Херста залежить від будови молекул палаючої речовини, від особливостей кристалічної решітки, різного ступеня стійкості до термодеструкції при підвищенні температури. Близькість показників у деревини й паперу пов'язана з масовою часткою вмісту в них целюлози. Молекули природних лінійних полімерів (целюлоза) з елементарних ланок (мономерів), які, з'єднуючись в довгі ланцюги, багаторазово повторюються. Іншими особливостями характеризується горіння рідких речовин.

Деякі результати R/S аналізу часових рядів (апроксимуючі залежності показника Херста) при горінні спиртів, ацетону, нафти та нафтових продуктів, целюлозомістких матеріалів представлені на рисунках 2.7 – 2.9.

Підсумовуючи наведені результати досліджень зазначимо, що зразки рідинних речовин техногенного навантаження можна поділити на дві групи. Перша – це спирти ($0.271 < H < 0.38$), друга – нафтопродукти: бензин, дизельне паливо і парафін ($0.32 < H < 0.45$). Із загальної картини виділяються сира нафта ($0.52 < H < 0.61$), і ацетон (кетон) ($0.67 < H < 0.71$). Нафта складається в основному з ациклічних, парафінових, циклічних граничних і ароматичних вуглеводнів, в процесі переробки нафти з'являється ряд інших більш легких вуглеводневих фракцій. Тому горіння нафтових фракцій (бензин, дизельне паливо) і парафіну, здатного самозайматися в стані кипіння, коли відбувається його інтенсивне випаровування, супроводжується схожими акустичними випромінюваннями й відповідно близькими значеннями показника Херста.

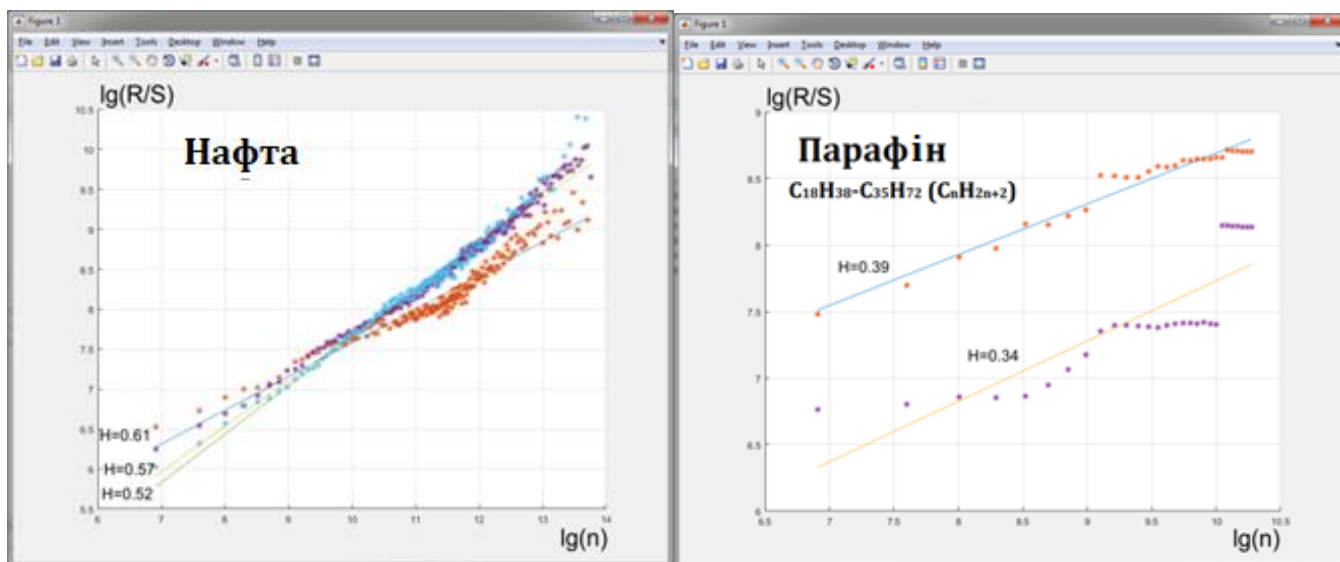
Результати R/S аналізу часових рядів при горінні в осередку деревини, звукоізолюючого наповнювача, картону й паперу представлені на рисунках нижче. Показник Херста досліджуваних часових рядів знаходиться в межах $0 < H < 0,5$, що характеризується нестійким процесом поширення небезпеки у початковий період.

При потраплянні показника в діапазон $0,5 < H < 1$ процес поширення небезпеки набуває стійкого розвитку. Деревина, папір, бавовна, – всі вони містять целюлозу в різних пропорціях. Поєднання й перестановка декількох типів мономерів в довгих полімерних ланцюгах забезпечує побудову безлічі варіантів і визначає різні властивості полімерів, що спричиняє різницю між деревиною й звукоізолюючим наповнювачем. Крім того, матеріали природного походження, зазвичай, мають пористу структуру й їм притаманне тліюче горіння вуглецевого залишку при досить низькій температурі (250 – 300 °C).

Фрактальна розмірність D часового ряду дозволяє визначити його властивості, пов'язані з хаотичністю, випадковістю й регулярністю, що може бути використано для ідентифікації сигналу акустичної емісії. Аналіз R/S часових рядів показав, що у разі значення $H = 0,5$ – процес є випадковим, при $0 < H < 0,5$, досліджуваний процес є антиперсистентним, при $0,5 < H < 1$, процес є персистентним. І тільки при $1 < H < 2$ процес набуває динамічного характеру.

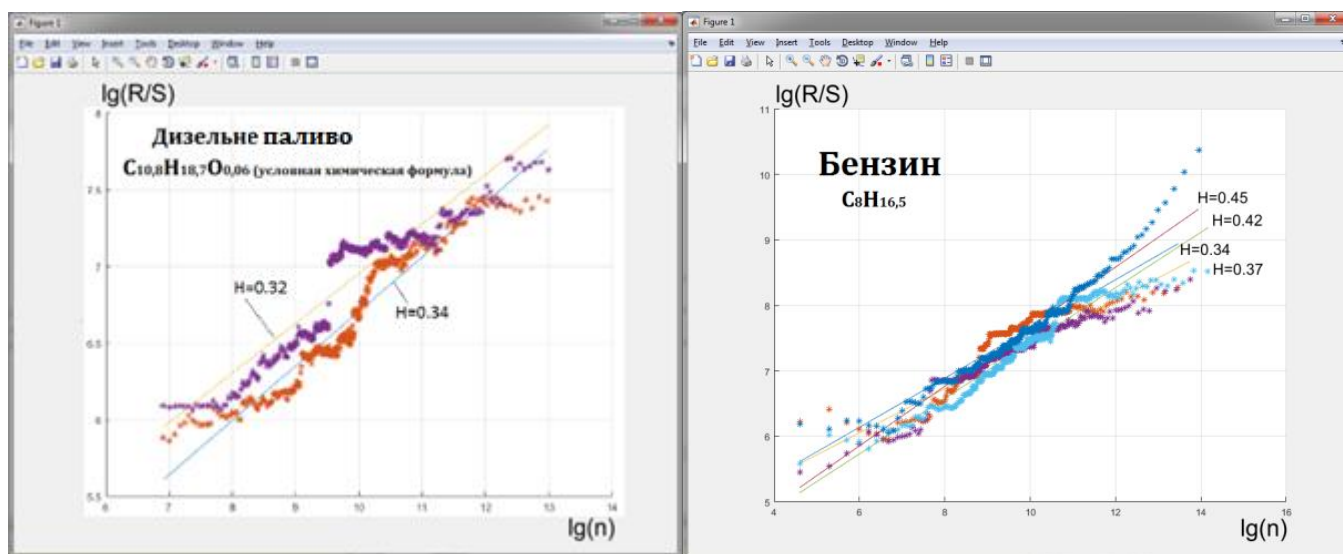
Розрахунок дрібної розмірності сигналу, яка отримана в даному випадку, як сукупність фону й акустичної емісії відповідного процесу деструкції компонент техногенного навантаження в осередку горіння, для зразків дерева, паперу, звукоізолюючого наповнювача, бинта й картону наведені на рис. 2.10. А на рис. 2.11 наведено динаміку зміни фрактальної розмірності $D(t)$ для 4 видів зразків. При детальному аналізі, звертає на себе увагу важливий факт суттєвої близькості показників для зразків як-то деревини й пресованого картону, що є основними матеріалами пакування при зберіганні вибухонебезпечних предметів.

Показник Херста залежить від будови молекул палаючої речовини, вмісту в ньому різного виду вуглеводнів, гідроксильних та карбонільних груп і від особливостей вмісту кожної горючої суміші, від особливостей структури кристалічної решітки, різного ступеня стійкості до термодеструкції при підвищенні температури.



а)

б)



в)

г)

Рис. 2.7 – Результати R/S аналізу часових рядів, отриманих у процесі горіння нафти та нафтопродуктів: а – сира нафта; б – парафін; в – дизельне паливо; г – бензин

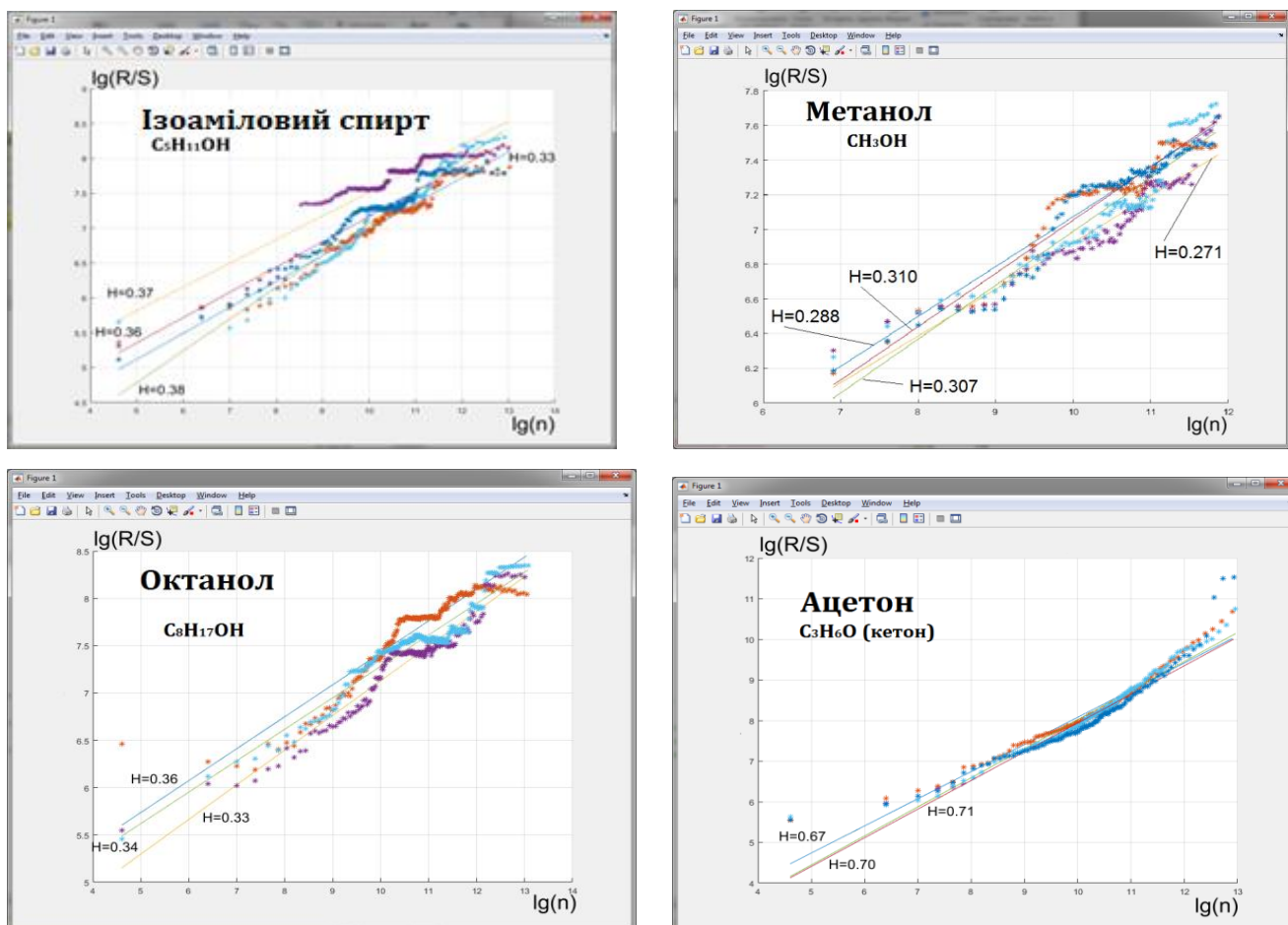


Рис..2.8 – Результати R/S аналізу часових рядів, отриманих у процесі горіння спиртів та ацетону: а – ізоаміловий спирт; б - метанол; в – октанол; г) – ацетон

Горіння рідин характеризується двома взаємопов'язаними явищами – випаровуванням і згорянням пароповітряної суміші над поверхнею рідини. Крім того, у разі розгляду рідких легкозаймистих речовин показник залежить від вмісту різного виду вуглеводнів, гідроксильних та карбонільних груп та від особливостей утворення кожної горючої суміші, яке, головним чином, пов'язане з випаровуванням речовини. Нафта складається в основному з ациклічних, парафінових, циклічних граничних та ароматичних вуглеводнів, у процесі переробки нафти з'являється ряд інших легших вуглеводневих фракцій. Тому горіння нафтових фракцій (бензин, дизельне паливо) та парафіну, здатного самозайматися у стані кипіння, коли йде його інтенсивне випаровування, супроводжується схожими акустичними випромінюваннями та відповідно близькими значеннями показника Херста.

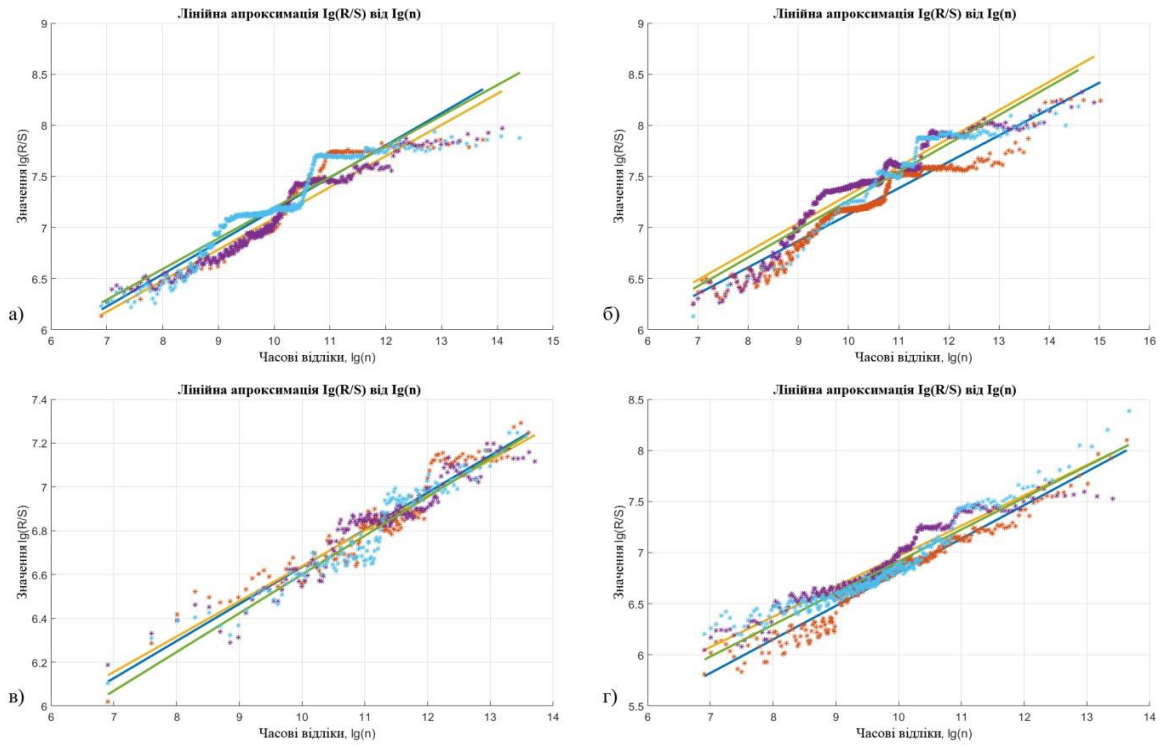


Рис. 2.9. Результати R/S аналізу часових рядів, отриманих в процесі горіння матеріалів: а) – папір, б) – картон, в) – звукоізолюючий наповнювач, д) – деревина.

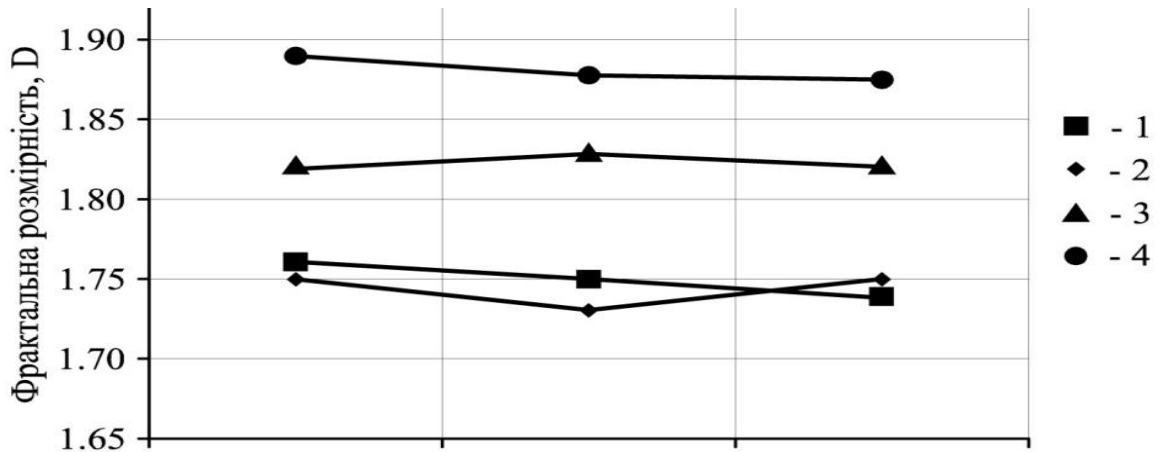


Рис.2.10. Значення фрактальної розмірності випробовуваних зразків для різних компонент (1– бинт, 2 – картон, 3– звукоізолюючий наповнювач, 4– деревина)

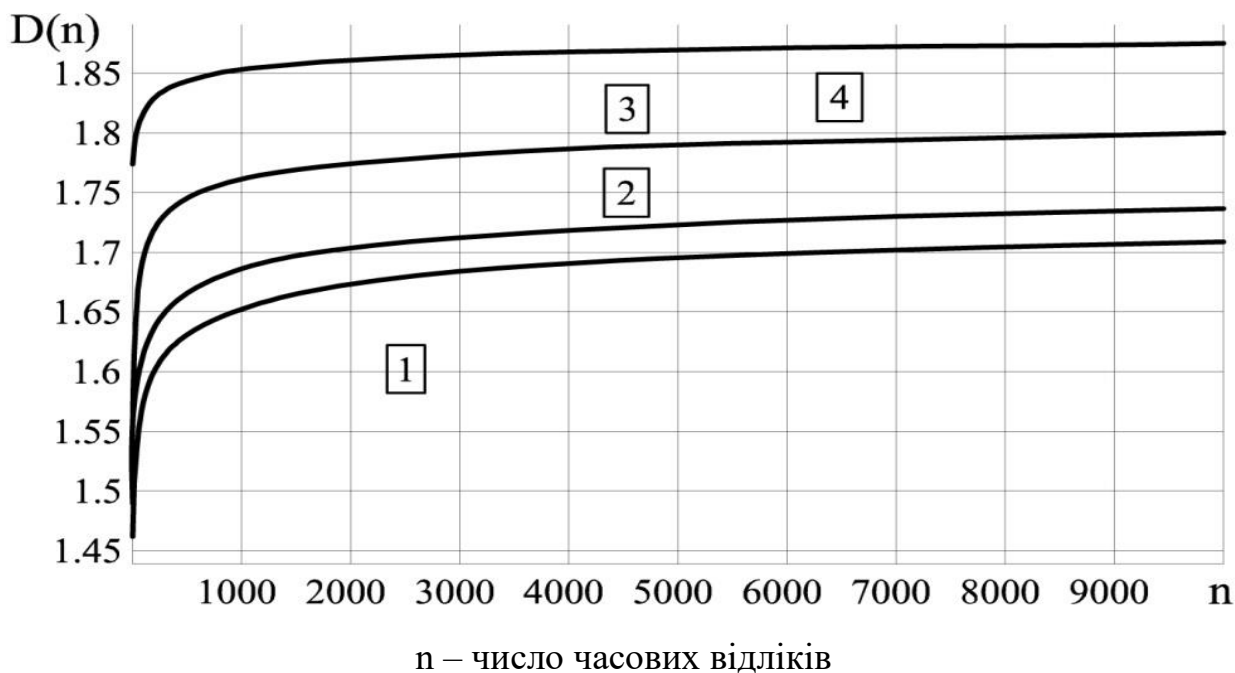


Рис. 2.11. Осереднені за числом експериментів значення фрактальної розмірності $D(n)$ випробовуваних зразків для різних компонент осередку горіння (1– бинт, 2– картон, 3– звукоізолюючий наповнювач, 4 – деревина)

Більшість твердих горючих матеріалів відноситься до класу органічних речовин, що складаються в основному з вуглецю, водню, кисню та азоту. До складу багатьох органічних речовин може входити хлор, фтор, кремній та інші хімічні елементи. Більшість складових твердих матеріалів є горючими.

Целюлозні матеріали, крім вуглецю та водню, містять кисень (до 40-46%), який бере участь у горінні так само, як і кисень повітря. Тому целюлозним матеріалам необхідно значно менший обсяг повітря для горіння, ніж для речовин, до складу яких кисень не входить. Для них є характерною низька теплота горіння і схильність до тління. Деревина при нагріванні розкладається з утворенням горючих парів, газів і вуглецевого залишку.

Розпізнавання природи речовини і навіть її виду у разі надходження сигналу про займання здійснюється спеціальними апаратними засобами, які розробляються для конкретного сховища, складу та відрізняються простим налаштуванням програми мікроконтролера відповідно до виду продукції, що зберігається.

Головним підсумком експериментальних досліджень розпізнавання (ідентифікації) природи речовини і навіть її виду стало отримання сукупності акустичної інформації про горіння різних речовин, що дозволяє сформувати базу еталонних даних (база еталонів небезпек) акустичних образів (Ω) небезпечного техногенного навантаження різного типу і показати принципову можливість ідентифікації матеріалу, а також прогнозувати розвиток процесу горіння.

Отримана база даних з еталонними властивостями акустичних образів кожного окремого горючого матеріалу може бути доповнена проведенням експериментальних досліджень для отримання необхідних акустичних образів, у тому числі для спеціальних, нетипових потенційно небезпечних об'єктів.

Процес АЕ проявляється відразу – під час спалаху (сплеск) і після - при полум'яному горінні до повного вигорання речовини техногенного навантаження. За параметрами АЕ можна виділити кілька етапів, які відчутно залежать від геометрії та обсягу компонент, що потрапляють в осередок пожежі. Рівень середньоквадратичного значення амплітуди АЕ поступово і монотонно зростає, але є циклічним і нерівномірним.

Варто відзначити, що залежність числа характерних частот спектру АЕ від числа атомів вуглецю молекули палаючої речовини також підтверджується аналогічною залежністю значення фрактальної розмірності і числа атомів вуглецю (рис. 2.12). Було з'ясовано, що число характерних частот АЧХ звукового сигналу з осередку горіння також залежить від числа атомів вуглецю у молекулярному складі речовини [34] (рис. 2.13). В аналогічній чіткій залежності знаходиться і характер спалаху та спектру АЕ цієї речовини (рис. 2.14).

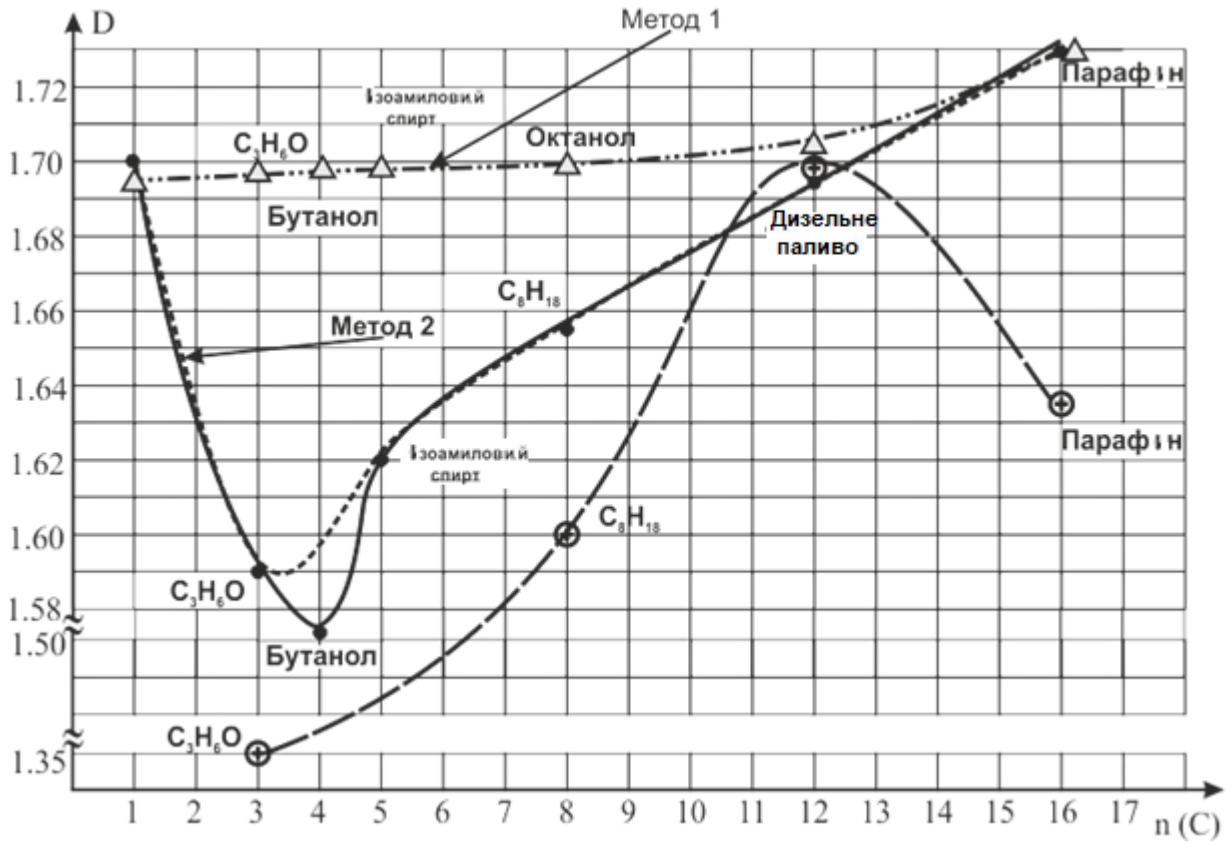


Рис. 2.12. Залежність фрактальної розмірності акустичного образу горіння від числа атомів вуглецю в складі молекули речовини

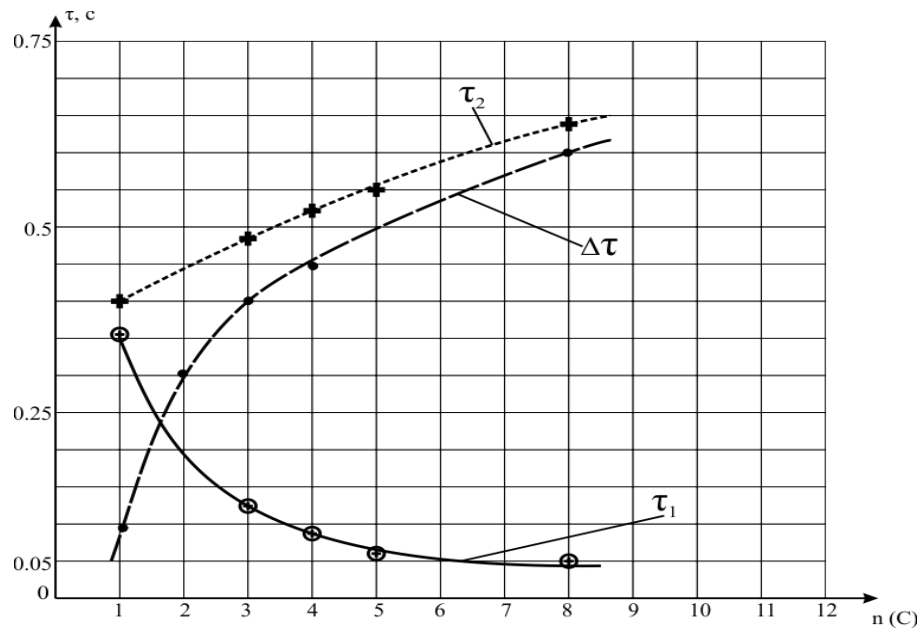


Рис. 2.13. Залежність параметрів спалаху речовини від числа атомів вуглецю в складі її молекули.

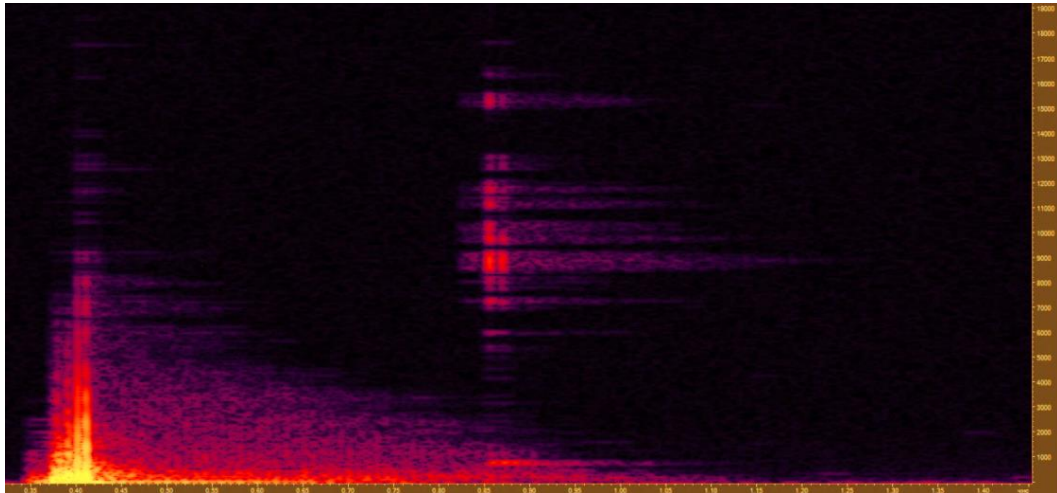


Рис. 2.14. Характер спалаху та спектру АЕ компонент горіння

2.2.1. Оцінка похибки результатів експериментальних вимірювань та порівняння їх з результатами імітаційного моделювання R/S аналізу акустичних випромінювань зони горіння. Аналіз часового ряду сигналу АЕ, в рамках зазначеного підходу, дозволяє оцінити число незалежних змінних, необхідних для повного опису поведінки системи або свого роду кількість ступенів свободи досліджуваної системи, через показники Херста (H) та фрактальної розмірності (D). Показник Херста – непряма величина, отримана з допомогою вимірювання прямих незалежних величин. Перевіримо достовірність отриманих результатів з використанням фрактального аналізу за даними проведених експериментів за схемою перевірки достовірності непрямих вимірювань. Результати R/S аналізу часових рядів при горінні досліджуваних речовин і матеріалів наведені в табл. 2.1. та табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Розрахункові значення показника Херста для звукового сигналу із зони горіння рідких легкозаймистих речовин

№	Назва компонент техногенного навантаження								
	показник Херста	Метанол	Ізоаміл. Спирт	Октанол	Ацетон	Сира нафта	Бензин	Дизельне паливе	Парафін
1	H ₁	0,271	0,33	0,34	0,71	0,61	0,45	0,32	0,39
2	H ₂	0,307	0,36	0,36	0,67	0,57	0,34	0,34	0,34
3	H ₃	0,288	0,38	0,33	0,70	0,52	0,42	0,35	0,314
4	H ₄	0,310	0,37	0,35	0,68	0,58	0,37	0,33	0,327
5	H ₅	0,28	0,34	0,34	0,69	0,56	0,410	0,34	0,364
6	H ₆	0,3	0,347	0,36	0,71	0,55	0,405	0,335	0,381
7	H ₇	0,305	0,379	0,36	0,69	0,60	0,378	0,329	0,372
8	H ₈	0,289	0,35	0,36	0,68	0,61	0,415	0,347	0,36
9	H ₉	0,31	0,369	0,34	0,69	0,58	0,427	0,329	0,354
10	H ₁₀	0,29	0,38	0,35	0,71	0,57	0,430	0,33	0,388
\bar{H}_l	–	0,295	0,3605	0,349	0,693	0,575	0,399	0,335	0,359
$\pm t_{\gamma,s}/\sqrt{n}$	–	0,01	0,0128	0,008	0,010	0,020	0,023	0,007	0,018
Дов. інтервал	Л	0,2691	0,3257	0,3276	0,666	0,5218	0,3407	0,3167	0,3100
	П	0,320	0,3939	0,3694	0,7194	0,6270	0,4586	0,3521	0,4066

Таблиця 2.2 – Розрахункові значення показника Херста для звукового сигналу із зони горіння целюлозомістких речовин

Номер	Показник Херста	Деревина	Вата	Картон	Папір
1	H ₁	0.32849	0.1694	0.2582	0.3152
2	H ₂	0.29671	0.1612	0.2791	0.3048
3	H ₃	0.31064	0.1631	0.2769	0.3002
4	H ₄	0,31021	0,1682	0,2705	0,3101
5	H ₅	0,3024	0,1690	0,2604	0,3081
6	H ₆	0,2975	0,17	0,2784	0,3171
7	H ₇	0,3101	0,1687	0,2769	0,2998

Таблиця 2.2 (продовження)

Номер	Показник Херста	Деревина	Вата	Картон	Папір
8	H_8	0,32051	0,171	0,2714	0,3141
9	H_9	0,2998	0,1642	0,2699	0,3119
10	H_{10}	0,3129	0,1698	0,2703	0,3148
\bar{H}_t	–	0,3096	0,1675	0,2714	0,3096
$\pm t_{\gamma} s/\sqrt{n}$	–	0,00714	0,00245	0,00518	0,00446
дов. інтервал	Л	0,291062	0,161124	0,25793	0,298013
	П	0,328491	0,173314	0,283773	0,320888

Для усіх наведених груп експериментів маємо нормальний закон розподілу результатів. Будемо вважати, що у разі застосування процедури ідентифікації виявлення горіння результати для твердих та рідинних речовин повинні із заданою (0,95) вірогідністю знаходитися в довірчому інтервалі, що підтверджується гістограмами, побудованими за результатами експерименту.

Гістограми результатів розподілу показника Херста часових рядів звукового сигналу при горінні легкозаймистих та целюлозо-місткої речовин представлені на рис. 2.15, 2.16.

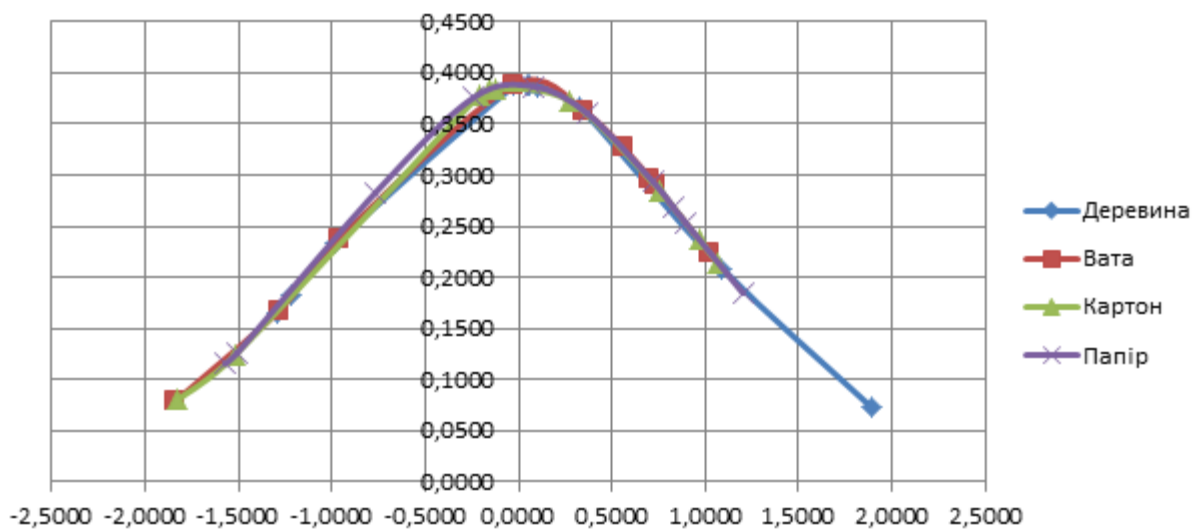


Рис. 2.15. Гістограма результатів розподілу показника Херста часових рядів звукового сигналу при горінні целюлозо-місткої речовини

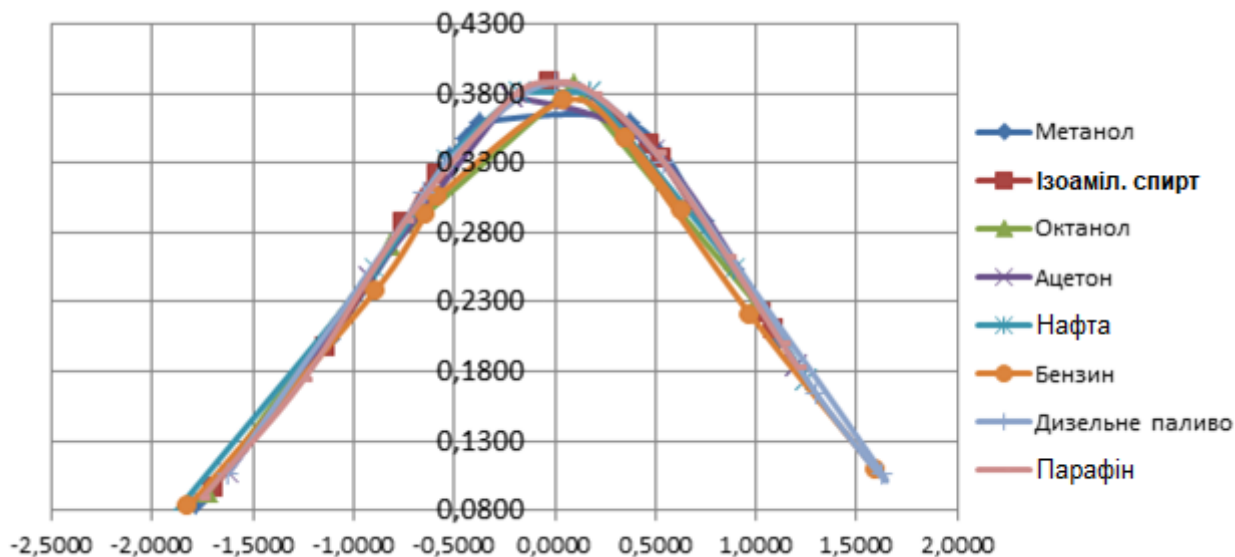


Рис. 2.16. Гістограма результатів розподілу показника Херста часових рядів звукового сигналу при горінні легкозаймистих речовин

Достовірність та надійність результатів застосування наведеної процедури акустичного методу раннього виявлення джерела загорання підтверджується ідентичністю результатів натурних експериментів з результатами імітаційних, укладанням в довірчі інтервали, які розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стьюдента.

2.3. Спектральний аналіз акустичних випромінювань осередку горіння. Енергетичний критерій факту загорання

Спектральний аналіз – один із методів обробки сигналів, що дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу, а перетворення Фур'є є математичною основою, яка пов'язує тимчасовий або просторовий сигнал з його поданням у частотній області.

Реєстрований звуковий безперервний сигнал з осередку горіння являє собою набір дискретних значень n із заданим часовим інтервалом Δt , тобто $t_n = n\Delta t$, $n = 0 \dots N - 1$. Для нього можливо записати дискретне перетворення Фур'є, яке є

комплексною величиною, та отримати для подальшої обробки та аналізу акустичний спектр сигналу (акустичний образ):

$$X_k = X(f_k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-2\pi kn/N} \quad (2.1)$$

З дійсною та уявною частинами:

$$\operatorname{Re} X_k = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) \cos(2\pi kn/N),$$

$$\operatorname{Im} X_k = -\Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) \sin(2\pi kn/N).$$

Функція $X(f_k)$ – це спектр функції $x(t_n)$, або Фур'є – образ неперіодичного сигналу.

Коливальний процес в системі горіння супроводжується дисипацією енергії у формі виділення тепла (піроліз, тління, полум'я).

Загальна енергія енергетичного сигналу $x(t)$ в інтервалі $(-\infty, \infty)$ описується рівнянням:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt, 0 < E_x < \infty, \quad (2.2)$$

Енергія сигналу, виражена в часовій області, пов'язана з енергією сигналу, яка виражена в частотній області виразом:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df, \quad (2.3)$$

де $X(f)$ – Фур'є-образ неперіодичного сигналу;

$x(t)$ – існуючий сигнал;

$I X(f)$ I – парна функція частоти;

$I X(f) I^2$ – спектральна щільність сигналу.

Рівняння для E_x показує, що енергія сигналу дорівнює площі під виразом для миттєвої амплітуди:

$$\Psi_x(f) = I X(f) I^2. \quad (2.4)$$

Загальну енергію сигналу в цьому випадку можна записати у вигляді

$$E_x = 2 \int_0^{\infty} \Psi_x(f) df. \quad (2.5)$$

У разі забезпечення не змінювання фазової функції при множенні сигналу на довільний постійний множник, маючи за мету виділення амплітудної обвідної і фазової функції для довільного сигналу, слід застосовувати перетворення Гілберта. Додаткові відомості про властивості досліджуваних горючих речовин у процесі горіння отримуємо за допомогою традиційного спектрального аналізу, попередньо здійснивши фільтрацію отриманих спектрів акустичних сигналів, що надходять із зони горіння. На приклад на рис. 2. представлений вид акустичного спектру деревини до та після фільтрації сигналу.

Оскільки АЧХ представляє хвильовий процес в кожний момент часу (часовий відлік – n) являє собою відображення $A_n(f)$, де A – амплітуда, а f – частота, то шляхом математичних перетворень можна знайти її екстремуми й відповідні їм частоти, що характеризують акустичний спектр горіння. Кількість таких екстремумів – K_{ex} на відповідних частотах, характеризує індивідуальний спектр кожного горючого матеріалу. У загальному випадку вигляд отриманих залежностей для процесу горіння представлений на рис. 2.18 та рис. 2.19.

У ході експерименту було встановлено, що кожен досліджуваний матеріал при горінні випромінює сигнал, амплітудно-частотна характеристика якого має тільки

для нього характерні значення пікових амплітуд, а їх кількість для всіх матеріалів дорівнює або більше чотирьох ($Kex_{min} \geq 4$).

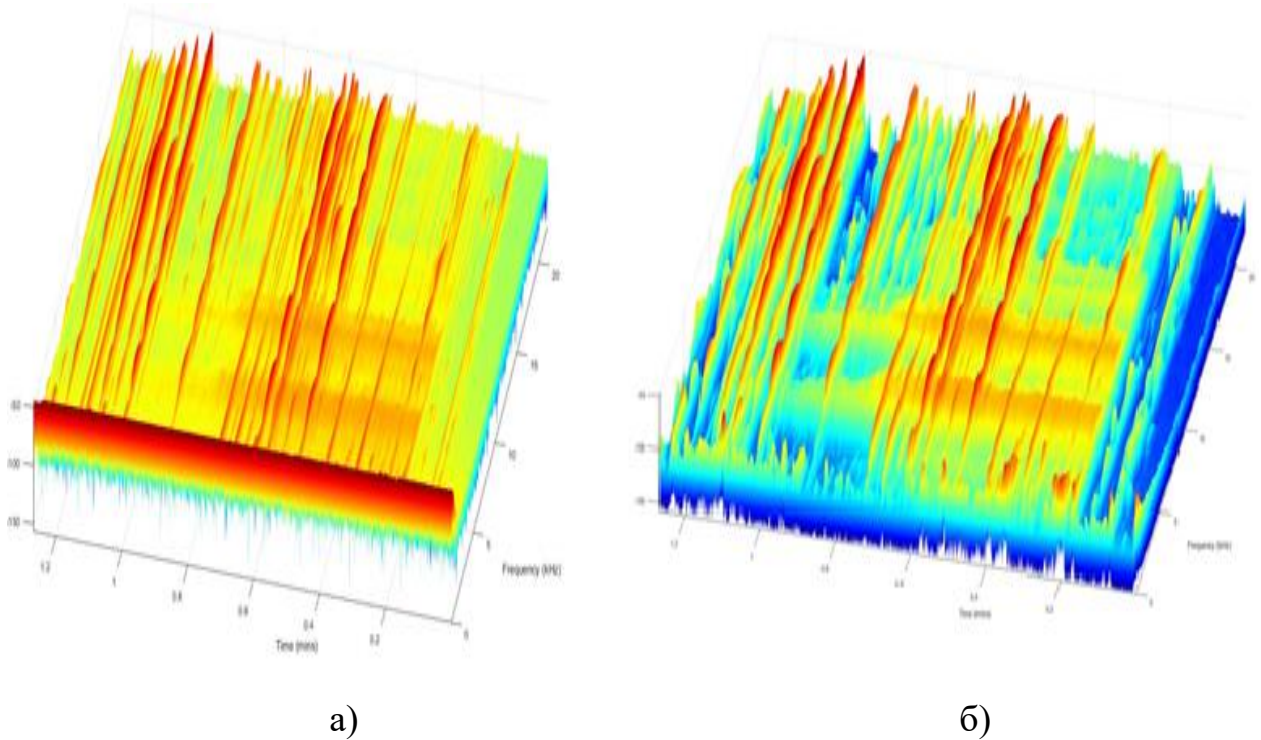


Рис. 2.17. Акустичні спектри термодеструкції зразка деревини до (а) і після (б) фільтрації від фонових перешкод

Таким чином кількість екстремумів (рис. 2.20) може стати додатковим фактором при ототожненні властивостей вимірюваних з осередку загоряння та еталонних акустичних образів. Встановлені частоти спектра фіксують факт спалаху, тобто момент, коли настає максимальна термічна деструкція матеріалу.

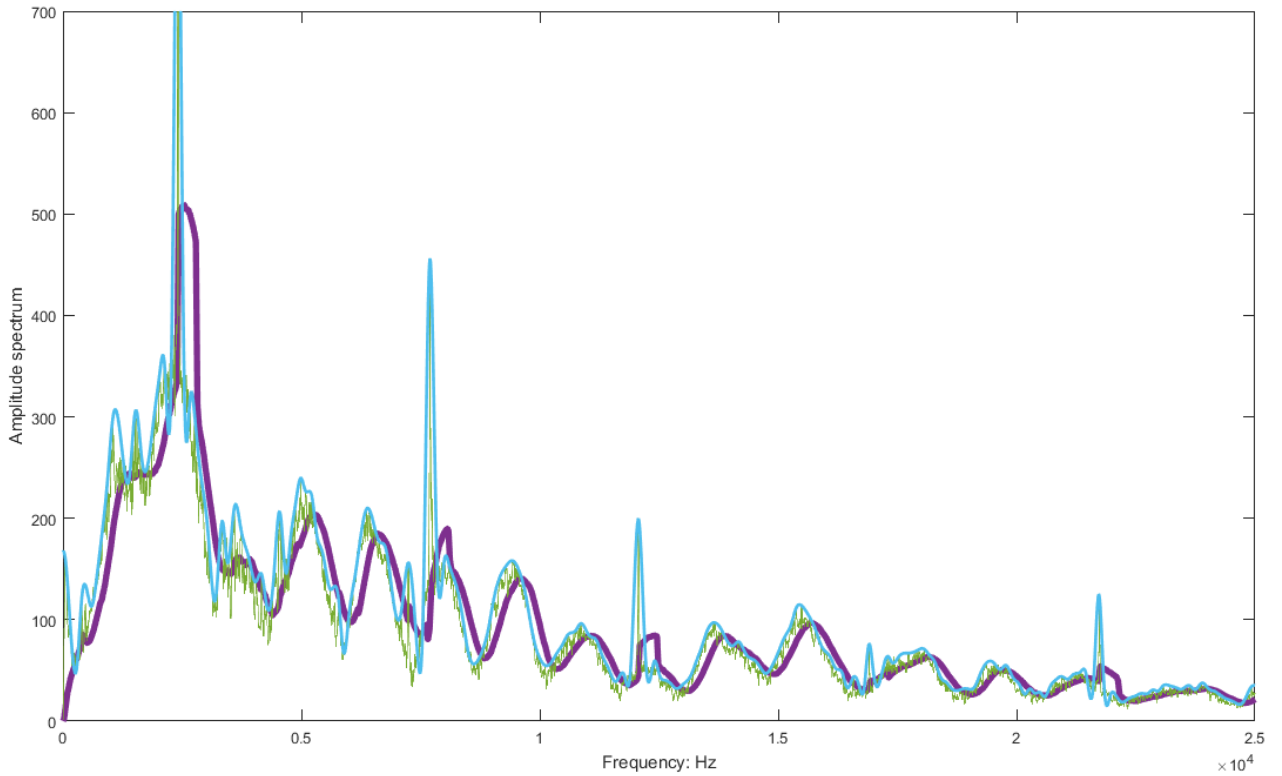


Рис.2.18. Формування екстремумів АЧХ процесу акустичної емісії в осередку поширення горіння

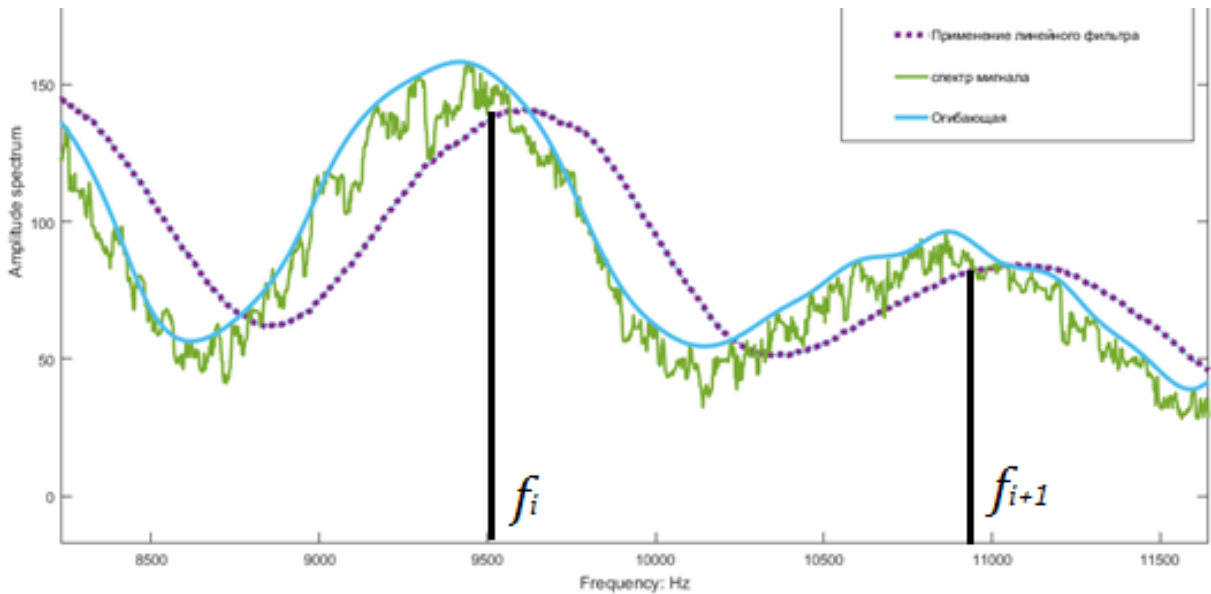


Рис.2.19. Характер обвідної процесу акустичної емісії в осередку поширення горіння метанолу

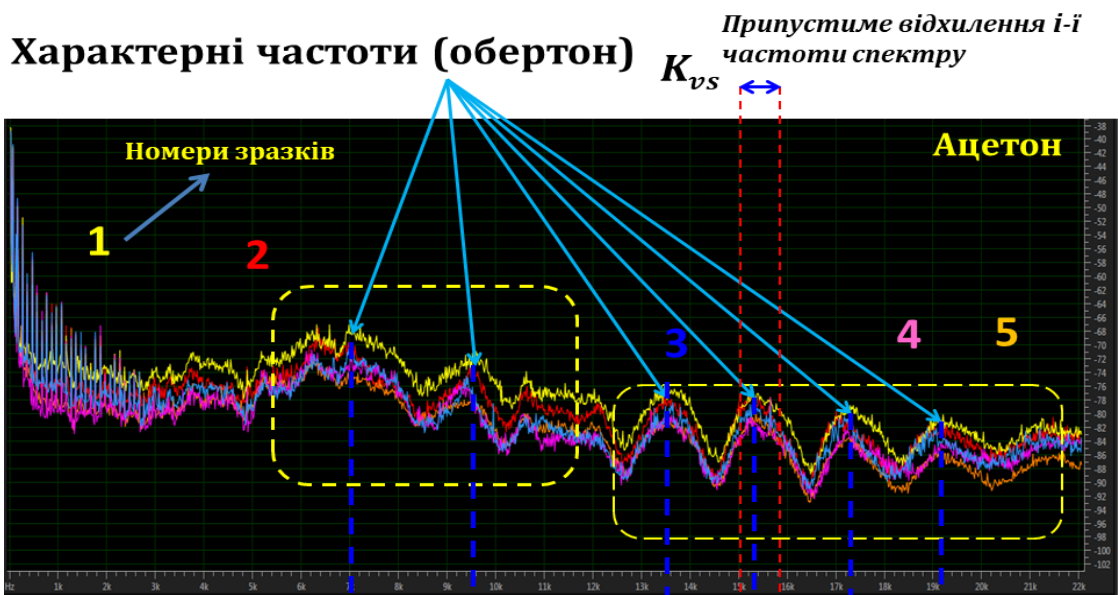


Рис. 2.20 Характерні частоти сигналу АЕ при горінні ацетону

На підставі цього можна зробити припущення, що при виділенні зі спектру АЕ чотирьох (i більше) характерних частот, процес акустичного випромінювання ідентифікується як «**НЕБЕЗПЕКА**» (А). Далі було встановлено: для рідких горючих матеріалів $K_{ex_{min}} \geq 8$, для твердих – $K_{ex_{min}} = 4$.

Тепер можна зробити висновок, що існує мінімальне значення $K_{ex_{min}}$, при якому дозволено стверджувати з високою вірогідністю, що виявлений процес горіння елемента дійсно загорівся та збігається з еталоном небезпеки.

Назвемо виявлений ефект кількості екстремумів *енергетичним критерієм* або фактом загорання та доповнимо базу даних індивідуальних властивостей горючих матеріалів значеннями $K_{ex_{min}}$ для досліджуваних горючих матеріалів.

Згідно з методикою проведення експерименту для всіх досліджуваних зразків були зафіксовані характерні частоти. На рис 2.21 Наведено їх значення для деяких зразків.

Речовина	№ Зразка	Характерні частоти, кГц													
		f1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
Деревина	1	0,1	2,1	4,1	8,5	11,9	20,01								
	2	0,12	2,9	5,2	9,2	12,4	20,8								
	3	0,16	3,7	6,2	9,9	14,1	21,3								
Звукоізолюючий наповнювач	1	0,005	0,51	6,4	9,4	21,7									
	2	0,02	2,2	6,7	11,1	21,4									
	3	0,09	4,1	7,3	11,7	21,9									
Картон	1	0,45	2,1	5,5	9,4	22,1									
	2	0,51	3,2	6,1	9,9	23,4									
	3	0,55	4,1	6,8	10,3	24,1									
Битт	1	0,005	0,81	4,5	6,5	10,5									
	2	0,12	1,1	5,1	6,9	10,9									
	3	0,14	1,1	5,5	7,1	11,5									
Ацетон· (кетон)	1	6,91	9,3	13,4	15,3	16,9	18,7	20,8							
	2	7,1	9,6	13,5	15,4	17,3	19,1	21,1							
	3	7,2	9,7	13,7	15,6	17,5	19,2	21,4							
Ізопропил (спирт)	1	5,9	7,9	10,9	13,5	15,4	17,4	19,8	21,95						
	2	6,1	8,01	11,1	13,5	15,6	17,5	19,9	22,0						
	3	6,2	8,1	11,2	13,6	15,6	17,7	20,0	22,1						
Бензин	1	1,01	2,9	3,8	4,9	5,9	9,0	10,4	12,3	14,0	15,9				
	2	1,1	3,0	3,9	4,9	6,0	9,1	10,5	12,5	14,1	16,0				
	3	1,12	3,1	4,1	5,2	6,2	9,3	10,7	12,6	14,3	16,2				
Дизельне паливо	1	0,19	0,8	1,9	2,9	5,2	5,8	7,6	8,9	10,7	13,0	15,4			
	2	0,23	1,1	2,11	3,1	5,2	6,1	7,75	8,9	10,9	13,1	15,5			
	3	0,25	1,1	2,2	3,1	5,4	6,2	7,9	9,0	10,9	13,1	15,6			
Парафин (рідка фаза)	1	0,2	1,2	2,8	3,7	4,9	5,3	7,7	8,92	10,9	12,4	13,9	15,3	17,8	19,1
	2	0,23	1,3	2,9	3,7	5,1	5,6	7,9	9,1	11,1	12,6	14,1	15,4	17,9	19,2
	3	0,19	1,35	3,0	3,95	5,2	5,6	8,0	9,3	11,3	12,9	14,1	15,6	17,9	19,4

Рис. 2.21 Зведена таблиця характерних частот спектра акустичних випромінювань із зони горіння деяких матеріалів

Обробка отриманих спектрів в єдиних координатах P_{min}/P_a (відносна амплітуда сигналу від частоти сигналу) довела задовільну збіжність характерних пікових значень амплітуд досліджуваних целюлозо-місцких зразків в різних діапазонах частот від 5 Гц до 25 кГц. Результати порівняльного аналізу показані на рис. 2.22.

На рис. 2.23 – 2.24 наведена інтегральна гістограма розподілу пікових амплітуд спектрів акустичної емісії при термодеструкції наведених горючих матеріалів.

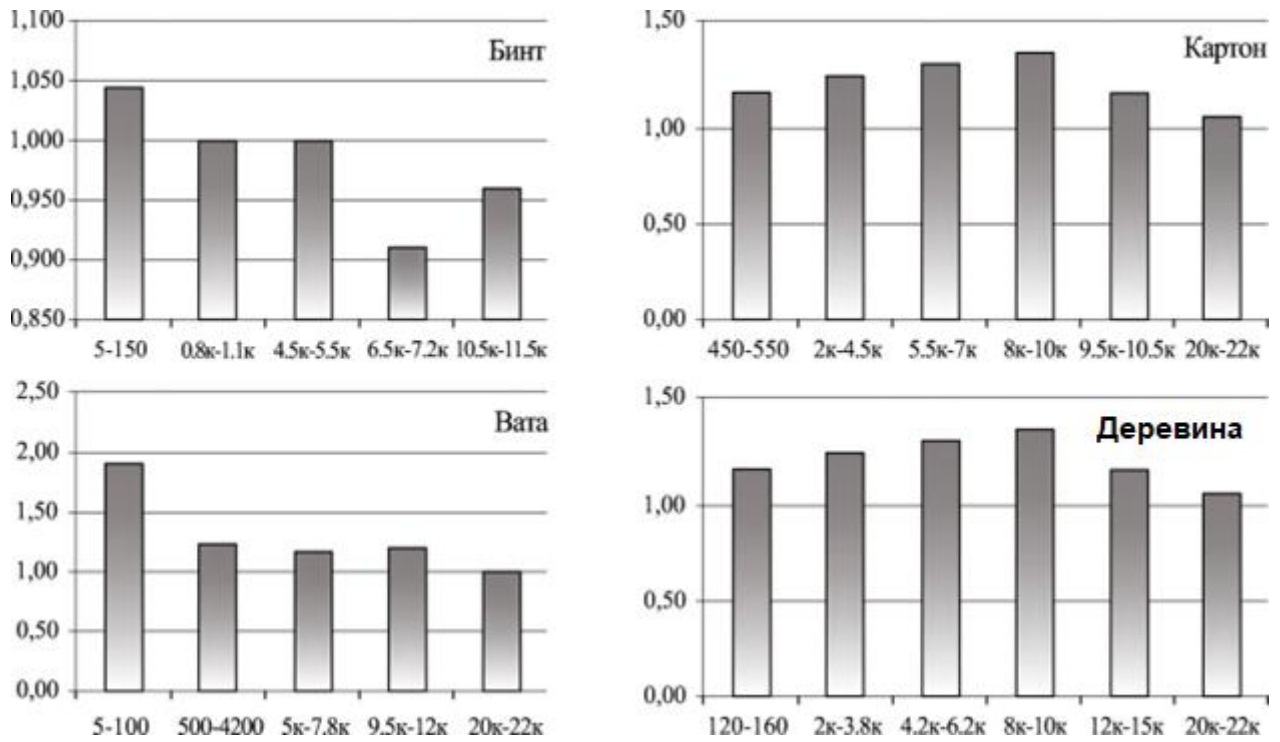


Рис. 2.22. Розподіл характерних пікових відносних амплітуд частотного спектра акустичних образів для різних компонент

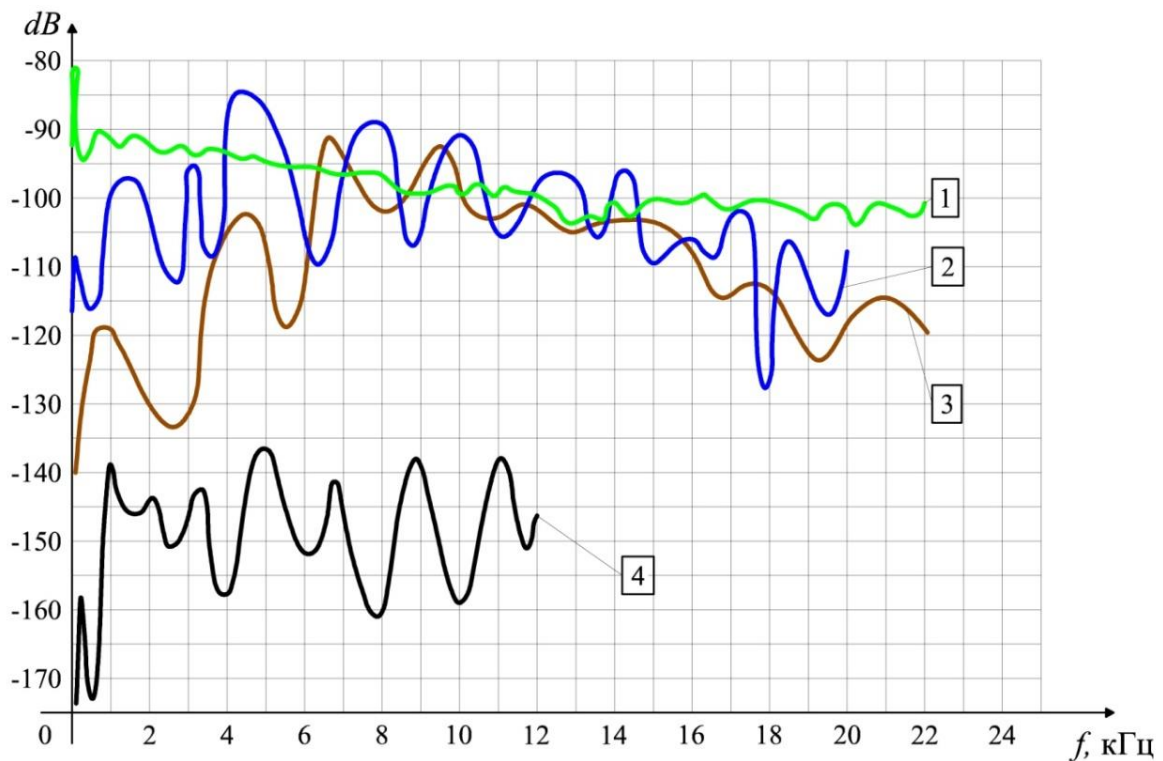


Рис. 2.23. Амплітудно-частотні характеристики спектрів акустичних образів для різних компонент осередку горіння (1 – звукоізолюючий наповнювач, 2 – деревина, 3 – картон, 4 – бинт)

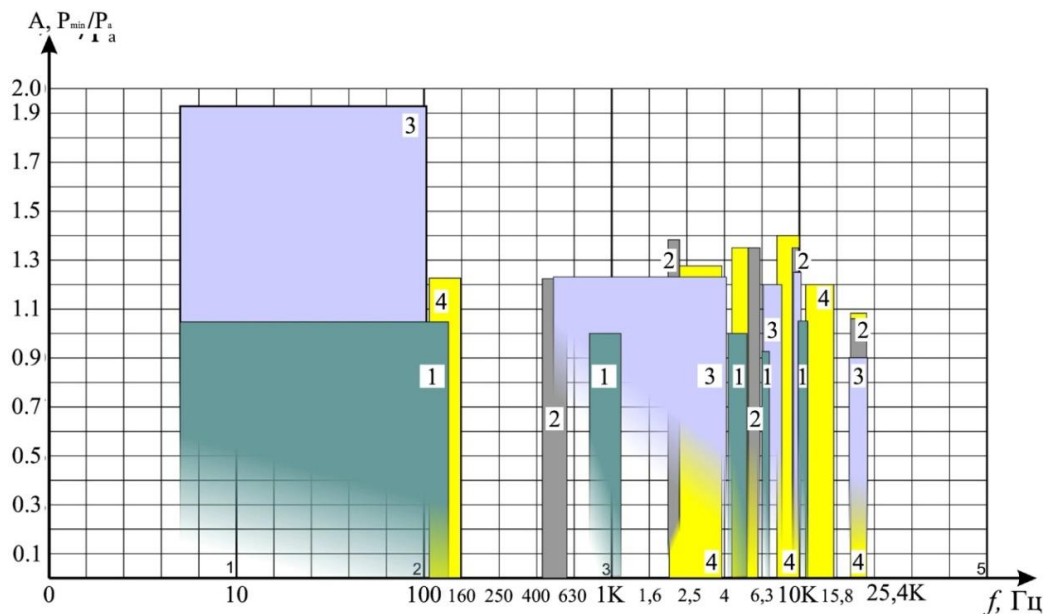


Рис. 2.24. Інтегральний розподіл характерних пікових відносних амплітуд спектрів акустичних образів для різних компонент осередку горіння в діапазоні частот 5 Гц – 20,4 кГц, (1 – бинт, 2 – картон, 3 – звукоізолюючий наповнювач, 4 – деревина)

Процес термодеструкції характеризується великою щільністю максимальних амплітуд в областях частот від 5 до 200 Гц та від 400 Гц до 25 кГц. Втім, максимальна відповідність амплітуд найбільш характерна для діапазону частот (450 – 2500) Гц та (10 – 11) кГц.

Результати досліджень показують, що процес деструкції целюлозо-містких матеріалів характеризується наявністю спектрів акустичної емісії в низькочастотному діапазоні від 0 до 800 Гц, в середньому від 1000 до 6000 Гц і в високочастотному діапазоні від 10 до 25,4 кГц.

Розбіжність для деяких діапазонів частот може бути пояснена різним вмістом целюлози в зразках (наприклад, для картону), а також специфікою самого процесу високотемпературного окислення, який істотно залежить від інших компонент матеріалу й структури досліджуваних зразків.

Слід зазначити, що частотний діапазон вимірюваного акустичного сигналу, який реєструється з зони горіння, лежить в області голосового частотного діапазону, що надає можливість застосувати у подальшому підхід, заснований на алгоритмах

MFCC (метод кепстральних коефіцієнтів за шкалою MEL–а або Berk–а) для ідентифікації спектрів, як і при розпізнаванні мови. Таким чином, сформована методика проведення натурних експериментів, із застосуванням розроблених раніше лабораторних установок, дозволяє провести необхідну кількість досліджень, які всебічно охоплюють можливі варіативні комбінації техногенного навантаження, як всередині, так і зовні потенційно-небезпечних об'єктів, та представити їх результати у вигляді амплітудно-частотних акустичних спектрограм миттєвих спектрів осередків поширення небезпеки надзвичайних ситуацій унаслідок пожежі.

2.3.1. Оцінка похибки результатів експериментальних вимірювань та порівняння їх з результатами моделювання спектрального аналізу акустичних випромінювань зони горіння. Для встановлення факту максимальної термодеструкції речовини введемо коефіцієнт допустимого відхилення значення частоти на екстремумі АЧХ K_{VS} , значення якого знаходяться в діапазоні від 400 до 600 Гц відповідно до виразу

$$K_{ex} = \{A'_s(f_i) = 0 | \text{sign}[A'_s(f_i)] > 0\},$$

де $A_s(f)$ – функція обвідної;

f_i – коріння рівняння $A'_s(f_i) = 0$ при яких спостерігаються максимуми ($\text{sign}(A_s(f_i)) > 0$) функції $A_s(f)$.

При виконанні з однаковою ретельністю й в однакових умовах повторних спостережень однієї й тієї ж постійної величини отримують результати, що відрізняються один від одного. Це свідчить про наявність в них випадкових похибок. Кожна така похибка виникає внаслідок одночасного впливу на результат спостереження багатьох випадкових збурень і сама є випадковою величиною. Припустимо, що систематичні похибки в результатах спостережень відсутні або виключені, та розглянемо групу з N незалежних результатів спостережень

випадкової величини X — значень кількості пикових амплитуд (K_{ex}), що підкоряється нормальному розподілу σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

Методика статистичної обробки результатів вимірювання з багаторазовими спостереженнями відповідно до критерію Стьюдента [35] повинна враховувати, що результати спостережень можуть містити систематичну похибку, а в групі спостережень x_i можуть зустрічатися грубі похибки, при цьому розподіл випадкових похибок може відрізнятись від нормального. Перевіримо графічно гіпотезу про те, що результати експериментів належать до нормального розподілу згідно із заданою (0,95) вірогідністю знаходитися в довірчому інтервалі.

Дані першої та другої груп натурних експериментів для всіх досліджуваних зразків через великий обсяг не наводяться, (частина отриманих результатів наведена в зведеній рис. 2.21).

На рис. 2.25 – 2.26 по осі y наведена щільність ймовірності експериментальних значень кожної характерної частоти спектрів АЕ (деревина, ацетон), які попадають в умовний інтервал представлений по осі x . Для усіх наведених груп експериментів маємо нормальний закон розподілу результатів.

Реєстрація випромінювань осередку горіння, що знаходиться за межами об'єкта, що контролюється, накладає додаткові умови на перевірку достовірності чисельних розрахунків за результатами експерименту.

Однією з основних переваг методу АЕ є визначення координат осередку горіння шляхом побудови локаційної картини. Визначення координат можливе за допомогою часового і амплітудного параметрів. Амплітудна локація майже не використовується через великий вплив акустичного тракту і структури матеріалу на параметр амплітуди. При цьому значення амплітуди використовують в якості

допоміжної ознаки для підвищення достовірності результатів локації. Найбільшого поширення знайшли часові методики, в яких використовують параметр різниці часу надходження імпульсів АЕ, зареєстрованих парою перетворювачів АЕ.

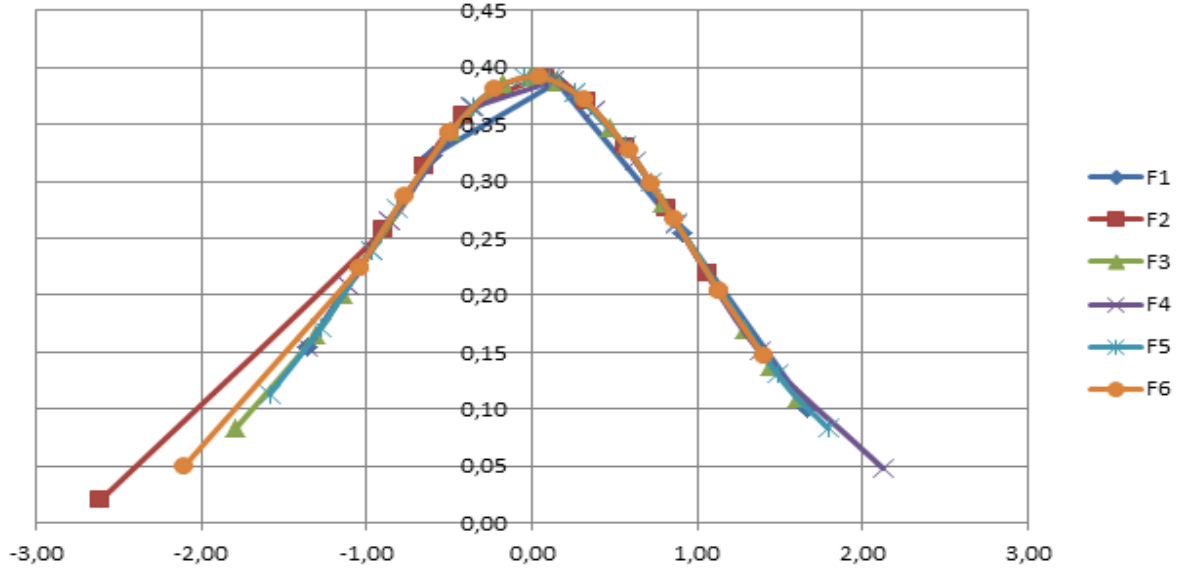


Рис. 2.25. Гістограма результатів розподілу характерних частот АЕ (деревина) в осередку горіння

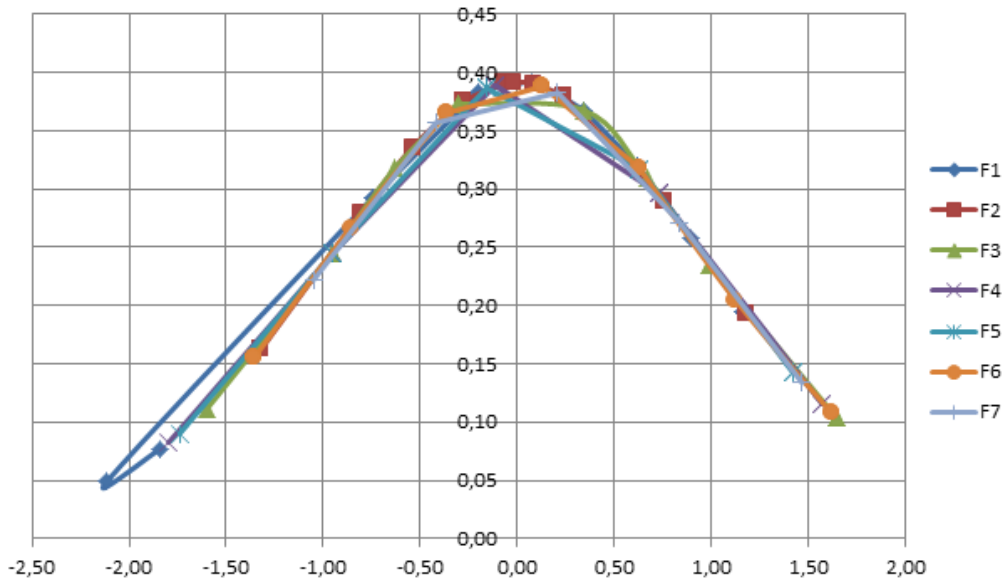


Рис. 2.26. Гістограма результатів розподілу характерних частот АЕ (ацетона) в осередку горіння

Залежно від геометричних розмірів об'єкту виконують побудову або лінійної (одновимірної), або планарної (двовимірної) локації. Якщо один з трьох лінійних розмірів значно перевищує два інших, то координати джерела АЕ в осередку НС визначаються за допомогою лінійної локації. В інших випадках завдання локації в основному є двовимірною. У найпростішому випадку побудова планарної локації здійснюється за допомогою трьох акустичних приймачів, як це наведено на рис. 2.27.

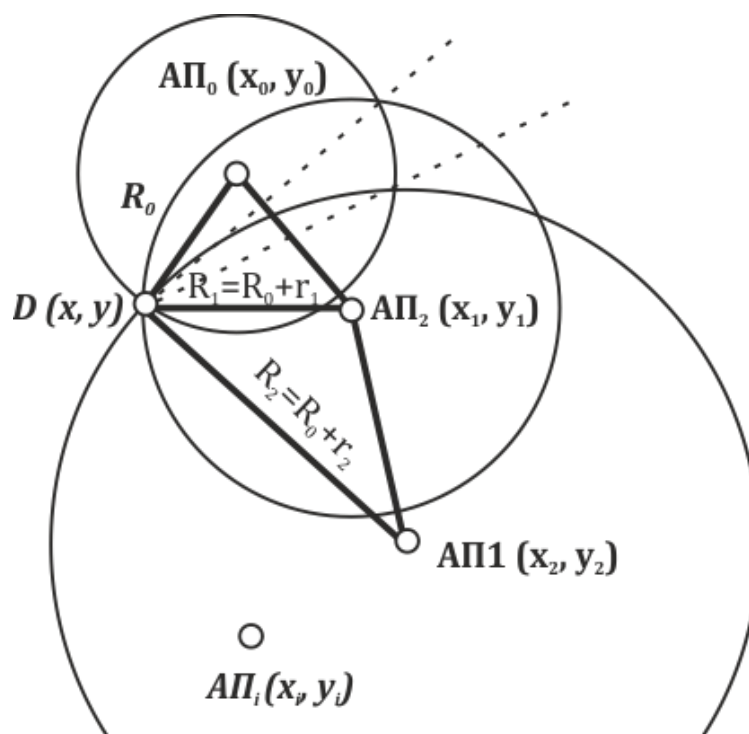


Рис. 2.27. Схема пеленгування джерела акустичного образу (точка D) в осередку поширення горіння

На рисунку наведено схему пеленгу джерела АЕ (точка D) в осередку поширення НС унаслідок пожежі за допомогою акустичних пристроїв (АП): $АП_0(x_0, y_0)$, $АП_1(x_1, y_1)$... $АП_i(x_i, y_i)$. За відомими координатами прийомних перетворювачів (x_i, y_i) , швидкості поширення акустичних сигналів (c) і часу реєстрації імпульсу АЕ (t_i) розраховуються координати джерела в осередку НС (x, y):

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = (R_0 - r_i)^2,$$

де $r_i = c(t_i - t_0) = c\tau_i$;

τ_i – часова затримка надходження сигналу на $АП_i$.

Невідомими є три величини – R_0 , x та y . Отже, для визначення координат джерела АЕ необхідно не менше трьох АП.

При побудові локаційної картини в рамках контролю реальних акустичних подій виникає безліч чинників. Одним з них є анізотропія акустичних властивостей. Для усунення впливу зазначеного чинника застосовується підхід з підвищення ефективності, заснований на часі реєстрації імпульсу АЕ, та параметру швидкості, як функції від відстані та часу.

Відповідним подальшим вдосконаленням є побудова не тільки лінійної й планарної, а й об'ємної локації, що реалізується залученням до лабораторної установки п'яти акустичних пристроїв. Це дозволяє визначати місце розташування джерела АЕ в осередку горіння.

Актуальним залишається питання оцінки достовірності отриманих результатів. При обробці даних необхідно враховувати низку чинників, що впливають на значення стандартних параметрів АЕ. Як-то максимальну амплітуду імпульсу АЕ, що залежить не тільки від пройденої відстані, але й від частотних характеристик, геометрії об'єкту, властивостей палаючого матеріалу й речовини. При поширенні акустичної хвилі необхідно брати до уваги також властивість дисперсії, тобто залежність швидкості від частоти. З відстанню широкосмуговий акустичний сигнал (хвильовий пакет) «розпадається» на кілька хвильових цугів, що так само призводить до зниження максимальної амплітуди імпульсу. При цьому, чим менше площа осередку пожежі, тим більшою мірою виражена властивість дисперсії.

У свою чергу точність побудови геометрії пеленгу залежить від двох параметрів – 1) часу реєстрації імпульсу АЕ, 2) швидкості поширення акустичного сигналу. Похибка побудови геометрії пеленга безпосередньо пов'язана з крутизною переднього фронту характерних акустичних сигналів. Чим більше значення цього параметра (довший час наростання до піку), тим відповідно, більшою є похибка локації. Також на ефективність результатів побудови локації впливає значення швидкості поширення хвильового пакета.

Наявність анізотропії призводить до появи залежності між швидкістю і напрямком поширення сигналу АЕ.

Виходячи з перерахованих вище чинників, що знижують ефективність методу, необхідно введення додаткових ймовірнісних параметрів. Необхідно зазначити, що оптимальний вибір порога й способу визначення початку імпульсу АЕ сприяє зниженню похибки при розрахунку координат джерела акустичних сигналів в осередку НС. Тому для підвищення точності локації джерел пропонується ймовірнісна оцінка визначення координат на основі теореми гіпотез:

$$P(t_i / A) = \frac{P(t_i) P(A / t_i)}{P(A)} = \frac{P(t_i) P(A / t_i)}{\sum_{i=1}^n P(t_i) P(A / t_i)}, \quad (2.6)$$

де $P(t_i)$ – ймовірність події, пов'язаної з моментом часу приходу сигналу на i – й приймач;

$P(t_i|A)$ – ймовірність моментів часу приходу сигналу на приймач в залежності від події A , якими є впливаючі параметри сигналу;

$P(A)$ – ймовірність того, що сталася подія A серед різних однотипних результатів реєстрації цього параметру;

$P(A|t_i)$ – ймовірність реєстрації події A в залежності від можливих спостережень часу приходу сигналу на приймач.

Експериментально отриманий розподіл максимальних амплітуд сигналів АЕ підтверджує той факт, що ймовірність визначення координати джерела в осередку НС ефективніша для сигналів з великою амплітудою. Цей факт слід використовувати при оцінці достовірності локації джерел АЕ в осередку НС за високої її інтенсивності. Зворотній зв'язок похибки простежується для часу наростання сигналів АЕ. Тому в ролі події A за формулою (2.6) можна використовувати як максимальну амплітуду, так і час наростання. Сумарна ймовірність заданого значення похибки визначення за часом приходу одного сигналу на приймачі визначається за виразом:

$$P(\sum t_i) = \prod P(t_i),$$

де права частина перемноження ймовірностей визначення часів приходу на кожен i -ий приймач. При цьому похибка визначення координат обчислюється за формулою

$$\delta_r = \frac{2 \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}}{(x + y)} \cdot 100\%,$$

де x_i та y_i – координати джерела, обчислені для i -го сигналу аналітичним шляхом з урахуванням часу приходу;

x_0 та y_0 – дійсні координати джерела АЕ;

x , y – розміри сторін антени.

Розрахувавши ймовірності для різних способів визначення часу приходу сигналів АЕ, можна виділити найбільш надійний з них для заданих параметрів, для різних областей сигналів.

В результаті, для поділу різних джерел АЕ від горіння техногенного навантаження в осередку НС можна використовувати параметр k_{sc} – коефіцієнт масштабу подій, який є відношенням числа локалізованих від джерела сигналів N до загальної кількості сигналів, що надійшли до найближчого від джерела приймача $N_{0\Sigma}$

$$k_{sc} = \frac{N_{\Sigma i}}{N_{0\Sigma i}}.$$

При виконанні експериментів отримані характерні значення частот досліджуваних зразків. Реєстрація сигналу АЕ з осередку НС проводилася на відкритій місцевості при $T = 26,2^\circ\text{C}$ і вологості 60 %. Відстань до джерела осередку загоряння (ємності зі зразком) складала відповідно від 10 см до 50 метрів. Відстань

від джерела впливає тільки на значення амплітуди і тому на характер АЧХ не здійснює істотного впливу.

При проведенні експериментів враховувалися сила та напрям вітру, довжина і енергія спектру, характерні сплески в спектрах АЕ.

Результати уточнюючих експериментів зовні об'єкту наведено у табл. 2.3 та табл. 2.4.

Таблиця 2.3.—Результати уточнюючих експериментів для дизельного палива зовні об'єкту

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц										
		f1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Дизельне паливо	1	0,19	0,8	1,9	2,9	5,2	5,8	7,6	8,8	9,9	12,8	15,1
	2	0,2	0,9	1,95	3	5,2	5,7	7,55	8,9	10,6	12,8	15,3
	3	0,23	1,1	2,1	3,1	5,3	6,1	7,75	8,9	10,7	12,9	15,5
	4	0,24	1,1	2,11	3,1	5,4	6,1	7,8	9	10,5	13,1	15,6
	5	0,25	1,3	2,2	3,3	5,5	6,3	8,1	9,2	10,7	13,4	15,9
\bar{f}_i	–	0,224	1,14	2,022	3,08	5,32	5,96	7,79	8,96	10,40	13,0	15,48
$\pm t_{\gamma s/\sqrt{n}}$	–	0,027	0,18	0,164	0,18	0,162	0,3	0,234	0,19	0,412	0,316	0,38
Д. інтервал	Л	0,95	2,68	3,58	4,54	5,69	8,66	10,21	11,88	13,75	15,76	0,95
	П	1,33	3,36	4,31	5,40	6,67	9,34	11,29	12,87	14,84	16,99	1,33

Таблиця 2.4. – Результати уточнюючих експериментів для бензину зовні об'єкту

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц									
		f1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Бензин	1	1,01	2,8	3,7	4,7	5,8	8,7	10,4	11,9	13,9	15,9
	2	1,1	2,9	3,8	4,8	6,1	9	10,5	12,5	14,1	16,2
	3	1,12	3	3,9	4,9	6,2	9,1	10,7	12,6	14,3	16,4
	4	1,2	3,1	4,1	5,1	6,3	9,1	11	12,7	14,5	16,7
	5	1,3	3,3	4,2	5,3	6,6	9,3	11,1	12,8	14,7	16,8
\bar{f}_i	–	1,15	3,02	3,94	4,96	6,2	9,04	10,7	12,5	14,3	16,4
$\pm t_{\gamma} s/\sqrt{n}$	–	0,13	0,24	0,26	0,3	0,36	0,27	0,38	0,44	0,39	0,46
Дов. інтервал	Л	0,95	2,68	3,58	4,54	5,69	8,66	10,21	11,88	13,75	15,76
	П	1,33	3,36	4,31	5,40	6,67	9,34	11,29	12,87	14,84	16,99

Перевіримо графічно гіпотезу про те, що результати експериментів належать до нормального розподілу, для цього побудуємо відповідні гістограми. На рис. 2.28 – 2.29 по осі y наведена щільність ймовірності значень кожної характерної частоти у спектрі АЕ, які потрапляють в умовний інтервал, представлений по осі x . Для першої групи експериментів та групи уточнених експериментів.

Для всіх наведених груп експериментів маємо нормальний закон розподілу результатів. Отже, у подальшому можливо вважати, що у разі застосування методу виявлення загоряння поза зоною об'єкта, який практично реалізований на базі лабораторної установки, результати для рідинних компонент техногенного навантаження повинні із заданою (0,95) вірогідністю знаходитися в довірчому інтервалі.

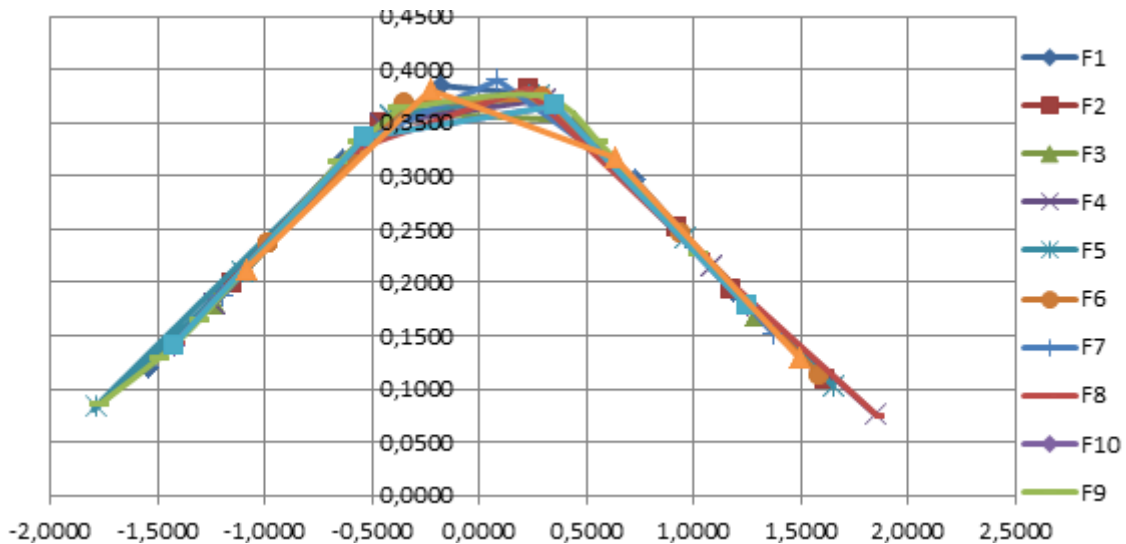


Рис. 2.28. Гістограма результатів розподілу характерних частот АЕ (дизельне пальне) в осередку горіння зовні об'єкту, перша група експериментів

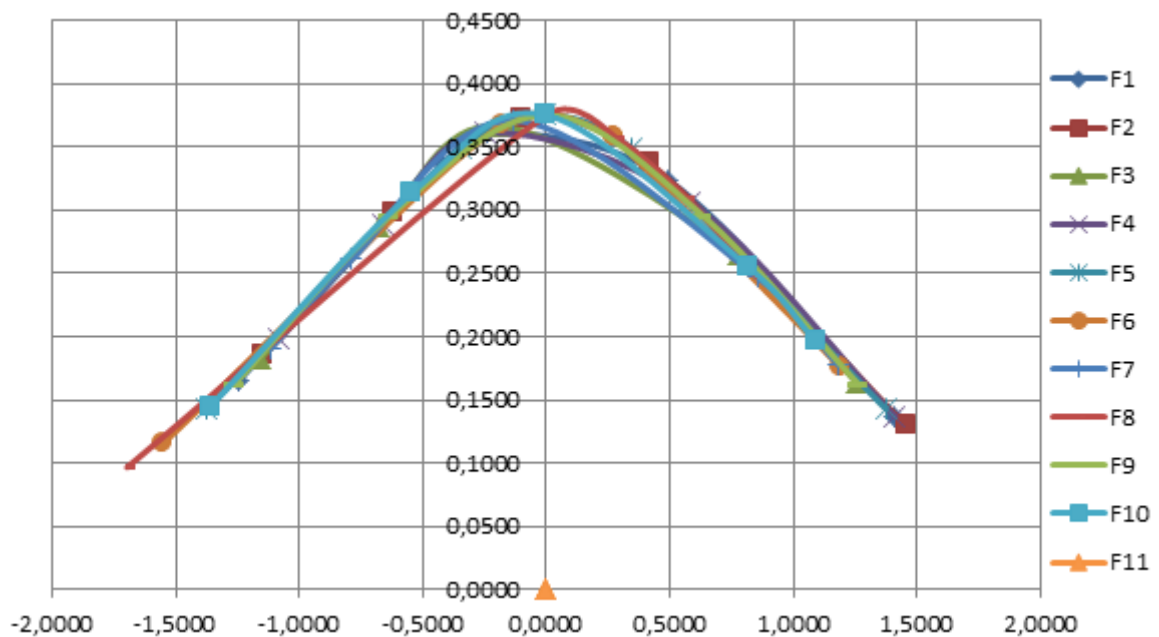


Рис. 2.29. Гістограма результатів розподілу характерних частот АЕ (дизельне пальне) в осередку горіння зовні об'єкту, група уточнених експериментів

Результати натурних експериментів співпадають з результатами імітаційних, укладаються в довірчі інтервали, розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стьюдента, що підтверджує адекватність та надійність розробленої математичної моделі, реалізуючої метод акустичної емісії дослідження процесів у осередку горіння.

2.4. Порівняння результатів R/S та спектрального аналізу акустичних образів осередку горіння з еталонними характеристиками з бази даних

2.4.1. Порівняння екстремумів АЧХ осередку горіння та еталонних.

Зареєстрований з джерела горіння акустичний спектр обробляється та підлягає ідентифікації за допомогою порівняння з компонентами бази еталонних даних, де знаходиться перелік фрактальних розмірностей (D), показників Херста (H) та коефіцієнтів загоряння (K_{exmin}) для кожної речовини з ряду горючих матеріалів.

Насамперед проводиться перевірка критерія факту загорання K_{exmin} . Формуються екстремуми АЧХ акустичної емісії, що реєструється, із зони загорання або пожежі.

Процес визначення поточної небезпеки визначається умовою:

$$K_{exmin} \leq \left\{ \Delta f_n \mid \Delta f_n \leq K_{vs} \right\} \leq K_{exmax}, \quad \Delta f_n = |f_{nbd} - f_{ns}| \quad (2.7)$$

(ситуація (2.7) ідентифікується як «**НЕБЕЗПЕКА**»),

де Δf_n – припустиме відхилення між f_{nbd} (n -а характерна частота бази еталонних даних речовин) і відповідною f_{ns} (n -а характерна частота акустичного спектру з зони процесу горіння);

K_{vs} – допустиме відхилення на ідентифікацію.

Якщо K_{ex} дорівнює 4 із допустимими відхиленнями, фіксується факт загорання на контрольованому об'єкті.

При необхідності можна ідентифікувати і саму палаючу речовину порівнянням з еталонними даними (D_{bd}) після проведення R/S аналізу акустичної хвилі, що генерується в зоні загорання:

$$|D_{bd} - D_s| \leq K_{SL},$$

де K_{SL} – коефіцієнт допустимого відхилення $K_{SL}=0.04$;

D_s – фрактальна розмірність акустичної хвилі, що генерується в зоні горіння.

2.4.2. Порівняння результатів фрактального аналізу акустичних образів осередку горіння та еталонних акустичних образів. Обробка сигналів акустичних образів, що супроводжують горіння речовин техногенного навантаження осередку зовні об'єкту, будується на умові існування часового ряду, отриманого як безліч спостережуваних значень фізичних величин, що реєструються за часом с послідовним формуванням акустичних образів небезпеки ($Y_{\text{фор}}^{\text{НС}}$). Схема формування образів включає R/S - аналіз і визначення K_{ex} .

Через те, що на акустичні випромінювання із зони початку загоряння поза об'єктом надають постійний вплив у часі природні (вітер, опади, зміна погоди) та техногенні фактори необхідно використання додаткових засобів та пристроїв для ідентифікації сигналу та його порівняння з еталонними акустичними образами.

Процедура порівняння (ототожнення) множин зовнішніх акустичних образів осередка горіння і еталонних акустичних сигналів здійснюється за допомогою евристичних алгоритмів.

Порівняння проводиться за двома чинниками:

- головному, по числу характерних частот, d_1, d_2, \dots, d_n ;
 - додатковому, по фрактальним характеристикам e_1, e_2, \dots, e_n ,
- де n – кількість спостережень.

Критерій оптимальності при порівнянні визначається середньою відносною похибкою процесу

$$СВП = \frac{\sum_{i=k+1}^n (d_i^* - d_i) / d_i}{n - k} \cdot 100\%$$

d_i^* , d_i – передбачене й реальне значення елемента множини для i -го періоду $i = \overline{k+1, n}$.

«Характеристика» (ознака) для виключення елемента з набору даних як найгіршого (Йому відповідає мінімум Функції придатності), обчислюється як сума середньої відносною похибки процесу $СВП$ та числа ітерацій.

Результат порівняння зовнішніх акустичних образів і еталонних акустичних сигналів описується співвідношенням

$$\Upsilon(q_{\text{інт}}^{\text{об}}, \Psi_{\text{нс}}^j) = f_{\Upsilon_{\text{нс}}}^{\text{об}}([\Upsilon_{\text{контр}}^{\text{нс}}], [\Upsilon_{\text{фор}}^{\text{нс}}], [\Upsilon_{\text{порів}}^{\text{нс}}]).$$

Отримані дані у вигляді нечітких часових рядів $F_1(t)$ та $F_2(t)$ (де $F_1(t)$ збігається з головним, а $F_2(t)$ – з допоміжним чинником осередку пожежі зовні об'єкту) можна подати у вигляді

$$[(F_1(t-k), (F_2(t-k))), \dots, [(F_1(t-2), (F_2(t-2))), [(F_1(t-1), (F_2(t-1))] \rightarrow F_1(t),$$

що описує процес двох факторної ідентифікації k -го порядку на основі нечітких часових рядів.

Універсум U для значень головного чинника визначається за рівнянням:

$$U = [D_{\min} - D_1, D_{\max} + D_2],$$

де D_{\min} и D_{\max} – мінімальне й максимальне значення з $d_1, d_2, \dots, d_n (i = \overline{1, n})$, а D_1 и D_2 – два дійсних числа, що дозволяють поділити універсум U на p інтервалів u_1, u_2, \dots, u_p рівної довжини.

Універсум V для значень допоміжного чинника визначається аналогічно за виразом:

$$V = [E_{\min} - E_1, E_{\max} + E_2].$$

Та поділяється на q інтервалів v_1, v_2, \dots, v рівної довжини.

Лінгвістичні терми $A_i (i = \overline{1, p})$, представлені нечіткими множинами значень головного чинника, мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = 1/u_1 + 0.5/u_2 + 0/u_3 + \dots + 0/u_{p-1} + 0/u_p \\ A_2 = 0.5/u_1 + 1/u_2 + 0/u_3 + \dots + 0/u_{p-1} + 0/u_p \quad \dots \\ \dots \\ A_p = 0/u_1 + 0/u_2 + \dots + 0.5/u_{p-1} + 1/u_p \end{array} \right.$$

Вибір значень функції приналежності, рівних 0; 0,5 та 1, дозволяє спростити подальші обчислення.

При фазифікації даних для кожного значення головного чинника визначається інтервал u_i , якому він належить, а також відповідне нечітке значення цього чинника:

$$X_i = \begin{cases} 1/A_i + 0.5/A_2, \text{ если } i = 1 \\ 0.5/A_{i-1} + 1/A_i + 0.5/A_{i+1}, i = 2, \overline{p-1} \\ 0.5/A_{p-1} + 1/A_p, \text{ для } i = p \end{cases} .$$

Лінгвістичні змінні B_j та відповідні нечіткі значення $Y_i (j = \overline{1, q})$ для допоміжного чинника визначаються аналогічно.

За отриманими даними для всіх значень $d_i (i = \overline{k+1, n})$ часового ряду будуються нечіткі логічні залежності:

$$(X_{i-k}, Y_{i-k}), \dots, (X_{i-2}, Y_{i-2})(X_{i-1}, Y_{i-1}) \rightarrow X_i,$$

які безпосередньо використовуються для виконання процесу ідентифікації та порівняння небезпек в осередку зовні об'єкту.

В якості критерію оптимальності доцільно використовувати мінімальне значення середньої відносної помилки процесу ідентифікації (СВП) у вигляді:

$$СВП = \frac{\sum_{i=k+1}^n (d_i^* - d_i) / d_i}{n - k} \cdot 100\%,$$

де d_i^* d_i – передбачене й реальне значення для i -го періоду ідентифікації $i = \overline{k+1, n}$.

Передбачене значення для i -го періоду ідентифікації обчислюється за рівнянням (4.30)

$$d_i^* = \frac{w_{j1} \cdot t_{j1} + w_{j2} \cdot t_{j2} + \dots + w_{jp} \cdot t_{jp}}{w_{j1} + w_{j2} + \dots + w_{jp}},$$

де w_j – коефіцієнти, що враховують повтори в нечітких логічних залежностях, а змінні t_j визначаються за рівнянням:

$$t_i = \begin{cases} (\tilde{u}_1 + 0.5 \cdot \tilde{u}_2) / (1 + 0.5), j = 1 \\ (0.5 \cdot \tilde{u}_{j-1} + \tilde{u}_j + 0.5 \cdot \tilde{u}_{j+1}) / (0.5 + 1 + 0.5), 2 \leq j \leq n - 1, \\ 0.5 \cdot \tilde{u}_{n-1} + \tilde{u}_n) / (0.5 + 1), j = n \end{cases}$$

де \tilde{u}_{j-1} , \tilde{u}_j , \tilde{u}_{j+1} – середні точки інтервалів u_{j-1} , u_j , u_{j+1} відповідно.

При використанні викладеного підходу особлива увага повинна приділятися вибору вільних параметрів процесу ідентифікації, до яких відносяться її порядок k , числа корекції діапазонів D_1, D_2, E_1, E_2 , а також кількість інтервалів p і q , на які поділяються універсуми U і V відповідно.

Оптимальні значення цих параметрів забезпечують мінімум показника СВП, причому для базового процесу вони вибираються вручну. Для скорочення часу пошуку й підвищення точності результатів пропонується використовувати класичний евристичний алгоритм, де структура «характеристики» матиме вигляд:

$$S = (D_1, D_2, E_1, E_2, p, q, k).$$

Якщо для деякої «характеристики» S_i всі праві частини груп нечітких логічних залежностей визначені (непусті, то значення функції придатності обчислюється як $J(S_i) = СВП$. У випадку, коли не визначена права частина хоча б однієї такої залежності, неможливо гарантувати обчислення ефективного значення для нового члена тимчасового ряду. Таку «характеристику» (властивість) необхідно виключити з набору як найгіршу, обчисливши її функцію придатності $J(S_i)$ як суму середньої відносної помилки процесу ідентифікації СВП і числа 100 (задана кількість ітерацій). Остаточна функція придатності набирає вигляду:

$$J(S_i) = \begin{cases} СВП, \text{ якщо визначені усі праві частини} \\ \text{логічних залежностей;} \\ СВП + 100 - \text{ в іншому випадку} \end{cases} .$$

«Характеристика», для якої в результаті виконання заданого числа ітерацій евристичного алгоритму досягається мінімум функції придатності $J(S_i)$, визначає оптимальний набір параметрів процесу ідентифікації.

Слід зауважити, що пошук мінімального значення функції придатності класичними методами чисельної оптимізації є досить складним, оскільки область допустимих рішень задачі визначається невідомими заздалегідь межами зміни параметрів процесу. Крім того, зазначена область буде неопуклою і незв'язною, оскільки змінні D_1, D_2, E_1, E_2 є безперервними, а змінні p, q, k – дискретними (цілими). Реалізація евристичного алгоритму процесу ідентифікації та порівняння виконується за класичною схемою.

Підсумовуючи розгляд аналізу характеристик акустичних випромінювань осередку горіння, можна стверджувати, що на основі розробленого методу акустичної емісії, який оперує характеристиками акустичних випромінювань при горінні різних матеріалів: ідентифікація виду горючого матеріалу; енергетичний

критерій факту загоряння; можливість порівняння акустичних образів та створення еталонної бази далі розглядається науково обґрунтований інженерно-технічний метод виявлення осередку горіння. Реалізація акустичного методу можлива як виявлення виникнення осередку горіння всередині об'єкта, і поза ним.

Передбачається існування еталонної бази даних з характеристиками акустичних сигналів, що випромінюються внаслідок реакції горіння різних горючих матеріалів.

Оптимальна кількість спеціальних пристроїв реєстрації акустичного сигналу розраховується з урахуванням контрольованої площі.

Зареєстрований з осередку початку горіння акустичний сигнал обробляється та аналізується за заданою схемою; формується акустичний образ осередку горіння, проводиться операція порівняння акустичних образів, зареєстрованих із зони горіння та еталонних образів горючих матеріалів із бази даних.

Результати імітаційних моделей, укладаються в довірчі інтервали, розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стюдента, що підтверджує адекватність та надійність отриманих експериментальних значень фізичних величин та заснованих на них аналітичних та математичних уявлень.

Послідовність дій, викладених вище, представлена на рис. 2.30. у вигляді загальної схеми.

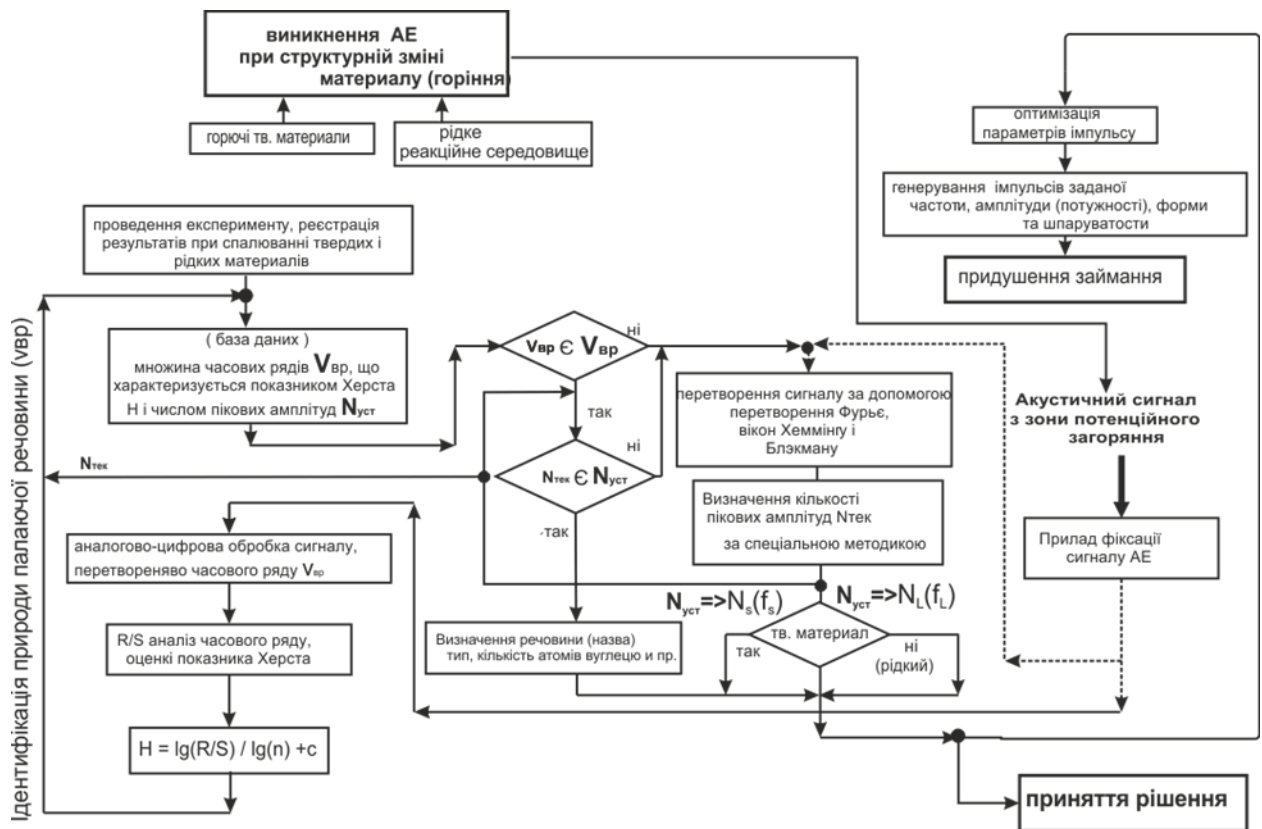


Рис. 2.30. Загальна схема алгоритму послідовності дій при виявленні осередку горіння

Залежно від місця потенційного виникнення осередку горіння (поза або всередині об'єкту, що контролюється) розглядається відповідний інженерно-технічний метод виявлення осередку горіння.

Результати аналізу передаються на пульт управління. Управляючий алгоритм прийняття рішення включає всі необхідні сучасні досягнення електроніки, когнітивних роботів контролю, принципи штучного інтелекту та евристичних алгоритмів. Крім того, використовується процедура стабілізації системи приладів формування образів, процедура компенсації спотворень та процедура посилення сигналу, що буде викладено у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3

ФОРМУВАННЯ УМОВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У НАСЛІДОК ПОЖЕЖІ НА БАЗІ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

3.1. Загальні положення небезпеки розвитку пожежі та виконання умов її попередження

Інтегральний показник загрози розвитку пожежі q_{int} (рис.3.1) традиційно вважається функцією площі розповсюдження горіння (S), температури у зоні горіння (T), та часу (t), минулого від початку загоряння, і в міру розвитку ситуації набуває експоненційної залежності

$$q_{int} = f(S, T, t), \text{ где } t \in \Delta t \text{ (НС)}.$$

З розвитком горіння небезпека може набувати об'єктне, місцеве, регіональне значення.

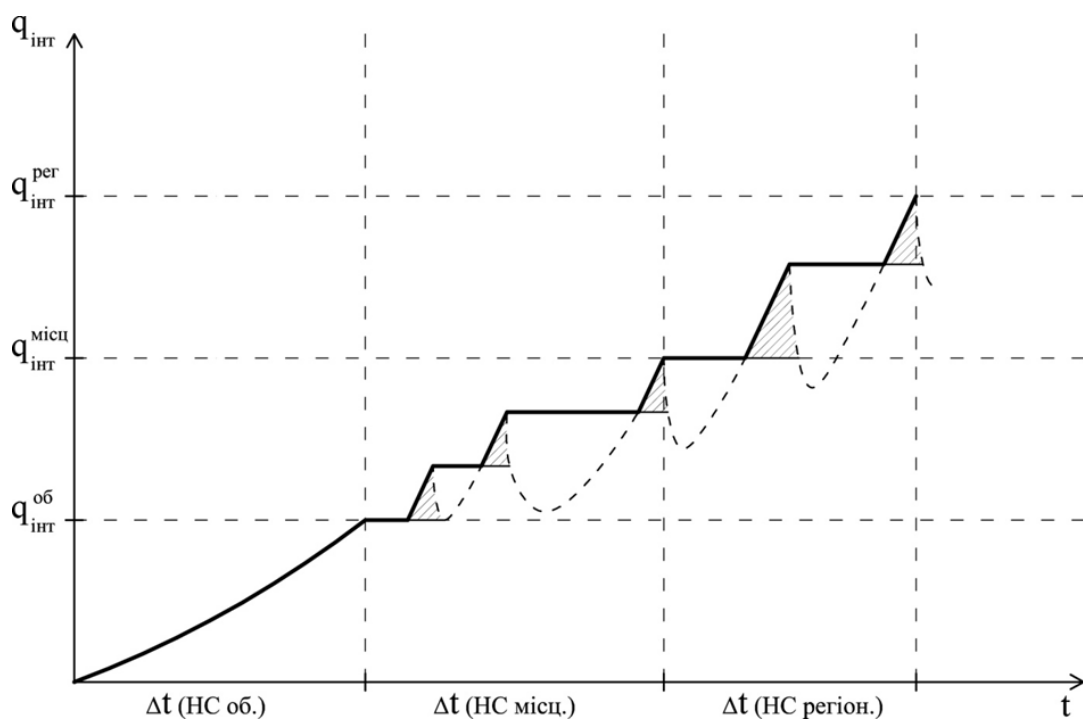


Рис. 3.1. Залежність q_{int} , інтегрального показника наслідків НС унаслідок пожежі від часу розвитку

$$\Delta t (HC_{\text{міст}}) \ll \Delta t (HC_{\text{region}}) \ll \Delta t (HC_{\text{держ}})$$

Для виявлення та попередження розвитку НС відводиться період часу $\Delta t (HC_{\text{об}})$, після чого можна тільки фіксувати ступінь наростання розвитку за інтенсивністю акустичних випромінювань, які мають місце на всіх стадіях розвитку пожежі. Генерація акустичних хвиль із зони осередку горіння, що зароджується, формує деякий акустичний образ $\Psi_{\text{НС}}^j(t)$. Кожен елемент техногенного навантаження належить множині

$$\Psi^j(t) \in [\Psi^1(t_j), \Psi^2(t_j) \dots \Psi^n(t_j)], \text{ де } (j = 1 \dots n).$$

n – кількість потенційних небезпек техногенного навантаження всередині або зовні контрольованого об'єкту.

З урахуванням зовнішнього впливу некерованих змінних (коефіцієнти K^S, K^T) та функції інтенсивності розвитку горіння $F_e(T)$ на характеристики акустичних спектрів отримаємо символічний вираз акустичного образу елемента техногенного навантаження

$$\Psi^j(t) = K^S K^T S(HC_{\text{об}}) F_e(T).$$

В реальних умовах виникнення небезпеки пожежі час $\Delta t (HC_{\text{міст}})$ стрімко наближається до нуля й фактично є верхньою межею підконтрольного періоду попередження НС засобами акустичного впливу на осередок її виникнення. Цей період також характеризується стрімким зростанням наслідків у хаотичній послідовності. У найгіршому випадку, без будь-якого домінування котрого з них. Відповідно мова може йти лише про фактично інтегральний показник наслідків унаслідок пожежі, який є результатом випадкового імпульсного процесу, еквівалентна схема перебігу якого наведена на рис. 3.2.

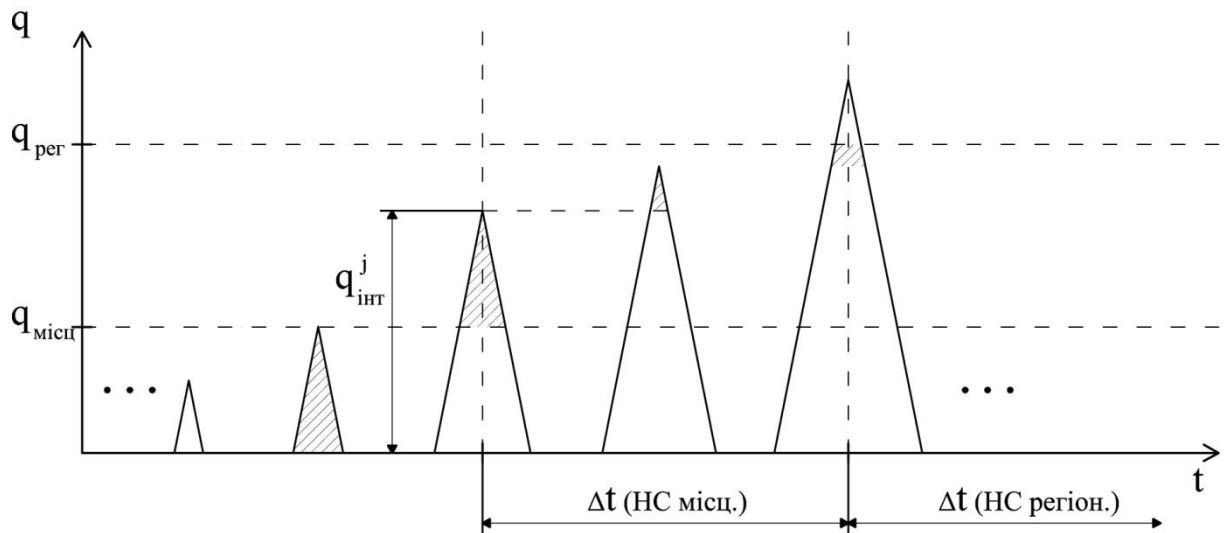


Рис. 3.2. Еквівалентна схема перебігу процесу поширення пожежі

Випадковий імпульсний процес зростання показника інтегральних наслідків НС може бути представлений у вигляді суми імпульсів з випадковою амплітудою, що виникають у моменти часу t_j інтервалу розвитку НС на місцевому рівні у вигляді

$$q_{\text{інт}}(t) = q_{\text{інт}}^{\text{місц}} + \sum_{i=1}^N (q_{\text{інт}}^{i+1} - q_{\text{інт}}^i) \cdot \varphi(t_i),$$

де $q_{\text{інт}}^i$ – амплітуди імпульсів процесу зростання негативних наслідків;

$\varphi(t_i)$ – відображення часу процесу поширення наслідків НС, яке відповідає умові :

$$\varphi(t_i) = \begin{cases} 1, & \text{за умови } t_i \in \Delta t(\text{НС}_{\text{місц}}) \\ 0, & \text{за умови } t_i \notin \Delta t(\text{НС}_{\text{місц}}) \end{cases}$$

Слід зазначити, що форма імпульсу $q_{\text{інт}}^i$ залежить від варіації індивідуальних внесків негативних наслідків і в загальному плані дослідження не має принципового значення для подальшого моделювання процесу їх попередження.

Найбільш складні втрати виникнення та поширення пожежі (регіональні та державні) носять, як правило, спонтанний і хаотичний характер і, як наслідок, не можуть бути попереджені в рамках використання акустичного методу.

Початкові умови завдання визначаються формуванням та поширенням осередку горіння. За реєстрацією акустичного сигналу та змін його акустичного спектру можна судити про поширення процесу горіння.

Процес попередження наслідків пожежі будь-якого об'єкту базується на безперечному припущенні, що в осередку горіння на стадії об'єктового поширення небезпеки мають місце акустичні випромінювання, які відповідають одному з акустичних образів з переліку небезпек осередку. Динаміка зміни інтегрального показника визначається діаграмою яка наведена на рис. 3.3.

На стадії поширення пожежі всередині об'єкта протягом проміжку часу Δt ($HC_{міц.}$) акустичні випромінювання з джерела загоряння належать безлічі

$$\Psi^j(t) \in [\Psi^1(t_j), \Psi^2(t_j) \dots \Psi^k(t_j)],$$

де $j = 1 \dots k$ і можуть бути викликані самозайманням горючих матеріалів, що там знаходяться, а $\Psi^1(t_j), \Psi^2(t_j) \dots \Psi^k(t_j)$ – перелік акустичних спектрів, що випромінюються при їх горінні.

В реальних умовах виникнення НС унаслідок пожежі час Δt ($HC_{міц.}$) стрімко наближається до нуля й фактично є верхньою межею підконтрольного періоду попередження розповсюдження вогню.

Виникнення процесу горіння може бути спровоковано як усередині, так і поза контрольованим об'єктом, але розгляд умов розвитку небезпеки та попередження наслідків пов'язані з поданими вище залежностями.

При використанні акустичного випромінювання з метою раннього виявлення осередку потенційного виникнення пожежі на будь-якому об'єкті або території різного призначення необхідно попереднє рішення задачі оптимізації розміщення та кількості пристроїв контролю акустичного сигналу (N). У монографії розгляд цього

питання опускається, оскільки розміщення засобів контролю залежить від конкретної геометрії та специфіки об'єкта.

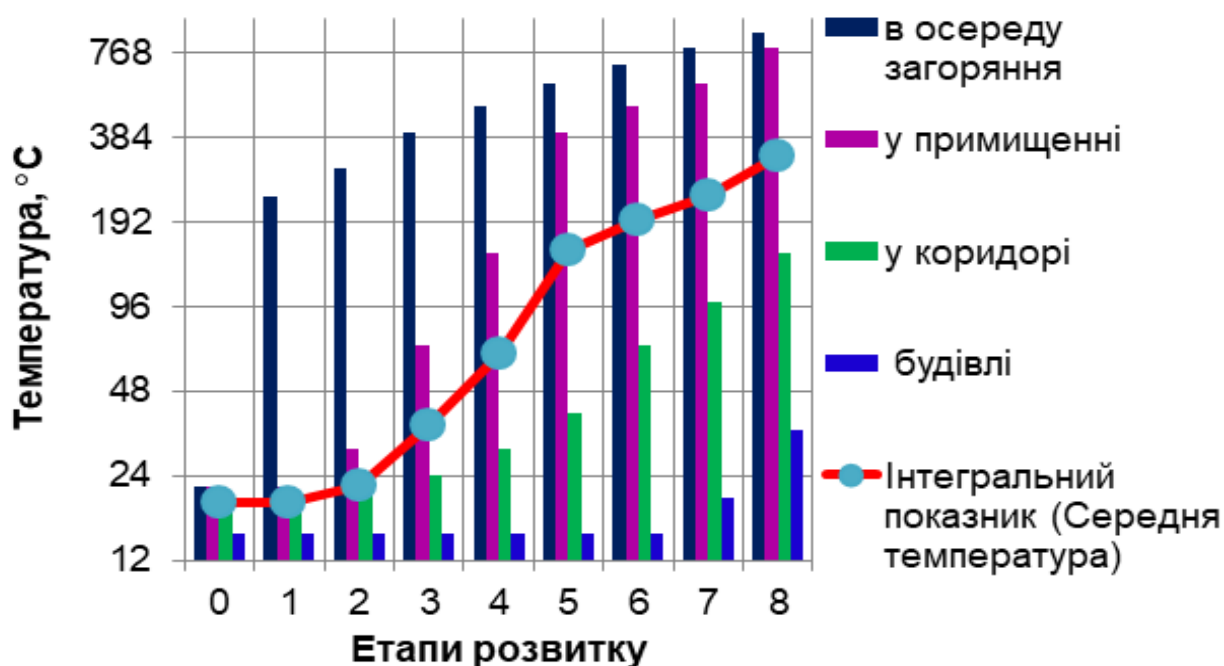


Рис. 3.3. Діаграма динаміки зміни інтегрального показника (середня температура) небезпеки поширення горіння

У будь-якому випадку для реалізації методу раннього виявлення осередку загоряння за акустичними хвилями, що випромінюються з нього, необхідно виконати низку етапів. Кожен етап реалізується сукупністю математичних моделей та апаратних засобів, представлених в монографії в описі суті акустичного методу, що розглядається. Незалежно від розташування осередку горіння (всередині або поза об'єктом) слід виконати такі процедури:

- формування інтегрального показника загрози розвитку пожежі;
- розташування пристроїв контролю на об'єкті;
- фіксація та обробка одержуваних сигналів та формування акустичного образу осередку горіння;
- встановлення факту загоряння;
- порівняння отриманого акустичного образу осередку горіння з еталонними з бази даних;

– ухвалення рішення за допомогою керуючого алгоритму («диспетчера»).

Пристрої контролю та обробки акустичних сигналів, що реєструються при спостереженні за ситуацією на контрольованому об'єкті залежать від ряду зовнішніх некерованих чинників, які накладають специфічні відмінності при формуванні акустичного образу.

Відстрочка прийняття рішення використання заходів захисту залежить від продуктивності устаткування й складності алгоритмів прийняття рішень, встановлених у системах виявлення пожежі. Впровадження методів штучного інтелекту значно підвищує ефективність технології раннього виявлення вогню та його ліквідації, сприяє виявленню ситуацій, які важко класифікувати, використовуючи особливості одержуваних даних зондування потенційно небезпечної зони.

Щоб правильно оцінити ситуацію в режимі реального часу з урахуванням часових обмежень на перевірку заданого набору умов, потрібна розробка керуючого алгоритму. Керуючі алгоритми генерують різні необхідні дії на основі даних, отриманих від зовнішніх спостережуваних процесів, якими керують; забезпечують спільне функціонування всіх задіяних систем.

Запропоновані керуючі алгоритми прийняття рішення включають певну низку дій, об'єднаних прямими і зворотними логічними зв'язками. Починаючи зі збору інформації з місця виникнення осередку загоряння, подальшої обробки сигналу, формування акустичного образу горючого матеріалу та його порівняння з еталоном, систематизації та формалізації отриманих даних, керуючий алгоритм прийняття рішення включає всі необхідні сучасні досягнення електроніки, робото-технічних систем контролю, принципи штучного інтелекту та евристичних алгоритмів.

Крім того, використовується процедура стабілізації системи приладів формування образів, процедура компенсації викривлень та процедура посилення сигналу. Далі пропонуються схеми, які включають всі ступені від виявлення акустичного сигналу про початок горіння до прийняття рішення у разі виникнення небезпеки як усередині, так і поза зоною об'єкту. Отримання даних про акустичні

сигнали з осередку займання та їх аналіз становлять точну та своєчасну реакцію на пожежну подію.

Керуючий алгоритм раннього виявлення вогню реалізує відповідну математичну модель ідентифікації акустичних образів із осередку горіння, порівняння їх з еталонними даними, фіксації факту загоряння. Блоки розміщуються на ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

Керуючі алгоритми, що реалізують акустичний метод раннього виявлення осередку горіння, та відповідно попередження наслідків пожежі, як всередині так і зовні об'єкту, мають три основні забезпечені властивості:

- високу дискретність реєстрації за рахунок високого рівня деталізації процесу отримання варіаційних параметрів;
- зрозумілість, визначеність і результативність завдяки застосуванню розробленої схеми взаємодії основних блоків керуючого алгоритму;
- масовість за рахунок триразового резервування бази акустичних еталонів небезпек осередку виникнення наслідків пожежі.

Ухвалення рішення – це сигнал на ліквідацію осередку горіння передбаченими засобами. Незважаючи на високий технологічний рівень методів гасіння, вони все-таки мають низку недоліків. Всі вони за своєю природою інвазивні (за проникненням через шкіру, дихання), деякі токсичні через хімічний склад використовуваних речовин, більшість обладнання обмежено у застосуванні у важкодоступних місцях, гасіння за допомогою електромагнітних імпульсів може викликати збої в роботі електронного обладнання (наприклад, електромереж) .

Існує припущення, що акустична взаємодія з полум'ям є основним механізмом контролю процесу утворення полум'я в турбулентних дифузійних потоках. Локальний вплив може бути результатом деформації зони реакції, яка прокладається потоком і перешкоджає горінню, але це вже інша проблема, яка потребує окремого розгляду.

3.2. Акустичний метод раннього виявлення осередку горіння і попередження надзвичайної ситуації всередині об'єкту

У реальних умовах акустичний образ у зоні розвитку горіння залежить від конкретних значень площі загоряння $S(\text{HC}_{\text{об}})$, закону зміни зростання температури $F_e(T_{\text{HC}})$ та деяких неконтрольованих коефіцієнтів впливу $K_{\text{HC}}^S, K_{\text{HC}}^T$, кількості пристроїв контролю $\Omega_{S\Psi}$ і набуває вигляду

$$\Psi_{\text{HC}}^j(t) = K_{\text{HC}}^S K_{\text{HC}}^T S(\text{HC}_{\text{об}}) F_e(T_{\text{HC}}), \quad (3.1)$$

а інтегральний показник наслідків розвитку пожежі на об'єктному рівні:

$$q_{\text{інт}}^{\text{об}}(t) = f_{\text{HC}}^{\text{об}}(S(\text{HC}_{\text{об}}), T_{\text{HC}}, t), \quad t \in \Delta t(\text{HC}_{\text{об}}).$$

Аналіз акустичного образу $\Omega_{O\Psi}$ із зони розвитку горіння формує екстремуми АЧХ та визначає їх кількість, ідентифікує ситуацію «небезпека» за енергетичним критерієм, при необхідності визначає і вид матеріалу, що загорівся, шляхом ототожнення з еталонними акустичними образами $\Omega_{N\Psi}$:

$$\Omega(q_{\text{інт}}^{\text{об}}, \Psi_{\text{HC}}^j) = f_{\Omega_{\text{HC}}}^{\text{об}}([\Omega_{S\Psi}], [\Omega_{O\Psi}], [\Omega_{N\Psi}]). \quad (3.2)$$

У результаті спостереження за ситуацією розвитку джерела загоряння всередині контрольованого об'єкта отримаємо сукупність виконання основних умов щодо запобігання виникненню пожежі внаслідок розвитку горіння в осередку загоряння:

$$\begin{cases} q_{\text{інт}}^{\text{об}}(t) = f_{\text{HC}}^{\text{об}}(S(\text{HC}_{\text{об}}), T_{\text{HC}}, t) \\ \Psi_{\text{HC}}^j(t) = K_{\text{HC}}^S K_{\text{HC}}^T S(\text{HC}_{\text{об}}) F_e(T_{\text{HC}}) \\ \Omega(q_{\text{інт}}^{\text{об}}, \Psi_{\text{HC}}^j) = f_{\Omega_{\text{HC}}}^{\text{об}}([\Omega_{S\Psi}], [\Omega_{O\Psi}], [\Omega_{N\Psi}]) \end{cases} \quad (3.3)$$

Взаємозв'язок із складовими цих виразів представлений на рис. 3.4.

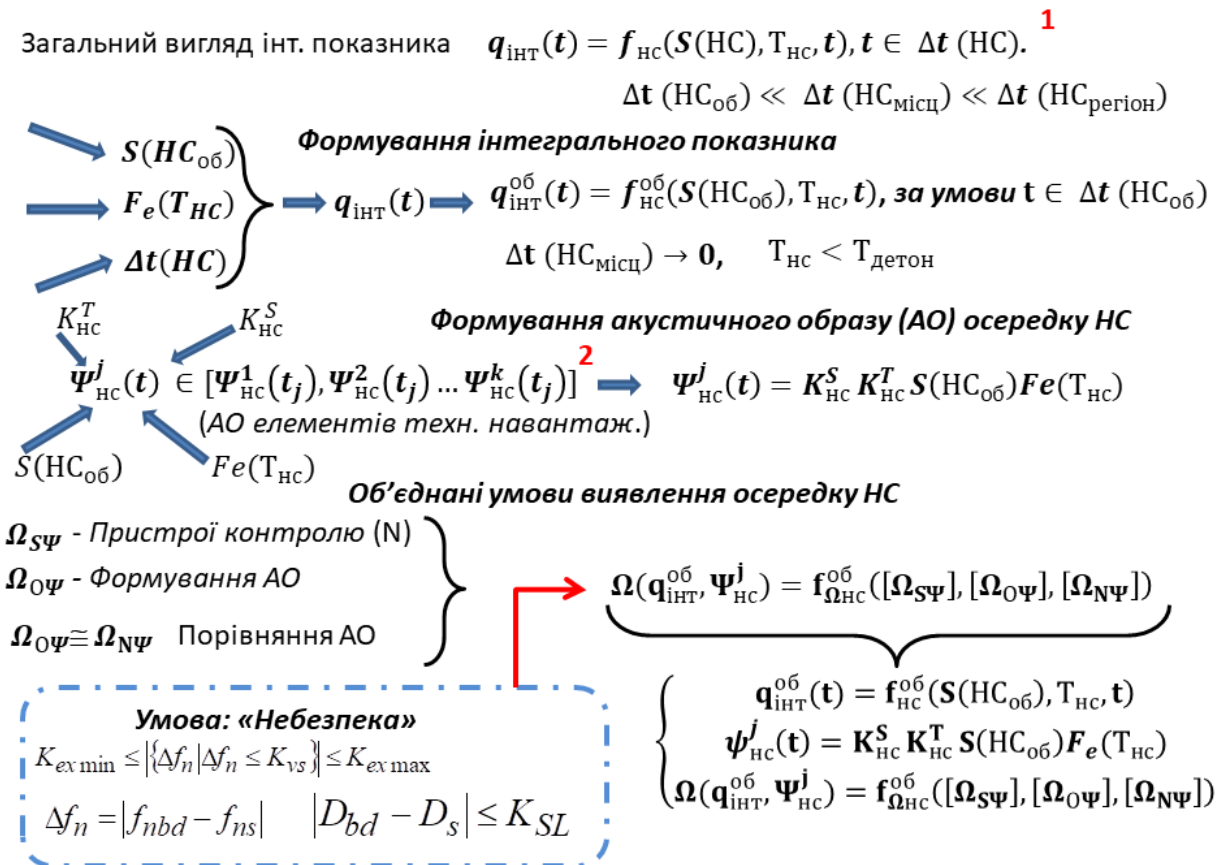


Рис. 3.4. Формування та виконання умов попередження розвитку пожежі всередині контрольованого об'єкту

Виконання цієї умови реалізується забезпеченням визначення його складових набором науково-технічних та інженерних засобів.

У другому розділі викладено суть акустичного методу виявлення осередку горіння, вирішено питання обробки, аналізу, методів порівняння. Всі складові необхідні для контролю за пожежонебезпечною ситуацією забезпечені як вибором технічних засобів, включаючи засоби контролю, базою даних еталонних акустичних образів, так і методикою та програмним забезпеченням обробки сигналів, що надходять, протягом конкретного проміжку спостереження.

Обробка інформації з метою надання їй формату, який з одного боку дозволяє оператору чи керівнику відреагувати на отриману інформацію й у подальшому виробити управлінське рішення, прийняти однозначне та обґрунтоване рішення

щодо застосування систем контролю горіння елементів техногенного навантаження в осередку контрольованого об'єкту.

Формалізація даних, отриманих під час їх збору й надходження, полягає у спрощенні й прискоренні процедури подальшої обробки інформації про осередок горіння й спирається на наступні принципи, як-то: простота, зручність у використанні, доцільність, стислість, структурованість, обов'язковість, наочність.

Розв'язання задачі з формування акустичних образів небезпек осередку всередині об'єкту в підсумку передбачає оцінку ефекту його застосування під час поширення інтегральних наслідків пожежі всередині об'єкту.

Розв'язання задачі порівняння акустичних образів осередку всередині об'єкту з еталоном небезпек в підсумку передбачає оцінку ефекту його застосування під час поширення інтегральних наслідків пожежі всередині об'єкту

3.2.1. Керуючий алгоритм раннього виявлення джерела горіння та запобігання пожежі в середині об'єкту. Схема керуючого алгоритму виявлення осередку загоряння та запобігання його розвитку зображена на рис. 3.5., алгоритм заснований за наступними принципами:

1 – калібрування за еталонним сигналом небезпеки для перевірки працездатності засобів виявлення осередку горіння;

2 – запис фонового сигналу, тривалість запису якого залежить від особливостей частотних і амплітудних характеристик фону на об'єкту;

3 – перевірка фону на характерні пікові частоти й амплітуди (ХПЧ) заданих частотних діапазонів для виключення помилкового виявлення;

4 – база даних акустичних спектрів (база еталонів небезпек);

5 – блок управління записом і блок 4, які залежать від особливостей фону й аналізу сигналу на кількість збігів характерних пікових амплітуд заданих частотних діапазонів;

6 – блок, який спрацьовує у випадку відсутності характерних пікових амплітуд в записаному спектрі й відповідає за запис корисного сигналу;

7 – обробка корисного сигналу, яка включає розв'язання другої і третьої задач

умов, а саме, формування акустичних образів небезпек, порівняння акустичних образів з еталонними;

8 – блок формування управлінських рішень для функціонування автоматичних систем контролю горіння в осередку горіння.

Відтак, блоки 3, 4 і 5 формують модуль попередньої обробки сигналу, для виключення потрапляння в фоновий сигнал сигналів АЕ від осередку горіння.

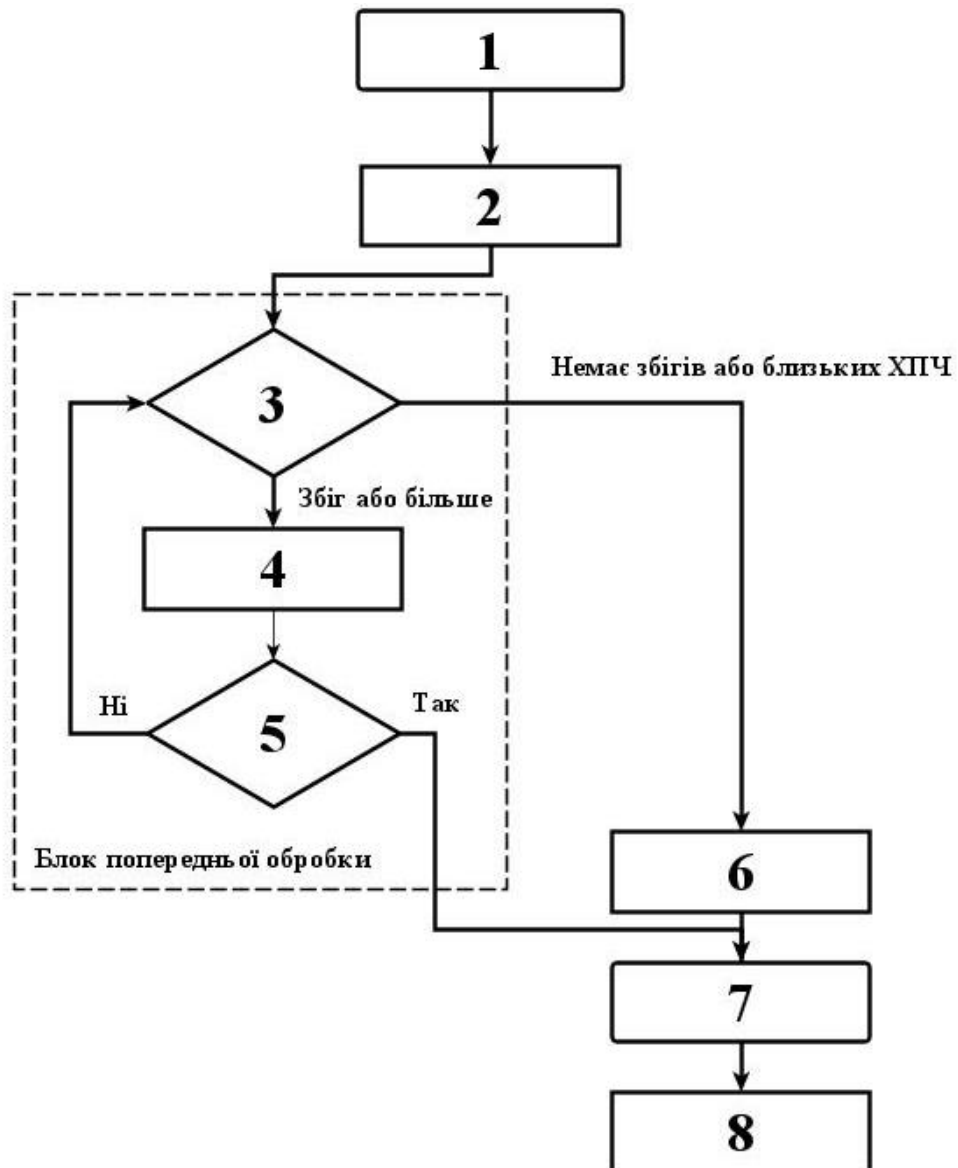


Рис. 3.5. Керуючий алгоритм умов попередження наслідків пожежі всередині об'єкту

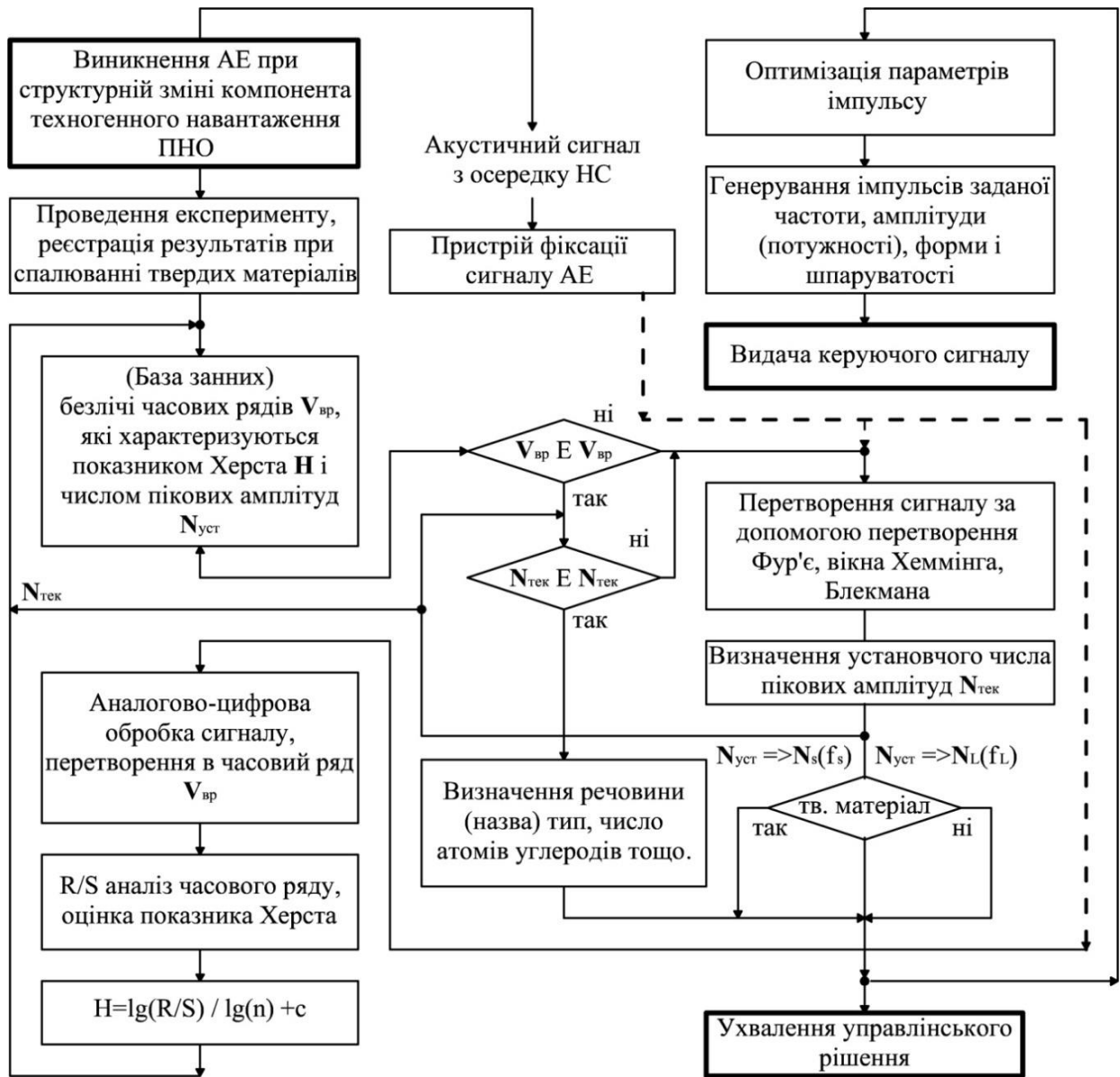


Рис. 3.6. Схема взаємодії основних блоків керуючого алгоритму акустичного методу попередження розвитку пожежі всередині контрольованого об'єкту

Схема взаємодії наведених блоків керуючого алгоритму зображена на рис. 3.6. Блоки складаються з інформації про результати опрацювання корисного сигналу в формі команди «**виявлено / не виявлено**» і передачі її на виконання.

3.3. Акустичний метод раннього виявлення осередку горіння і попередження надзвичайної ситуації зовні об'єкту

Через те, що на акустичні випромінювання із зони початку загоряння поза об'єктом надають постійний вплив у часі природні (вітер, опади, зміна погоди) та техногенні чинники необхідне використання додаткових засобів та пристроїв для реєстрації, ідентифікації сигналу та його порівняння з еталонними акустичними образами.

Додатково необхідно додати таке:

- порівняння акустичних образів небезпек осередку горіння зовні об'єкту з використанням евристичних алгоритмів;
- застосування процедури компенсації викривлення акустичного спектру;
- застосування процедури стабілізації системи пристроїв формування акустичного образу;
- застосування процедури посилення акустичного спектру.

Удосконалення компонентної бази пристроїв дозволяє істотно зменшити їх габарити при збереженні точності часових визначень. Поєднання акустичних датчиків з блоками цифрової обробки сигналів дає можливість збільшити число одночасно аналізованих акустичних каналів, тим самим, виключаючи вплив рівня сигналів на точність визначення відстані до осередку загоряння.

Втім це ствердження справедливе у разі однозначного визначення й стійкої фіксації у часі координат системи ідентифікації акустичного спектру небезпеки. З метою забезпечення необхідних умов пропонується застосування процедури стабілізації системи пристроїв формування акустичного образу, структурна схема якої наведена на рис. 3.7.

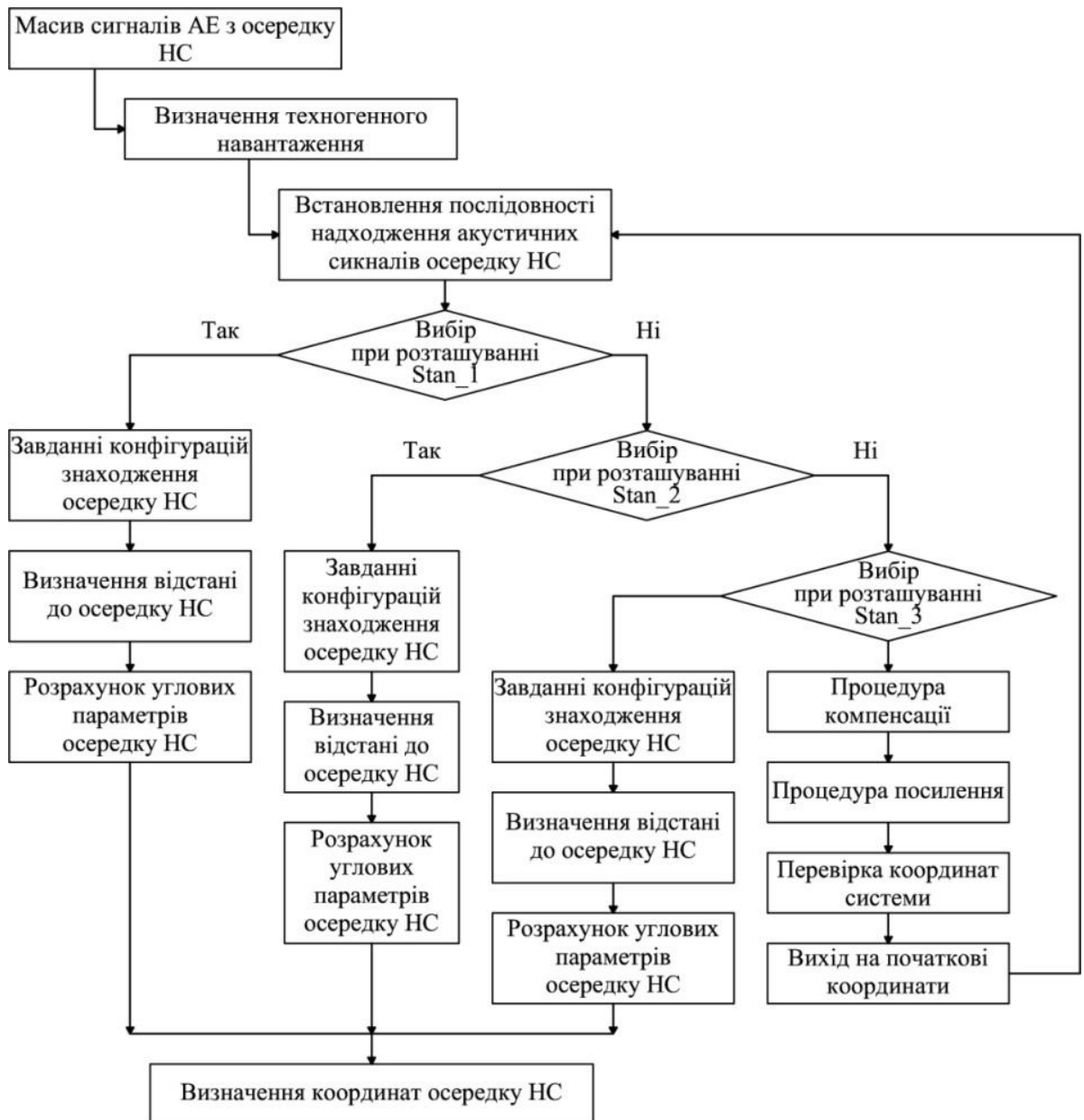


Рис. 3.7. Структурна схема застосування процедури стабілізації системи пристроїв формування акустичного образу

Зазначений підхід у вигляді структурної схеми застосування процедури стабілізації системи пристроїв формування акустичного образу дозволяє у якості несучої конструкції системи ідентифікації небезпеки використати БПЛА на базі аеростату якірного типу з автономною системою стабілізації стану відповідного кріплення з коригуванням по висоті позиціонування. Структурна схема застосування процедури компенсації викривлення акустичного спектру наведена на рис. 3.8.

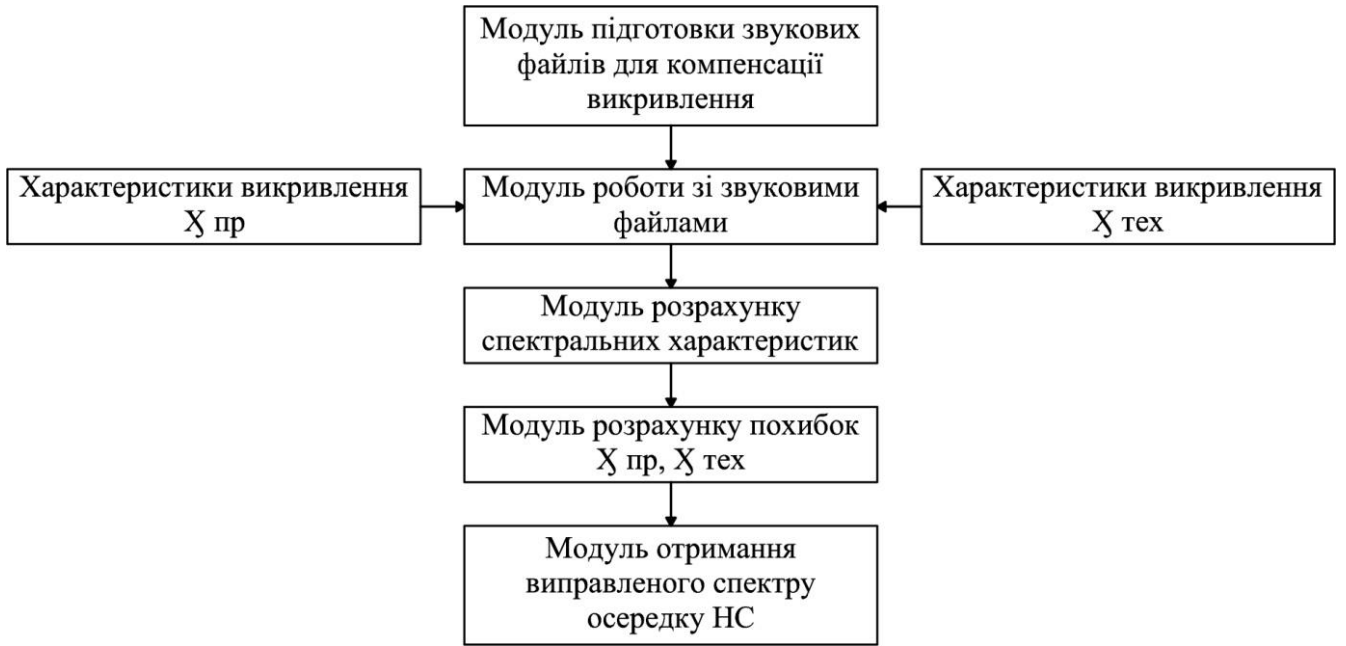


Рис. 3.8. Структурна схема застосування процедури компенсації викривлення акустичного спектру

Структурна схема застосування процедури посилення акустичного спектру наведена на рис. 3.9.

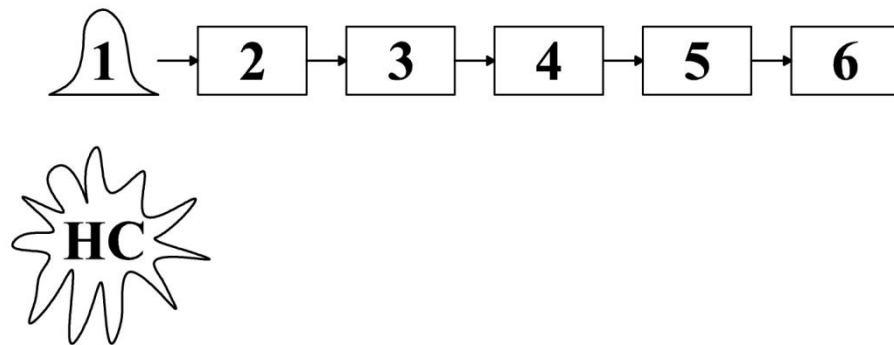


Рис. 3.9. Структурна схема застосування процедури посилення акустичного спектру

На рис. 3.9 маємо наступні позначення: 1 – акустичний спектр, 2 – попередній підсилювач, 3 – блок фільтрів, 4 – основний підсилювач, 5 – дискримінатор, 6 – детектор.

Залежність акустичного спектру (акустичного образу) осередку горіння $\Psi_{\text{НС}}^j$ має вигляд

$$\Psi_{\text{НС}}^j(t) = K_{\text{НС}}^{S''} K_{\text{НС}}^{T''} S(\text{НС}_{\text{об}}) \exp(T_{\text{НС}}),$$

де $K_{\text{НС}}^{S''}, K_{\text{НС}}^{T''}$ - коефіцієнти впливу некерованих змінних, а саме, площі та температури осередку пожежі $S(\text{НС}_{\text{об}})$ і $T_{\text{НС}}$ на інтенсивність акустичного спектру осередку. Останні визначаються за рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{НС}}^{S''} &= K_{\text{НС}}^S \cdot K_{\text{ІНТ}}^S \cdot \chi_{\text{пр}}(t) \cdot \chi_{\text{тех}}(t) \cdot \chi_{\text{кор}}(t) \\ K_{\text{НС}}^{T''} &= K_{\text{НС}}^T \cdot K_{\text{ІНТ}}^T \cdot \chi_{\text{пр}}(t) \cdot \chi_{\text{тех}}(t) \cdot \chi_{\text{кор}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

де $K_{\text{ІНТ}}^S, K_{\text{НС}}^T$ – коефіцієнти інтегрального внеску чинників зовнішнього впливу на інтенсивність акустичного спектру осередку НС;

$\chi_{\text{пр}}(t)$ – постійно діюча, зміна у часі, акустична компонента природного характеру;

$\chi_{\text{тех}}(t)$ – постійно діюча, зміна у часі, акустична компонента антропогенно-техногенного характеру;

$\chi_{\text{кор}}(t)$ – Чинники природного характеру, які дестабілізують розміщення пристрою (або їх набір) з формування акустичного спектру.

Фактично маємо відображення процесу викривлення акустичного образу від дії чинників природного і техногенного характеру $\chi_{\text{пр}}(t), \chi_{\text{тех}}(t)$ · вплив на його потужність $\chi_{\text{кор}}(t)$.

З урахуванням виразів (3.4) рівняння залежності акустичного спектру осередку набуває вигляду:

$$\Psi_{\text{НС}}^j(t) = K_{\text{НС}}^S \cdot K_{\text{НС}}^T \cdot K_{\text{ІНТ}}^S \cdot K_{\text{ІНТ}}^T \cdot \chi_{\text{пр}}(t) \cdot \chi_{\text{тех}}(t) \cdot \chi_{\text{кор}}(t) S(\text{НС}_{\text{об}}) F_e(T_{\text{НС}}) \quad (3.5)$$

Параметри існування відповідних відображень характеризуються умовою:

$$\begin{aligned} & \chi_{\text{пр}}(t) \\ & \chi_{\text{тех}}(t) \in [0,1], \\ & \chi_{\text{кор}}(t) \end{aligned}$$

де 1 – відповідає відсутності відповідного впливу на акустичний образ;

0 – відповідає стану домінування впливу відповідного зовнішнього чинника пожежі на акустичний образ. Межі інтервалу належності відображення мають фізичне пояснення. Досягнення правої межі інтервалу свідчить про перехід ситуації унаслідок пожежі зі стану всередині в стан зовні.

Аналіз рис. 3.10. доводить, що з метою фіксації процесу акустичної ідентифікації на рівні, який забезпечить часовий інтервал, достатній для проведення комплексу заходів з попередження пожежі на об'єкті, необхідно виконання додаткових умов. Умови виконуються за допомогою передбачених (описаних раніше) процедур стабілізації системи.

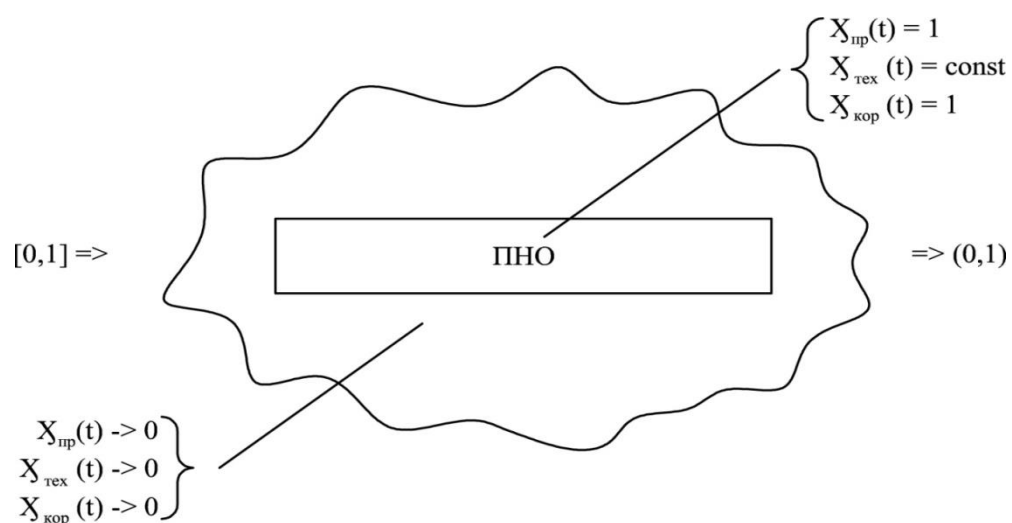


Рис. 3.10. Аналіз характеру меж інтервалу існування відображень процесу викривлення акустичного образу

Для досягнення умови $\chi_{\text{пр}}(t) \neq 0$
 $\chi_{\text{тех}}(t) \neq 0$ необхідно:

- формування акустичних образів небезпек осередку надзвичайної ситуації унаслідок пожежі зовні об'єкту;
- порівняння акустичних образів осередку надзвичайної ситуації унаслідок пожежі з використанням евристичних алгоритмів;
- застосування процедури компенсації викривлення акустичного спектру.

Для досягнення умови $\chi_{\text{кор}}(t) \neq 0$ необхідно:

- формування діапазону застосування робото-технічної системи;
- застосування процедури стабілізації системи пристроїв формування акустичного образу.

На відміну від сформованої моделі ідентифікації розвитку пожежі всередині об'єкту (розділ 3.2), характер поширення розвитку пожежі зовні об'єкту на початковій стадії (НС об'єктового рівня) не має однозначного характеру поширення, що обумовлено більш складним варіативним набором елементів техногенного навантаження.

Час поширення небезпеки об'єктового рівня НС залежить від площі осередку – S (НС_{об}), температури в осередку пожежі – $T_{\text{НС}}$ і лінійної швидкості поширення горіння – $V_{\text{НС}}^{\text{об}}$, яка фактично і формує рівень розширення небезпеки та акустичний образ осередку горіння:

$$q_{\text{інт}}^{\text{об}}(t) = f_{\text{НС}}^{\text{об}}(S(\text{НС}_{\text{об}}), T_{\text{НС}}, t(V_{\text{НС}}^{\text{об}})), \quad t \in \Delta t(\text{НС}_{\text{об}}) \quad (3.6)$$

$$\Psi_{\text{НС}}^j(t) \in [\Psi_{\text{НС}}^1(t_j), \Psi_{\text{НС}}^2(t_j) \dots \Psi_{\text{НС}}^k(t_j)]$$

за умови $V_{\text{НС}} < V_{\text{НС}}^{\text{місц}}$,

де $\Psi_{\text{НС}}^1(t_j), \Psi_{\text{НС}}^2(t_j) \dots \Psi_{\text{НС}}^k(t_j)$ – акустичні спектри переліку небезпек, що мають місце в осередку горіння у фіксований час t_j з часового інтервалу $\Delta t(\text{НС}_{\text{об}})$;

k – кількість потенційних небезпек, які можливо визначити в осередку розвитку горіння;

$V_{НС}^{місц}$ – швидкість поширення горіння, яка дорівнює лінійній швидкості поширення НС.

В реальних умовах виникнення пожежі зовні об'єкту час Δt ($НС_{об}$) стрімко наближається до нуля й фактично є верхньою межею підконтрольного періоду попередження пожежі всіма можливими науково-технічними та інженерними засобами контролю та впливу на осередок виникнення горіння.

Відповідно мова йде не тільки про отримання чіткої ідентичності акустичних характеристик небезпек осередку з існуючими еталонами небезпек, але й вирішення задачі визначення координат осередку загоряння на підконтрольній площі зовні об'єкту.

3.3.1. Формування діапазону застосування робото-технічної системи контролю безпеки. Рішення поставленого завдання базується на дослідженнях процесу бездротового керування в умовах інтенсивних радіоперешкод, коли керуючі команди невірні розпізнаються навігаційною системою, і подальше керування стає неможливим. Як подолання проблеми пропонується використовувати систему керування (як аварійну) звуковими командами, в тому числі й голосовими, в діапазоні частот від 100 до 3500 Гц, із застосуванням спрямованого мікрофона.

При такій системі керування виникає проблема розпізнавання голосових команд, оскільки можливість керування має бути у будь-якого оператора, що перебуває в зоні управління.

Для вирішення цього завдання пропонується використовувати систему розпізнавання голосу з виділенням характерних частот акустичного спектру для кожної команди.

В системах розпізнавання мови застосовують різні методи, наприклад: розпізнавання за зразком, застосування нейронних мереж, евристичні алгоритми, вейвлет-перетворення, а також статистичний аналіз. Пропоновані методи є досить ресурсно-витратними. Для систем керування потрібна швидка обробка вхідних

команд. Для підвищення швидкодії системи пропонується застосувати MEL-перетворення. Цей підхід є найбільш прийнятним в даному випадку.

Для того щоб система ідентифікувала вірно команди керування необхідно – на тлі шумових перешкод виділити голосову команду й за допомогою MEL фільтрації її ідентифікувати.

Для аналізу даних скористаємося методом фреймів і розбиття слів. Дослідним шляхом встановлено, що оптимальна довжина фрейму повинна відповідати проміжку в 0,01 с, а накладення фреймів (перекриття) – 0,5 від довжини фрейму. З урахуванням того, що середня довжина слова становить приблизно $0,4 \div 0,8$ с, такий крок дає приблизно від 80 до 160 фреймів (неменше) на слово.

Якщо команда складається з декількох слів, то необхідно виділити (розділити кожне слово) у вступнику сигналу керування. У нашому випадку паузами між словами буде фон зони управління роботом в межах зони об'єкту. Існує кілька способів поділу сигналу на окремі слова. Оберемо метод аналізу ентропії, яка визначає, як сильно змінюється сигнал керування в рамках заданого фрейму. Для розрахунку ентропії конкретного фрейму припустимо, що прийнятий сигнал керування буде унормовано і його ентропія фрейму відповідає рівнянню

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} P[i] \cdot \log_2(P[i])$$

Поділивши сигнал на окремі фрейми, отримаємо набір фреймів, що відповідають певним словам (командам). Для розпізнавання команд скористаємося підходом MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients).

Нехай фрейм сигналу має вигляд вектора $x[k], 0 \leq k < N$, де N - розмір фрейму (256 або 512, але не більше 1024 елементів). Отримаємо спектр сигналу за допомогою дискретного перетворення Фур'є

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-2\pi kn/N}, 0 \leq k < N.$$

Результати практичної реалізації наведено на рис. 3.11 та 3.12.

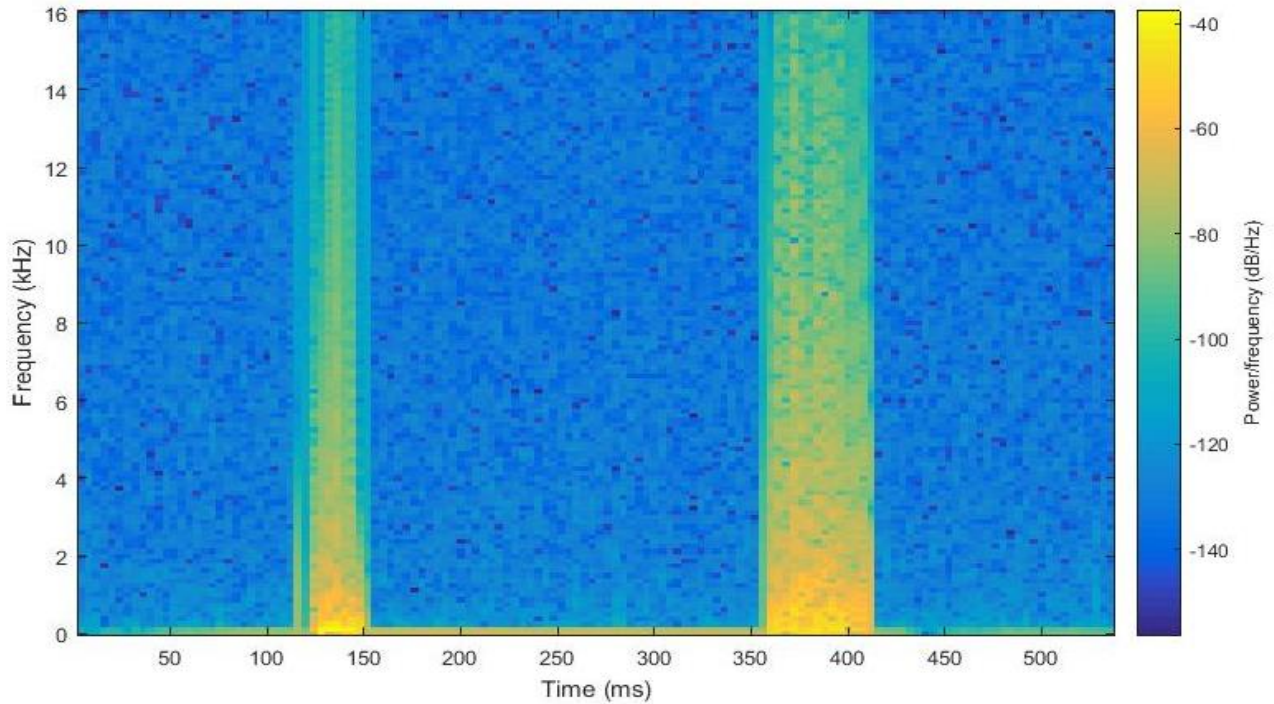


Рис. 3.11. Спектр голосової команди «СТОП» робото-технічної системи в зоні об'єкту

Застосуємо функцію Хеммінга з метою смуфінгу на межах фреймів

$$H[k] = 0.54 - 0.46 \cdot \cos[2\pi k / (N - 1)].$$

Отримаємо вектор виду $X[k] = X[k] \cdot H[k], 0 \leq k < N$, результат застосування функції Хеминга наведено на рис. 3.13.

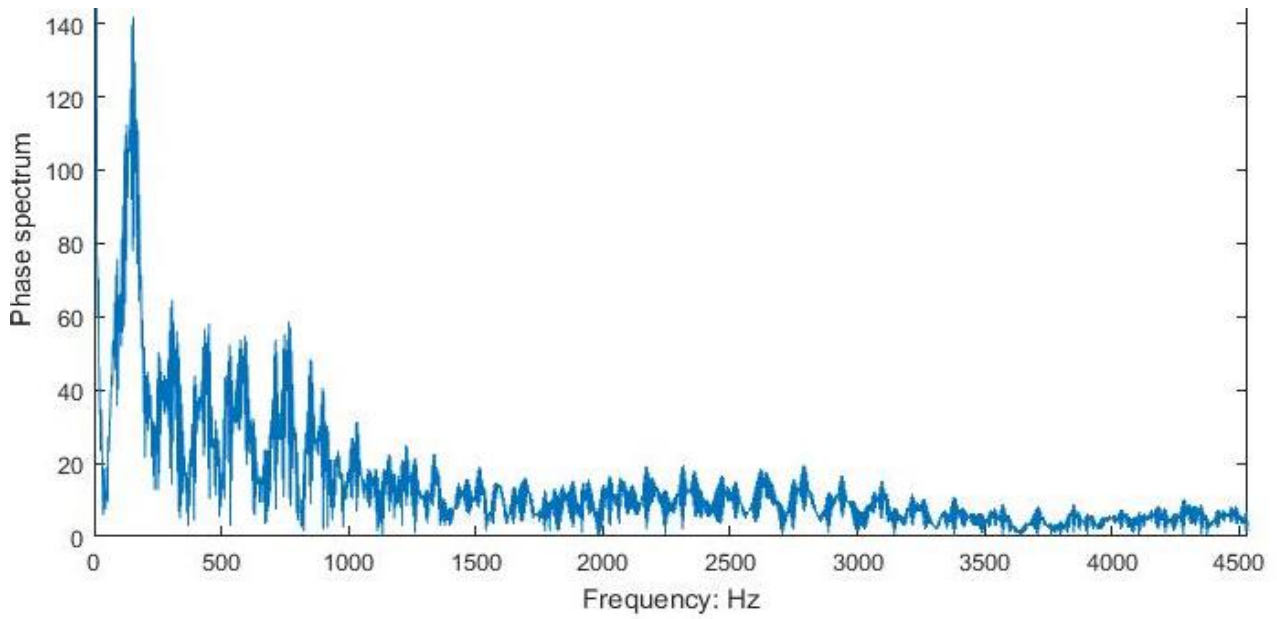


Рис. 3.12. Фазовий спектр голосової команди «СТОП» робото-технічної системи в зоні об'єкту

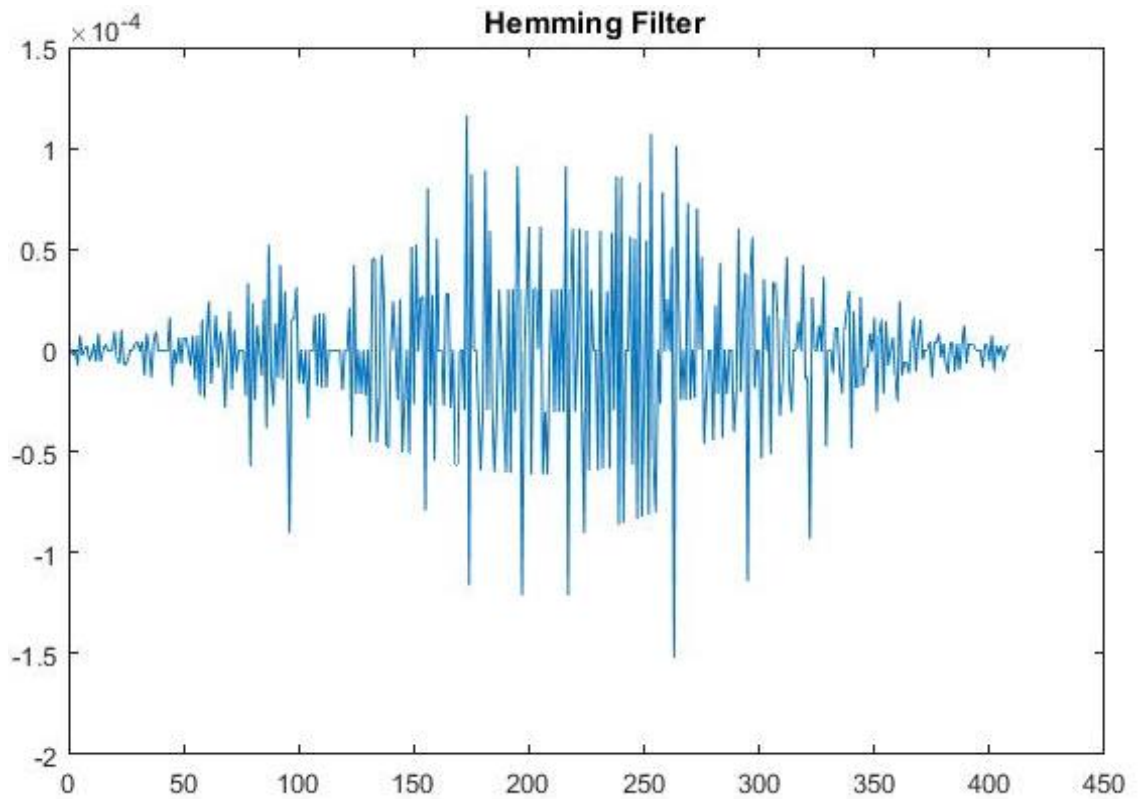


Рис. 3.13. Сигнал керування робото-технічної системи у зоні ПНО після застосування функції Хеммінга

Перетворимо частоту сигналу в MEL-шкалу частот за виразом

$$M = 1127 \cdot \ln(1 + f / 700)$$

и вчислимо MEL- коефіцієнти.

Оскільки маємо фрейм розміром 512 елементів, з метою завадостійкості приймача сигналу керуючі команди необхідно обирати в діапазоні частот від 200 до 3000 Гц. Кількість MEL-коефіцієнтів, між іншим $M = 24$, але слід врахувати, що зі збільшенням числа коефіцієнтів зростає й час обробки.

Розкладемо отриманий спектр по MEL-шкалі та в підсумку отримаємо набір фільтрів. Перетворимо частотний діапазон 200 – 3000 Гц згідно в MEL-частоту, що відповідає діапазону (283,23 – 1876,46 Гц). Для побудови 24 фільтрів потрібно 26 опорних точок, значення яких наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1–Характеристики опорних точок

i	f_i^{mel}	i	f_i^{mel}	i	f_i^{mel}	I	f_i^{mel}	i	f_i^{mel}	i	f_i^{mel}
1	283,23	6	601,88	11	920,52	16	1239,17	21	1557,81	26	1876,46
2	346,96	7	665,60	12	984,25	17	1302,90	22	1621,54	–	–
3	410,69	8	729,33	13	1047,98	18	1366,63	23	1685,27	–	–
4	474,42	9	793,06	14	1111,71	19	1430,35	24	1749,00	–	–
5	538,15	10	856,79	15	1175,44	20	1494,08	25	1812,73	–	–

Виконавши зворотне перетворення, за допомогою формули $f = 700 \cdot (e^{M/1127} - 1)$ отримаємо набір частот (табл. 3.2). Сформуємо функцію $f^{mel}(f^r)$ та її графічну інтерпретацію (рис. 3.14).

Таблиця 3.2 – Характеристики частот відповідно до опорних точок

i	f_i^r	i	f_i^r	i	f_i^r	I	f_i^r	i	f_i^r	i	f_i^r
1	200	6	494,07	11	884,24	16	1401,90	21	2088,71	26	3000
2	252,35	7	563,54	12	976,41	17	1524,18	22	2250,94	–	–
3	307,76	8	637,05	13	1073,94	18	1653,58	23	2422,62	–	–
4	366,39	9	714,83	14	1177,14	19	1790,50	24	2604,28	–	–
5	428,43	10	797,14	15	1286,34	20	1935,39	25	2796,51	–	–

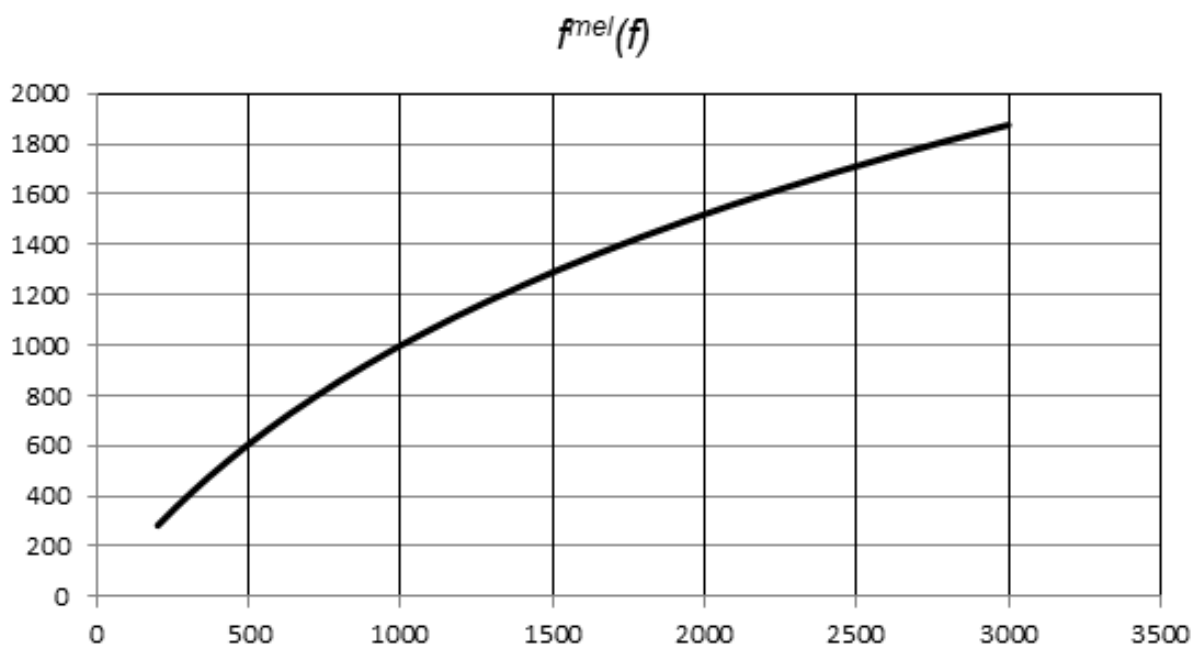


Рис. 3.14. Залежність MEL- частоти від частоти керуючого сигналу робото-технічної системи

Наклавши отриману шкалу на спектр фрейму, виконаємо перетворення відповідно до рівняння

$$f_i = \left\lfloor \frac{(f_s + 1) \cdot f_i^r}{F_{sr}} \right\rfloor,$$

де f_s – розмір фрейму дорівнює 512 Гц;

f_i^r – значення i - тої ($i=1,2,\dots,24$) частоти після зворотного перетворення;

F_{sr} – максимальна частота в уже згадуваному спектрі, у нашому випадку дорівнює 25000 Гц (обрана виходячи з акустичного діапазону в зоні контролю).

В результаті отримано набір значень частот спектру F_i сигналу керування (табл. 3.3.).

Таблиця 3.3 – Частоти спектру сигналу керування

i	$f(i)$	i	$f(i)$	i	$f(i)$	i	$f(i)$	i	f_i	i	f_i
1	4	6	10	11	18	16	28	21	42		61
2	5	7	11	12	20	17	31	22	46		
3	6	8	13	13	22	18	33	23	49		
4	7	9	14	14	24	19	36	24	53		
5	8	10	16	15	26	20	39	25	57		

Знаючи опорні точки спектру, побудуємо необхідні фільтри згідно системи рівнянь

$$H_m[k] = \begin{cases} 0 & k < f(m-1) \\ \frac{k - f(m-1)}{f(m) - f(m-1)} & f(m-1) \leq k \leq f(m) \\ \frac{f(m+1) - k}{f(m+1) - f(m)} & f(m) \leq k \leq f(m+1) \\ 0 & k > f(m+1) \end{cases}$$

Застосування фільтру полягає в попарному перемножуванні його значень зі значеннями спектра. Результатом цієї операції є MEL-коефіцієнт

$$S[m] = \ln \left(\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \cdot H_m[k], 0 \leq m < M \right).$$

Слід врахувати, що MEL- фільтри застосовують не до значень спектра, а до його енергії. Такий підхід значно знижує чутливість коефіцієнтів до шумів. Дискретне косинусне перетворення (DCT) використовується для того, щоб отримати MEL- коефіцієнти, які наведено на рис 3.15.

Тобто маємо підвищити значимість перших коефіцієнтів і зменшити значущість останніх. В даному випадку можна застосувати вираз

$$C[l] = \sum_{m=0}^{M-1} S[m] \cdot \cos(\pi l(m + 0.5) / M), 0 \leq l < M.$$

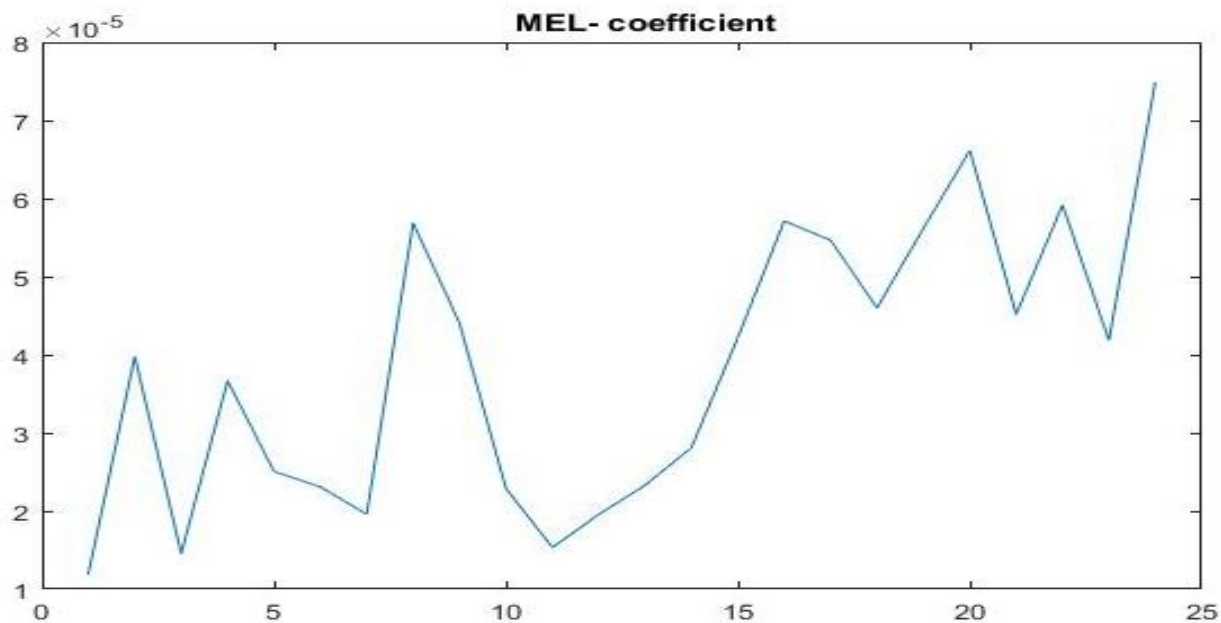


Рис. 3.15. Результати дискретного косинусного перетворення з метою отримання MEL- коефіцієнтів

У підсумку, для кожного фрейму, отримуємо набір з MFCC-коефіцієнтів, який буде використаний у подальшому аналізі.

Оскільки завдання полягає в розпізнаванні слова з деякого набору (може бути, в тому числі, і голосовим фоном на тлі перешкод навколишнього середовища-зони керування робото-технічної системи), то далі поставимо у відповідність кожному слову L наборів mfсс-коефіцієнтів відповідних записів. Цю відповідність позначимо як «CSC» (ComplianceSetCoefficients). Тепер завдання зводиться до підбору найбільш «близької» CSC для деякого набору mfсс-коефіцієнтів. Завдання вирішується в два етапи:

- для кожної CSC знаходимо середню відстань між ідентифікованим mfсс-вектором і векторами CSC;
- в якості правильної обираємо ту CSC, середня відстань до якої буде найкоротшою.

Отриманий набір MEL-значень (24 коефіцієнта) дозволяє замінити використання великого масиву відліків сигналу або спектра сигналу, що значно скорочує час обробки команд модулем ідентифікації мобільної робото-технічної системи, і тим самим, підвищує швидкодію системи «оператор – робото-технічна система». Також скорочення часу реакції даної системи пов'язане з підвищенням ефективності застосування голосових команд в умовах потужних радіоперешкод при керуванні роботом надає можливість застосувати підхід автономного адаптивного керування (ААУ).

Методологія ААУ дозволяє створювати адаптивні системи керування для додатків, в яких створення точних математичних моделей об'єкта керування ускладнене або неможливе. Використовуючи підсистеми, що входять до складу системи ААУ (блок датчиків, виконавчі органи, підсистеми формування й розпізнавання образів, база знань, підсистема моделювання емоцій, блок прийняття рішень), система ААУ накопичує емпірично знайдені знання про властивості об'єкта управління й знаходить спосіб керувати ним.

Для визначення координат осередку небезпеки унаслідок пожежі зовні об'єкту застосуємо ААУ на основі мереж нейроно-подібних елементів за допомогою застосування евристичних алгоритмів (ЕА).

Для реалізації інтелектуальних алгоритмів управління першочерговим є завдання поточної ідентифікації ситуації, в якій перебуває робото-технічна система. Для вирішення цього завдання використаємо структурну схему системи ситуативної ідентифікації рис. 3.16.

Блок технічного зору (ТЗ) і сенсорних почуттів призначений для визначення змін стану зовнішнього середовища й подання сенсорної карти середовища для подальшої обробки. Сенсорна карта середовища – це образ ситуації, в якій знаходиться робот в поточний момент часу. Інтервал часу побудови сенсорної карти обирається, виходячи зі специфіки предметної області.

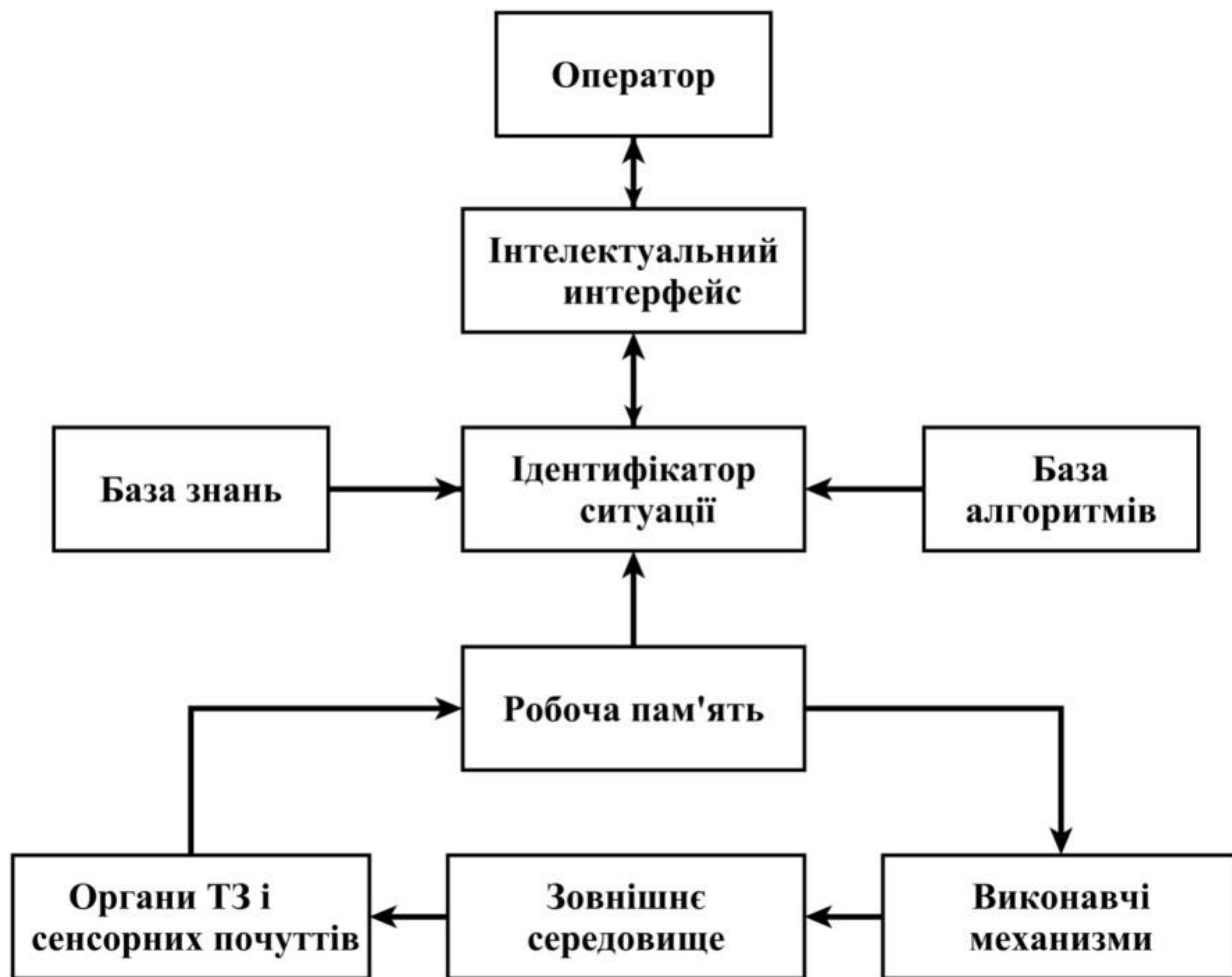


Рис. 3.16. Структурна схема ситуативної ідентифікації

При такому відборі «елементи множини» з високою придатністю з більшою ймовірністю будуть обиратися частіше, ніж елементи з низькою придатністю. Після

відбору, n обраних елементів випадковим чином розбиваються на $n/2$ пари. Для кожної пари з імовірністю P_s може застосовуватися кросинговер. Відповідно, з імовірністю $(1 - P_s)$ кросинговер не відбувається й незмінені елементи переходять на стадію створення стійкої характеристики.

Для застосування евристичного алгоритму до вирішення завдань автоматичного синтезу систем керування, необхідне зображення (код) «Характеристики» або «Параметра». У нашому випадку характеристика (властивість), яка являє собою закодований спеціальним чином кінцевий автомат.

Результат кодування – байт-рядок, що задає кінцевий автомат єдиним способом, наведено на рис. 3.17.

Розглянемо подання байт-рядка для кінцевого автомата з N станів з L вихідними впливами. Перший байт – номер початкового стану, його значення менше N .

Кожний з станів кодується таким чином: перший байт – номер вихідного впливу (наприклад, рух у вперед/назад, поворот на заданий кут), потім L байт – номери станів для переходу по вхідних впливах.

Таким чином, на початку байт-рядка йде один байт – номер початкового стану, а потім $N \cdot L$ байт – опис станів. Отриманий опис «характеристики» є одним з найпростіших. Це дозволяє ефективно застосовувати оператори «злиття» й «стійкої властивості».

Як зазначалося вище, евристичний алгоритм здійснює процес розвитку, схожий на біологічну еволюцію. В ході цього процесу застосовуються два основні інструменти – відбір та злиття. Для злиття застосовується спеціальний оператор, завдання якого – створення нової множини на основі подій попередньої ітерації.

В якості оператора злиття застосуємо операцію одно-точкового кросинговер. Він працює наступним чином: генерується випадкове натуральне число C , менше за довжину коду «характеристики». Потім обидві, від попередньої ітерації «характеристики» діляться на дві частини, перша з яких містить перші C властивості, а друга – ті, що залишилися, сукупність властивостей «характеристики». Два отриманих елементи знаходять шляхом складання нової

сукупності властивостей «характеристики» на основі частин сукупності властивостей «характеристики» обох попередніх «характеристик».

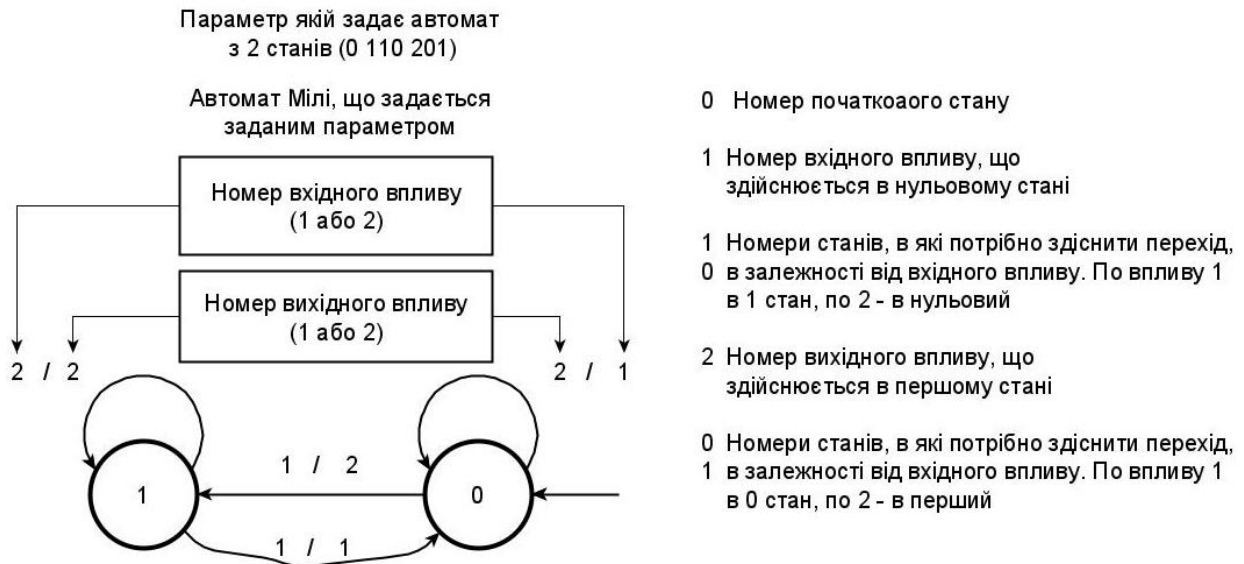


Рис.3.17. Кодування «Характеристики» (параметра)

Оператор отримання стійкої властивості здійснює випадкові зміни у сукупності властивостей «характеристики» випадкових подій. У нашому випадку, оператор отримання стійкої властивості змінює один (випадково обраний) байт в «характеристиках» п'яти випадкових подій.

Застосування такого підходу в інтелектуальних системах робото-технічних систем (РТС) дозволяє підвищити ступінь пристосовності автономних мобільних систем до змін навколишнього простору.

Отже, синтез системи ААУ є завданням великої розмірності, вирішити яке аналітично на даному етапі не вдається. Для вирішення цього завдання потрібно знати точну модель взаємозв'язку параметрів, що визначають систему, а також критерії, що характеризують успішність її реалізації. Такі характеристики можна отримати тільки за результатами спостережень за серією експериментів з моделювання поведінки системи ідентифікації осередку небезпеки зовні об'єкту.

Як зазначалось вище було сформульовано

$$q_{\text{інт}}^{\text{об}}(t) = f_{\text{нс}}^{\text{об}}(S(\text{НС}_{\text{об}}), T_{\text{нс}}, t(V_{\text{нс}}^{\text{об}})) t \in \Delta t (\text{НС}_{\text{об}})$$

$$\Psi_{\text{нс}}^j(t) = K_{\text{нс}}^S \cdot K_{\text{нс}}^T \cdot K_{\text{інт}}^S \cdot K_{\text{інт}}^T \cdot \chi_{\text{пр}}(t) \cdot \chi_{\text{тех}}(t) \cdot \chi_{\text{кор}}(t) S(\text{НС}_{\text{об}}) F_e(T_{\text{нс}})$$

за умови: $t \in \Delta t (\text{НС}_{\text{об}})$; $V_{\text{нс}} < V_{\text{нс}}^{\text{місц}}$.

З урахуванням розробки додаткових засобів поліпшення якості та швидкості прийняття рішення щодо запобігання розвитку осередку небезпеки (мається на увазі осередок загоряння, щовиник) отримано можливість:

- пристосовності автономних мобільних систем до змін навколишнього простору осередку небезпеки;
- отримати сукупність часових рядів, амплітудно-частотних характеристик, що характеризують параметри акустичної емісії, які генеруються при горінні компонент техногенного навантаження осередку небезпеки;
- отримати оптимальні параметри двох-факторного процесу ідентифікації небезпек осередку горіння, чітко ідентифікувати параметри процесу.

Тепер з урахуванням коригування впливу зовнішніх чинників, уточнень при формуванні та порівнянні акустичних образів, комбінована умова прийняття рішення має вигляд

$$Y(q_{\text{інт}}^{\text{об}}, \Psi_{\text{нс}}^j) = f_{\text{нс}}^{\text{об}}([\gamma_{\text{контр}}^{\text{нс}}], [\gamma_{\text{фор}}^{\text{нс}}], [\gamma_{\text{порів}}^{\text{нс}}]). \quad (3.7)$$

Сукупність символічних залежностей опису інтегрального показника небезпеки, акустичних образів з місця виникнення загоряння, ситуації розвитку горіння поза контрольованим об'єктом дає вираження основних умов попередження виникнення пожежі внаслідок розвитку горіння у осередку загоряння:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{\text{ІНТ}}^{\text{об}}(t) &= f_{\text{НС}}^{\text{об}} \left(S(\text{НС}_{\text{об}}), T_{\text{НС}}, t(V_{\text{НС}}^{\text{об}}) \right) \text{ за умови } t \in \Delta t(\text{НС}_{\text{об}}) \\
 \Psi_{\text{НС}}^j(t) &= K_{\text{НС}}^S \cdot K_{\text{НС}}^T \cdot K_{\text{ІНТ}}^S \cdot K_{\text{ІНТ}}^T \cdot \chi_{\text{пр}}(t) \cdot \chi_{\text{тех}}(t) \cdot \chi_{\text{кор}}(t) S(\text{НС}_{\text{об}}) F_e(T_{\text{НС}}) \\
 \Upsilon(q_{\text{ІНТ}}^{\text{об}}, \Psi_{\text{НС}}^j) &= f_{\Upsilon_{\text{НС}}}^{\text{об}}([\gamma_{\text{контр}}^{\text{НС}}], [\gamma_{\text{фор}}^{\text{НС}}], [\gamma_{\text{порів}}^{\text{НС}}])
 \end{aligned} \right\} (3.8)$$

Логічний взаємозв'язок цих виразів наведено на рис.3.18.

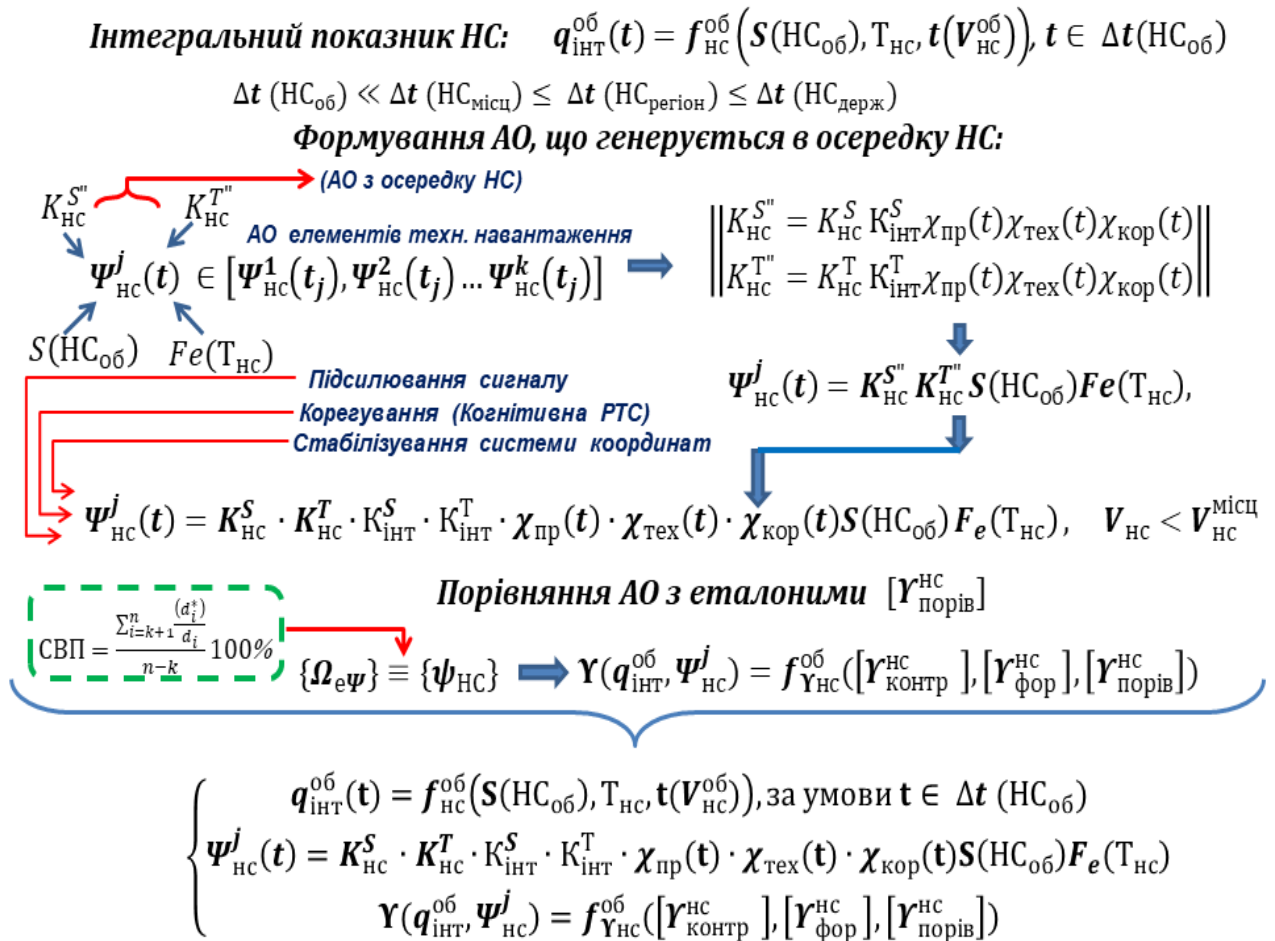


Рис. 3.18. Формування та виконання умов попередження розвитку пожежі зовні контрольованого об'єкту

3.3.2. Керуючий алгоритм раннього виявлення джерела горіння та запобігання пожежі зовні об'єкту. Схема керуючого алгоритму виявлення осередку загоряння та запобігання його розвитку зображена на рис. 3.19.), а схема взаємодії блоків керуючого алгоритму наведена на рис. 3.20. Алгоритм заснований з 14 блоків за наступними принципами:

- 1 – калібрування по еталонному сигналу небезпеки для перевірки працездатності засобів виявлення осередку небезпеки пожежі;
- 2 – запис фонового сигналу (тривалість запису залежить від особливостей частотних і амплітудних характеристик фону, на якому здійснюється процес);
- 3 – перевірка фону на характерні пікові частоти й амплітуди (ХПЧ) заданих частотних діапазонів для виключення помилкового виявлення;
- 4 – база даних еталонних акустичних спектрів (база еталонів небезпеки);
- 5 – блок управління записом, який залежать від особливостей фону й аналізу сигналу на кількість збігів характерних пікових амплітуд заданих частотних діапазонів. Отже, блоки 3, 4 і 5 формують модуль попередньої обробки сигналу.
- 6 – блок 6 спрацьовує у випадку відсутності характерних пікових амплітуд в записаному спектрі й відповідає за запис корисного сигналу;
- 7 – обробка корисного сигналу, формування акустичних образів небезпек, порівняння акустичних образів;
- 8 – блок формування управлінських рішень для функціонування автоматичних систем припинення горіння;
- 9 – блок складає процедуру визначення координат джерела загоряння;
- 10 – блок з формування й передачі управляючого рішення на систему попередження розвитку пожежі;
- 11 і 12 – блоки забезпечують усунення впливу шумів природного і техногенного характеру;
- 13 – блок оцінки якості запису сигналу з джерела загорання;
- 14 – блок усунення координатного зміщення системи фіксації.

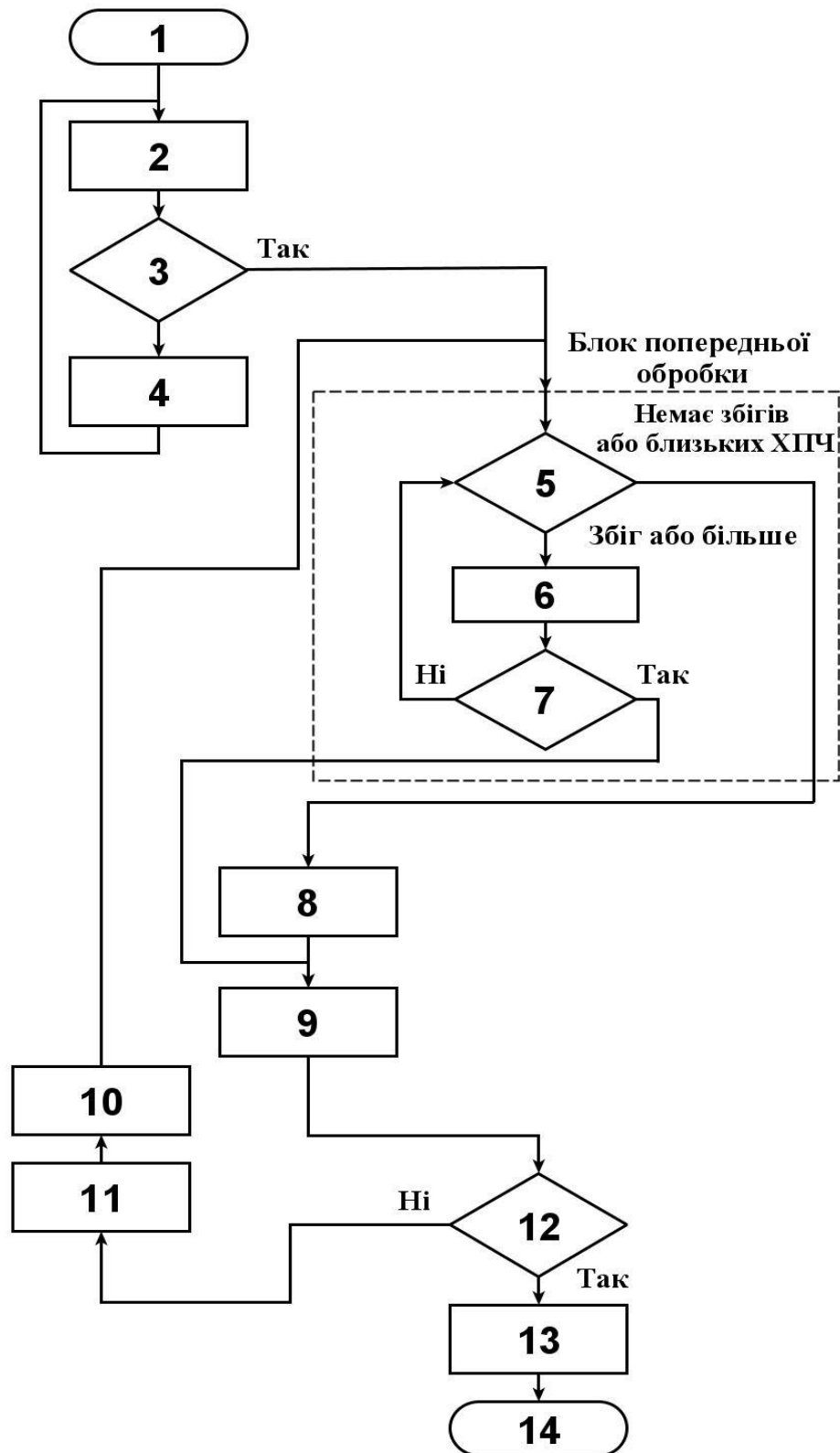


Рис. 3.19. Керуючий алгоритм акустичного методу попередження наслідків пожежі зовні об'єкту

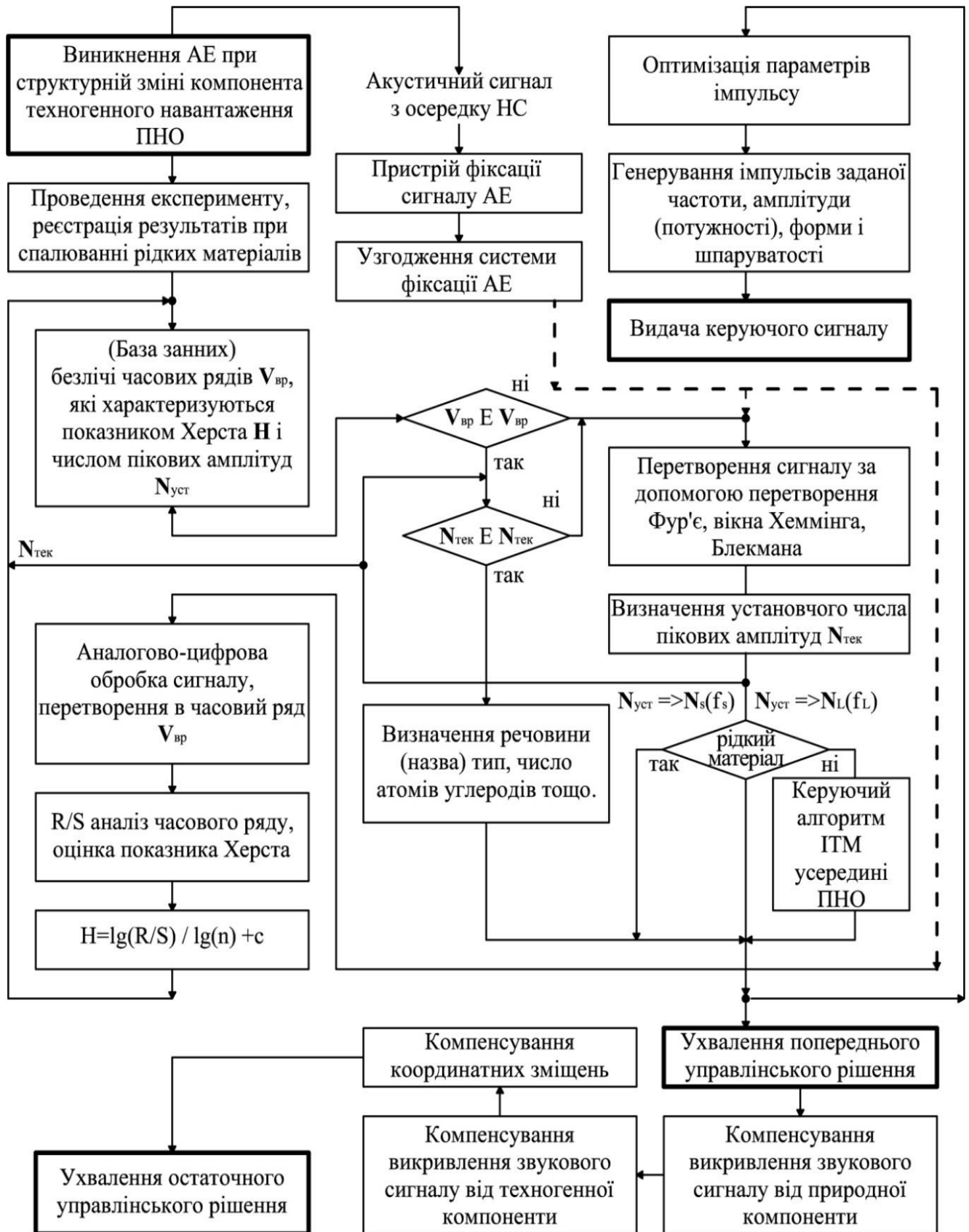


Рис. 3.20. Схема взаємодії основних блоків керуючого алгоритму акустичного методу попередження наслідків пожежі зовні об'єкту

Оскільки керуючий алгоритм в системі виявлення осередку пожежі зовні об'єкту повинен враховувати вплив на акустичні випромінювання природних та техногенних чинників, компенсувати координатні зміщення, його доповнено евристичним алгоритмом обробки процесу ідентифікації та робото-технічними системами, в тому числі мобільними.

Таким чином, керуючі алгоритми забезпечують реалізацію акустичного методу виявлення осередку загоряння та попередження наслідків пожежі як зовні, так і всередині об'єкту, формуючі умови попередження розвитку пожежі, та передбачають виконання наступних процедур: збір і систематизація даних; формалізація систематизованих даних; розв'язання задачі з розміщення пристроїв контролю акустичного випромінювання осередку; розв'язання задачі з формування акустичних образів небезпек осередку; задачі порівняння акустичних образів осередку з еталоном небезпек; прийняття управлінського рішення; аналіз ефективності процесу попередження надзвичайної ситуації унаслідок пожежі як всередині, так і зовні об'єкту після застосування штатних (та за необхідності спеціальних) засобів попередження.

Особливо враховано вплив та зміну зовнішніх природних та техногенних умов на прийом та якість акустичного сигналу від джерела загоряння. Для запобігання викривленню сигналу розроблено принципи штучного інтелекту та евристичних алгоритмів, робото-технічні системи контролю, що віддалено фіксують ситуацію поза зоною об'єкта за допомогою БПЛА і прискорюють процес прийняття рішення, в тому числі завдяки мобільній робото-технічній системі у разі аварійної ситуації.

Застосування компенсації викривлення акустичного спектру осередку надзвичайної ситуації унаслідок пожежі зовні потенційно небезпечного об'єкту; застосування посилення акустичного спектру осередку надзвичайної ситуації унаслідок пожежі зовні потенційно небезпечного об'єкту; прийняття управлінського рішення.

4 РОЗДІЛ

ЛАБОРАТОРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Лабораторна база експериментальних досліджень акустичних випромінювань із зони горіння та методика проведення експерименту

На базі розроблених методик проведення експериментів створено лабораторний комплекс у складі двох лабораторних установок.

Фізична модель відкритого горіння реалізується за допомогою лабораторної експериментальної установки, що містить мікрофон з малошумним підсилювачем та динамічним діапазоном від 50 до 18000 Гц; пристрій для запалювання горючої речовини, який не має акустичного шуму і знаходиться на відстані 30 см від мікрофона у спеціальній ємності з відкритою поверхнею, площею 65 см; пристрій для реєстрації акустичного сигналу. Об'єм рідких зразків становить 2мл, вага твердих – 10 г.

Обробка одержуваних спектрів акустичних коливань із зони процесу горіння проводилася відповідно до алгоритму [36-38] за допомогою готових комп'ютерних програм та програм, спеціально розроблених автором. Алгоритм включає кілька модулів:

- модуль перевірки працездатності системи виявлення осередку займання за еталонним сигналом;
- модуль запису фонового сигналу в середовищі, де проводиться детектування, з урахуванням особливостей частотно-амплітудних характеристик фону;
- модуль попередньої обробки сигналу;
- модуль запису корисного сигналу, його обробки та передачі інформації на виконання та прийняття рішення.

Для запису звукового файлу (часовий ряд) і миттєвих зрізів спектру використовувалося програмне забезпечення AdobeAudition CC v9.2, обробка й аналіз спектра аудіо файлу реалізовані в середовищі MatLab R2016b. В результаті для

кожного зразка речовини сформувалося по 3-5 і більше звукових файлів, оброблених часових рядів, що характеризують акустичний сигнал. Сигнал фіксувався кожні $2,2 \cdot 10^{-5}$ с до моменту припинення горіння, кількість відліків знаходиться в межах від $1,5 \cdot 10^6$ до $9,7 \cdot 10^6$. В підсумку отримана сукупність часових рядів і їх амплітудно-частотних характеристик.

Акустичний образ, що генерується процесом горіння різних матеріалів, відтворювався пасивним методом в режимі реального часу без прямого контакту.

Частотний діапазон вимірюваного акустичного сигналу, який реєструється з осередку надзвичайної ситуації унаслідок пожежі, лежить в області мовного частотного діапазону, що надає можливість застосувати у подальшому підхід, заснований на алгоритмах MFCC (метод кепстральних коефіцієнтів за шкалою MEL– а або Berk– а) для ідентифікації спектрів, як і при розпізнаванні мови. Акустичний сигнал досить не захищений у плані перешкодостійкості, тому необхідне вжиття заходів щодо вилучення корисного сигналу з фонових перешкод.

Сформована методика проведення натурних експериментів, із застосуванням розроблених лабораторних установок, дозволяє провести необхідну кількість досліджень, які всебічно охоплюють можливі варіативні комбінації техногенного навантаження, як всередині, так і зовні потенційно-небезпечних об'єктів, та представити їх результати у вигляді амплітудно-частотних акустичних спектрограм миттєвих спектрів осередків горіння та потенційно можливих виникнень пожежі.

4.2. Розрахунково-аналітичне визначення вимог до характеристик та формування складу реєстраційно-вимірювальної апаратури лабораторних установок

Для дослідження акустичних випромінювань із зони осередку загоряння необхідно визначити параметри акустичного чутливого елемента (АЧЕ), яким є акустична антена (мікрофон) або чутливий дифузор.

За умови розгляду плоских акустичних хвиль, як найбільш характерних для осередку небезпеки унаслідок пожежі, як всередині, так і зовні об'єкту енергетичним критерієм виявлення характерного частотного діапазону звукових коливань є його інтенсивність, яка визначається за виразом:

$$I_{ГорінняВиявл.}^{Акуст.} (F_{ГорінняВиявл.}^{Акуст.}, T_{Виявл.}^{Горіння}) = \frac{1}{T_{Виявл.}^{Горіння}} \times T_0 + \int_{T_0}^{T_{Виявл.}^{Горіння}} \frac{dP_{Горіння}^{Акуст.}(F_{ГорінняВиявл.}^{Акуст.})}{dS_{АЧЕ}^{АПП}} dt, \quad (4.1)$$

де T_0 – час початку горіння в осередку небезпеки НС;

$T_{Виявл.}^{Горіння}$ – час виявлення горіння;

$F_{ГорінняВиявл.}^{Акуст.}$ – частотний діапазон акустичних коливань;

$P_{Горіння}^{Акуст.}$ – потік енергії акустичних коливань в діапазоні частот $F_{ГорінняВиявл.}^{Акуст.}$

від горіння, які переносяться через АЧЕ площею $S_{АЧЕ}^{АПП}$.

Відповідно до формули (4.1) умова, яка визначає числове значення вектора щільності потоку енергії, визначається як

$$j = \frac{\Delta W}{\Delta S_{\perp} \Delta t},$$

де ΔW – енергія, що переноситься за час Δt через площадку ΔS_{\perp} , перпендикулярну до напрямку перенесення енергії.

Інтенсивність звуку для плоскої звукової хвилі має вигляд (4.2)

$$I_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}}, T_{\text{Виявл.}}^{\text{Горіння}} \right) = \frac{P_{\text{Горіння}}^{\text{Акуст.}2} \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right)_{T_{\text{Виявл.}}^{\text{Акуст.}}}}{2\rho \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right) v \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right)}, \quad (4.2)$$

де $P_{\text{Горіння}}^{\text{Акуст.}} \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right)$ – звуковий тиск на АЧЕ акустичних коливань в діапазоні частот $F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}}$ з осередку горіння;

$P_{\text{Горіння}}^{\text{Акуст.}2} \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right)_{T_{\text{Виявл.}}^{\text{Акуст.}}}$ – середнє за часом $T_{\text{Виявл.}}^{\text{Горіння}}$;

$\rho \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right)$ – густина середовища поширення звукових хвиль частотного діапазону $F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}}$ від джерела небезпеки;

$v \left(F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} \right)$ – швидкість поширення звукових хвиль частотного діапазону $F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}}$ від джерела небезпеки в середовищі при заданих температури й вологості.

Під час поширення небезпеки в осередку горіння процес акустичної емісії має імпульсний характер. У разі існування припущення, що інтенсивність акустичних коливань на вході АЧЕ пропорційна сумі енергій імпульсів акустичних коливань, які генеруються в ході акустичної емісії, має місце наступне рівняння:

$$I_{Горіння_{Виявл.}}^{Акуст.} \left(F_{Горіння_{виявл.}}^{Акуст.}, T_{Виявл.}^{Горіння} \right) \sim W_{Горіння}^{Акуст.імп.}, \quad (4.3)$$

де $W_{Горіння}^{Акуст.імп.} = W_{Горіння_i}^{Акуст.імп.} \cdot n$ – загальна енергія імпульсів акустичних коливань, що генеруються при горінні;

$w_{Горіння_i}^{Акуст.}$ – енергія окремого акустичного імпульсу, що випромінюється при горінні;

n – кількість імпульсів, від 1 до ∞ .

Отже, значення звукового тиску на вході чутливого елемента набуває вигляду :

$$P_{Горіння}^{Акуст.} \left(F_{Горіння_{Виявл.}}^{Акуст.} \right) \approx \sqrt{2W_{Горіння}^{Акуст.} \rho \left(F_{Горіння_{Виявл.}}^{Акуст.} \right) \nu \left(F_{Горіння_{Виявл.}}^{Акуст.} \right)} \quad (4.4)$$

Підставивши у вираз (4.4) мінімальне значення енергії одного імпульсу, а також умови поширення акустичних коливань в середовищі (для приміщень всередині об'єкту і на відкритій місцевості зовні, прийmemo за середню швидкість звуку при температурі середовища поширення от $+10 \div 50^\circ C$ і вологості 40 – 70% відповідно $\nu = 346,1$ м/с, а при температурах нижче нуля і вологості 40 – 90% відповідно $\nu = 325,4$ м/с, отримаємо $T = +10 \div 50^0 C$ для значення за виразом:

$$P_{Горіння}^{Акуст.} \left(F_{Горіння_{Виявл.}}^{Акуст.} \right) \approx \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 1,204 \cdot 346,1} = 9,127 \cdot 10^{-4} \text{ Па},$$

а для $T = -0,1 \div 20^\circ C$ значення за виразом:

$$P_{Горіння}^{Акуст.} \left(F_{Горіння_{Виявл.}}^{Акуст.} \right) \approx \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 1,204 \cdot 325,1} = 8,847 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (4.5)$$

Отримане значення більше, ніж заданий поріг, який становить $2 \cdot 10^{-5}$ Па, що відповідає частотному діапазону

$$F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} = 20 \div 24 \cdot 10^3 \text{ Гц.}$$

Відносно діапазону $F_{\text{ГорінняВиявл.}}^{\text{Акуст.}} = 1 \cdot 10^{-3} \div 20$ Гц велике значення має амплітуда коливань, і для цього діапазону застосовуються мікрофони спеціальної конструкції. Тому, в якості чутливого елемента оберемо мікрофонний капсуль першого класу, рівень власних шумів якого повинен задовольняти залежності

$$18 \geq 20 \lg \left(\frac{p_{ш}}{p_0} \right),$$

де p_0 – тиск порогу чутливості;

$p_{ш}$ – рівень власних шумів мікрофона.

На основі вище викладеного рівень власних шумів мікрофона дорівнює $p_{ш} \approx 1,589 \cdot 10^{-4}$ Па, що нижче значення, отриманого відповідно до виразу (4.5). Тому для пристрою реєстрації акустичних коливань, що генеруються в ході акустичної емісії при горінні в осередку пожежі, може бути застосований мікрофон з чутливістю не нижче $9,5 \cdot 10^{-4}$ Па. В дослідженнях використано капсуль Panasonic WM-61A, чії технічні характеристики цілком задовольняють визначеним вимогам.

Для забезпечення безшумного займання зразків горючих рідин був розроблений безконтактний бездротовий модуль, що складається з: блоку живлення постійного струму (БП), безконтактної бездротової схеми підпалу (ББСП) та елемента займання (ЕЗ). При такому підпалі вплив акустичних перешкод контактних пристроїв зведений до мінімуму.

Реєстрація хвильових акустичних випромінювань в процесі розвитку горіння здійснювалася за розробленою функціональною схемою та створеною відповідною лабораторною установкою (Рис 4.1).

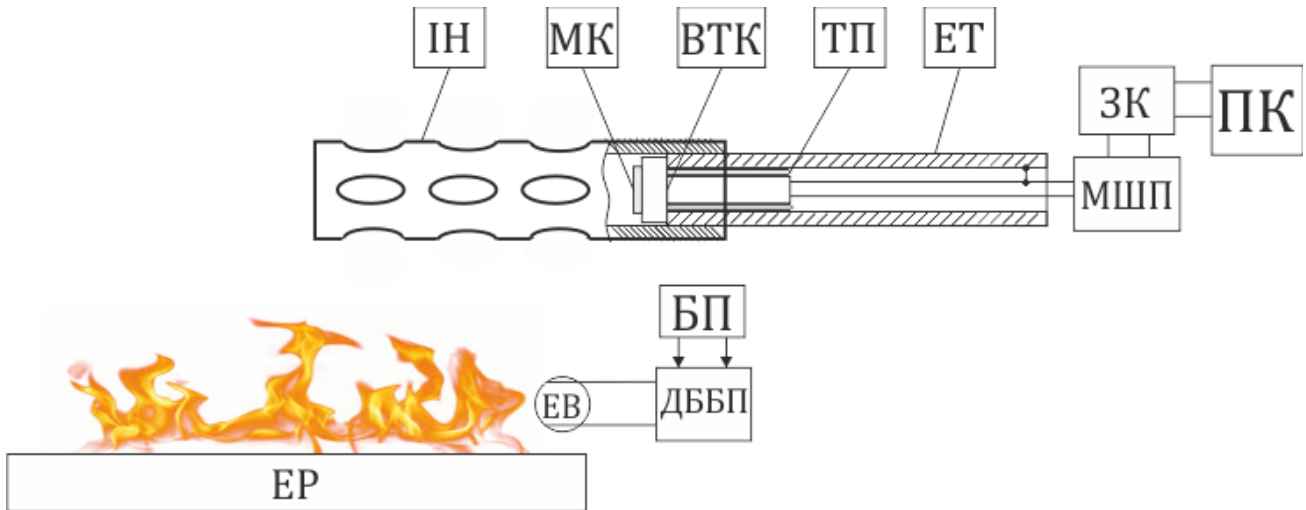


Рис. 4.1. Функціональна схема проведення досліджень з моделювання процесу ідентифікації розвитку горіння

Лабораторна установка складається з інтерференційного мікрофону, до складу якого входить:

1) МК – мікрофонний капсуль WM-61Ad = 6 мм. Звуковий тиск в еквіваленті вихідної електрорушійної сили (ЕРС) електрета, за умови 0дБ = $2 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \text{ Па} = 20 \lg(1/(2 \cdot 10^{-5})) = 94 \text{ дБ}$), то 94 дБ звукового тиску відповідають 21 mV середньоквадратичної напруги на виході мембрани мікрофону. Динамічна характеристика останнього наведена на рис.4.2.

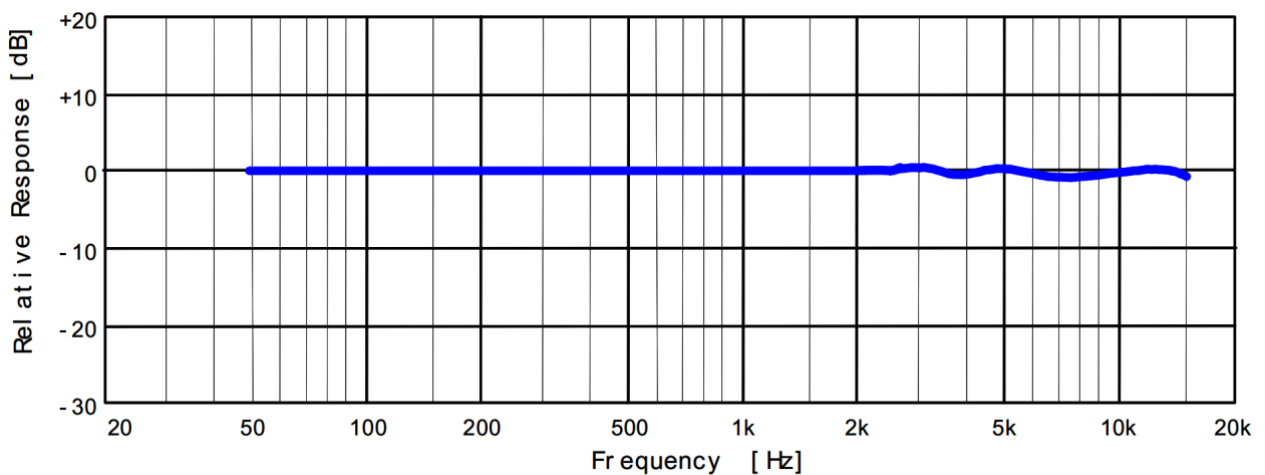


Рис. 4.2. Динамічна характеристика мікрофонного капсулю WM-61A

У зв'язку з тим, що характеристика має практично лінійний характер в діапазоні частот $50 \div 18000$ Гц, в діапазоні частот $5 \div 50$ Гц і $15 \div 25$ кГц, мікрофон може реєструвати сигнал зазначених частот без істотних викривлень, які не виходять за межі допустимої для даного завдання похибки;

2) ІН – інтерференційна насадка, для забезпечення більш високої чутливості та спрямованості мікрофонної діаграми, діаметром 12 мм і довжиною 100 мм;

3) Мідна термокомпенсаційна втулка ВТК (тримач капсуля), розміщена в екрануючій трубці (ЕТ) з неіржавіючої сталі через термоінтерфейс (ТП) ZalmanZM–STG2. Довжина трубки 500 мм.

Така конструкція дозволяє звести до мінімуму викривлення, пов'язані зі зміною параметрів напівпровідникового елемента капсуля мікрофону від температури, в зв'язку з тим, що частина вимірювань здійснюється в безпосередній близькості від полум'я.

Екрануючий провід від капсуля мікрофону припаяний до внутрішньої стінки екрануючої труби.

4) Малошумний підсилювач на базі K548УН1А має полосу пропускання $20 - 20000$ Гц, що також дозволяє фіксувати сигнал АЕ в діапазоні частот $5 - 20$ Гц і $20 - 25$ кГц.

5) Звукова карта AsusXonar DG-SI має смугу пропускання 10 Гц– 48 кГц, зі співвідношенням сигнал / шум – 109 дБ і 24 розрядним АЦП.

Завдяки наведеному технічному рішенню аналоговий сигнал акустичного випромінювання з осередку горіння записується з дискретністю 22 мкс, з достатньою для його подальшої обробки точністю.

6) Програмний додаток, де послідовно реалізовано сервер баз даних, який реалізує систему керування базами даних та знань, а також сервер додатків та правил, які реалізують систему прийняття рішень.

Загальний вигляд лабораторної установки з експериментального дослідження властивостей процесу акустичного випромінювання в осередку горіння наведено на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Лабораторна установка з експериментального дослідження властивостей процесу акустичного випромінювання в осередку горіння

Експериментальна установка реєстрації хвильових акустичних процесів випромінювання в процесі розвитку небезпеки в осередку горіння зовні об'єкту потребує додаткових пристроїв та засобів, спираючись на загальну функціональну схему проведення досліджень.

Була створена відповідна лабораторна установка (рис. 4.4), до складу якої входять.

1) Аеростат якірного типу з регулятором висоти, на платформі якого змонтовано установку у складі:

1.1) МК – мікрофонний капсуль WM– 61A $d = 6$ мм. Звуковий тиск в еквіваленті вихідної ЕРС електрета, за умови $0 \text{ дБ} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($1 \text{ Па} = 20 \lg(1 / (2 \cdot 10^{-5})) = 94 \text{ дБ}$), то 94 дБ звукового тиску відповідають 21 mV середньоквадратичної напруги на виході мембрани мікрофону;

1.2) ІН – інтерференційна насадка для забезпечення більш високої чутливості й спрямованості мікрофонної діаграми діаметром 12 мм і довжиною 100 мм ;

1.3) мідна термокомпенсаційна втулка ВТК (тримач капсуля), розміщена в екрануючій трубці (ЕТ) з неіржавіючої сталі через термоінтерфейс (ТІ) Zalman ZM-STG2. Довжина трубки 500 мм .

2) Блок безперебійного живлення, характеристики якого дозволяють системі приладів, розміщених на аеростаті, працювати в автономному режимі протягом 10 годин.

3) Система бездротової передачі отриманих сигналів на вхід системи інформаційної обробки, яка розміщена на землі стаціонарно у приміщенні.

4) Система інформаційної обробки у складі:

– пристрій приймання сигналів з аеростату;

– малошумний підсилювач на базі K548УН1А з половоюпропускання 20–20000 Гц, що також дозволяє фіксувати сигнал АЕ в діапазоні частот 5– 20 Гц і 20–25кГц;

– звукова карта Asus Xonar DG SI зі смугою пропускання 10 Гц–48кГц, співвідношенням сигнал / шум – 109 дБ і 24 розрядних АЦП.

5) Програмний додаток, де послідовно реалізовано сервер баз даних, який реалізує систему управління базами даних та знань, а також сервер додатків та правил, що реалізують систему прийняття рішень.

Приклад застосування лабораторної установки під час експериментального дослідження властивостей процесу акустичного випромінювання в осередку зовні контрольованого об'єкту наведено на рис. 4.4.

Таким чином, лабораторна база з експериментального дослідження властивостей акустичного випромінювання в осередку ситуації унаслідок пожежі складається з 2-х лабораторних установок:

– лабораторної установки з дослідження властивостей акустичного випромінювання в осередку загоряння **всередині об'єкту**, яка представляє собою модуль безконтактного загоряння, модуль ідентифікації та програмний додаток де реалізується розроблена математична модель та метод акустичної емісії щодо раннього виявлення осередків загоряння;

– лабораторної установки з дослідження властивостей акустичного випромінювання в осередку загоряння **зовні об'єкту**, яка представляє собою безпілотний аеростат, модуль ідентифікації, модуль передачі та прийняття інформаційного сигналу та програмний додаток, в якому реалізується розроблена

математична модель та метод акустичної емісії щодо раннього виявлення осередків загоряння.

В експерименті сигнал реєструвався всередині об'єкту при температурі повітря $T = 22,2^{\circ}\text{C}$ і вологості 52%.

Відстань до осередку горіння (ємності зі зразком) варіювалась від 0,30 см до 1.5 метрів.

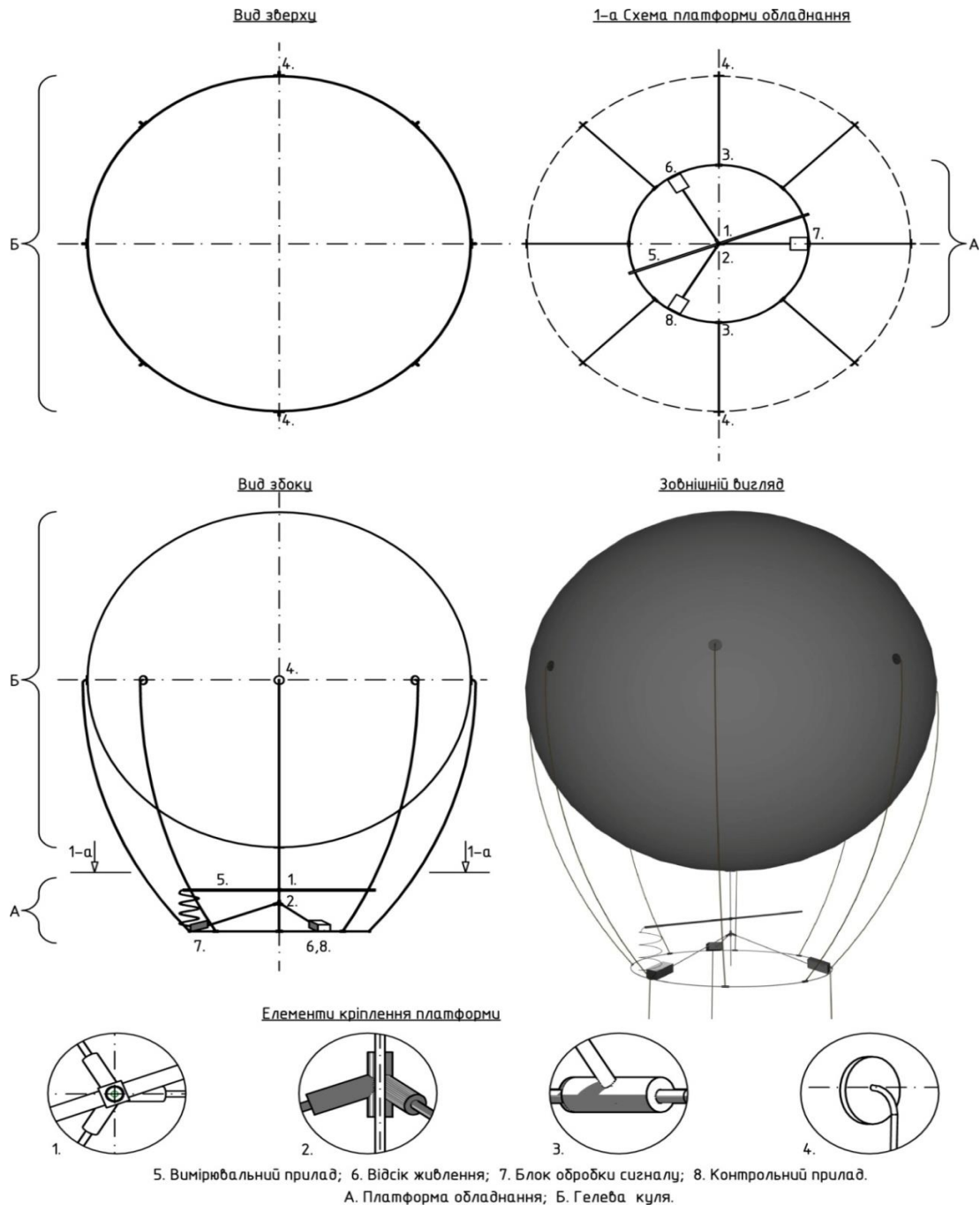


Рис. 4.4. Лабораторна установка з експериментального дослідження властивостей процесу акустичного випромінювання в осередку горіння зовні об'єкту

Як відомо, потужність акустичного випромінювання знижується в залежності від відстані та частоти. Чим нижча частота, тим менше загасання сигналу. В ході експериментів, як і очікувалося, відстань від вогнища впливала тільки на значення амплітуди.

На характер АЧХ відстань від осередку горіння не мала істотного впливу.

Результати експериментів та параметри зразків наведені в таблицях 4.1 – 4.6.: всередині об'єкту – табл. 4.3– 4.4; зовні об'єкту – табл. 4.5 – 4.6.

Таблиця 4.1.– Параметри зразків горючих матеріалів

Найменування техногенного навантаження	Маса зразків	Об'єм зразків	Геометрія зразків
Деревина(сосна)	≈10г	≈20 см ³	Брусочок
Вата	≈10г	≈454 см ³	–
Картон (пресований, товщиною 5 мм)	≈10г	≈ 14 см ³	Призма
Папір	≈10г	≈6,67 см ³	Аркуш
Бинт	≈10г	≈ 52 см ³	–

Таблиця 4.2.– Параметри зразків горючих матеріалів

Найменування техногенного навантаження	Маса зразків	Об'єм зразків	Вуглеводневий склад /формула
Ацетон	1,58 г	2 мл	C ₃ H ₆ O
Метанол	1,6	2 мл	CH ₄ O
Ізопропиловий спирт	1,57	2 мл	C ₃ H ₈ O
Ізоамиловий спирт	1,58	2 мл	C ₅ H ₁₂ O
Бутан	1,61	2 мл	C ₄ H ₁₀ O
Октан	1,63	2 мл	C ₈ H ₁₈ O
Бензин	1,78	2 мл	C _{7,95} H _{17,9}
Дизельне паливо	1,82	2 мл	C ₈ H ₁₈ – C ₁₇ H ₃₆
Парафін	2,1	2мл	C ₁₈ H ₃₈ – C ₃₅ H ₇₂
Нафта	1,8	2 мл	C _x H _y

Таблиця 4.3.– Результати експериментів для різних зразків деревини

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц					
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
1	2	3	4	5	6	7	8
Деревина	1	0.1	2.1	4.1	8.5	11.9	20.01
	2	0.12	2.9	5.2	9.2	12.4	20.8
	3	0.14	3.7	6.2	9.9	14.1	21.3
	4	0,11	3,4	4,5	8,9	12,3	20,5
	5	0,12	3,3	5,1	9,1	13,1	21,2
	6	0,14	3.7	6,1	8,6	13,3	20,4
	7	0,11	2,8	5,1	8,9	13,0	20,7
	8	0,12	3,3	6,0	9,2	12,7	20,4
	9	0,11	2,9	4,9	8,7	13,9	20,9
	10	0,14	3.7	5,5	9,1	12,1	20,6
	11	0,1	3,2	5,7	9,3	13,5	21,1
	12	0,12	3,4	4,4	8,6	12,3	20,6
	13	0,1	3,0	4,9	9,6	12,9	21,0
	14	0,13	2,9	5,1	9,4	13,1	21,2
	15	0,11	3,5	5,3	8,7	13,4	21,05
\bar{f}_i	–	0,12	3,19	5,21	9,05	12,93	20,78
$\pm t_{\gamma} s / \sqrt{n}$	–	0,007	0,24	0,34	0,22	0,36	0,20
Дов. інтервал	Л	0,12	2,98	4,90	8,85	12,62	20,60
	П	0,14	3,41	5,54	9,27	13,29	20,98

Таблиця 4.4.– Результати експериментів (ацетон)

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц						
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
Ацетон (кетон)	1	6,91	9,3	13,4	15,3	16,9	18,7	20,8
	2	7,1	9,6	13,5	15,4	17,3	19,1	21,1
	3	7,2	9,7	13,7	15,6	17,5	19,2	21,4
	4	7,1	9,5	13,4	15,1	17,0	18,8	21,0
	5	6,9	9,5	13,7	15,3	17,1	19,3	21,2
	6	7,2	9,3	13,7	15,7	17,6	18,9	21,3
	7	7,1	9,7	13,5	15,6	17,0	19,6	21,0
	8	7,0	9,4	13,4	15,3	16,9	18,7	20,9
	9	7,2	9,6	13,4	15,3	17,4	19,0	21,2
	10	7,1	9,3	13,6	15,5	16,9	18,9	21,3
	11	7,2	9,6	13,3	15,4	17,0	18,7	20,8
	12	6,9	9,8	13,7	15,2	17,1	19,4	20,9
	13	6,95	9,7	13,5	15,5	17,5	18,9	21,3
	14	7,1	9,5	13,7	15,7	17,2	19,2	21,01
	15	7,0	9,3	13,6	15,8	17,7	18,8	21,3
\bar{f}_i	–	7,06	9,52	13,54	15,45	17,20	19,01	21,10
$\pm t_\gamma s/\sqrt{n}$	–	0,063	0,1	0,08	0,11	0,15	0,15	0,11
Дов. інтервал	Л	6,85	9,20	13,27	15,06	16,69	18,49	20,72
	П	7,28	9,85	13,81	15,85	17,74	19,55	21,48

Таблиця 4.5.– Результати другої групи експериментів (бензин)

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц									
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
Бензин	1	1,01	2,8	3,8	4,9	5,9	8,9	10,3	12,1	13,9	16,4
	2	1,1	3,0	3,9	4,9	6,0	9,1	10,5	12,5	14,1	16,0
	3	1,12	3,2	4,2	5,2	6,2	9,3	10,7	12,8	14,5	15,3
	4	1,05	2,95	4,05	4,9	6,0	9,4	10,4	12,6	14,0	16,3
	5	1,09	3,0	3,9	5,1	5,9	9,2	10,5	12,1	13,8	15,3
	6	1,07	3,04	3,85	5,1	6,0	8,9	10,3	12,7	13,9	15,7
	7	1,05	2,9	3,8	5,0	6,1	9,2	10,6	12,4	14,3	15,9
	8	1,08	3,05	3,9	4,8	6,2	9,1	10,7	12,2	14,5	16,2
	9	1,11	3,6	4,1	5,0	5,9	9,2	10,3	12,4	14,4	15,8
	10	1,07	3,1	4,0	5,1	5,8	9,5	10,4	12,3	14,1	15,5
	11	1,00	3,07	3,8	5,0	5,9	9,0	10,4	12,1	14,3	16,1
	12	1,12	2,8	3,9	4,9	6,2	9,1	10,3	12,5	13,0	16,3
	13	1,1	3,1	3,7	5,0	6,1	9,3	10,6	12,8	14,2	15,8
	14	1,09	3,2	4,2	5,1	6,0	8,9	10,7	12,7	14,4	15,4
	15	1,1	3,0	4,1	5,2	6,1	9,5	10,3	12,5	13,8	15,7
\bar{f}_i	–	1,08	3,05	3,95	5,01	6,02	9,17	10,47	12,45	14,11	15,85
$\pm t_\gamma s/\sqrt{n}$	–	0,02	0,11	0,085	0,066	0,07	0,112	0,088	0,137	0,161	0,204
Дов. інтервал	Л	1,01	2,69	3,65	4,79	5,78	8,79	10,17	11,98	13,56	15,2
	П	1,14	3,41	4,24	5,24	6,26	9,55	10,77	12,90	14,63	16,5

Таблиця 4.6.– Результати другої групи експериментів (дизельне паливо)

	№	Характерні пікові частоти, кГц										
		f_1	F_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1	0,19	0,8	1,9	2,9	5,2	5,8	7,5	8,9	10,6	13,0	15,4
	2	0,23	1,1	2,1	3,1	5,2	6,1	7,7	8,9	10,9	13,1	15,5
	3	0,25	1,2	2,2	3,2	5,5	6,2	7,9	9,1	10,9	13,2	15,7
	4	0,24	1,1	1,9	2,9	5,2	5,8	7,8	9,0	10,7	12,9	15,5
	5	0,23	0,9	2,0	3,2	5,4	5,9	7,5	8,8	10,6	13,1	15,7
	6	0,19	0,9	2,2	3,1	5,3	5,8	7,6	8,9	10,7	13,2	15,4
Дизельнепаливо	7	0,21	0,8	1,9	2,9	5,2	6,1	7,5	8,9	10,8	13,1	15,6
	8	0,24	0,8	2,0	3,0	5,1	6,0	7,9	8,8	10,7	13,0	15,7
	9	0,22	1,1	2,2	3,1	5,3	5,8	7,6	9,0	10,9	13,2	15,4
	10	0,21	1,0	2,1	3,2	5,4	5,9	7,7	9,1	10,8	12,9	15,5
	11	0,25	0,9	1,9	3,0	5,2	5,8	7,5	8,9	10,6	13,2	15,6
	12	0,24	1,2	2,2	3,0	5,3	6,0	7,8	9,1	10,7	13,0	15,4
	13	0,19	1,0	2,0	2,9	5,0	5,8	7,6	8,9	10,7	13,1	15,6
	14	0,22	0,8	2,1	3,3	5,1	6,1	7,8	9,2	10,9	12,9	15,5
	15	0,25	0,9	2,0	3,1	5,5	6,2	7,9	9,1	10,8	13,0	15,4
\bar{f}_t	–	0,22	0,97	2,05	3,06	5,26	5,95	7,69	8,97	10,79	13,06	15,53
$\pm t_{s/\sqrt{n}}$	–	0,013	0,08	0,065	0,07	0,08	0,09	0,09	0,07	0,06	0,06	0,064
Дов. інтервал	Л	0,18	0,69	1,82	2,81	4,98	5,66	7,39	8,74	10,59	12,85	15,31
	П	0,26	1,24	2,27	3,30	5,54	6,25	7,98	9,21	10,98	13,27	15,75

Для ідентифікації речовини введемо коефіцієнт допустимого відхилення значення частоти на екстремумі АЧХ – (K_{vs}) в діапазоні від 400 до 600 Гц.

Слід зазначити, що частотний діапазон вимірюваного акустичного сигналу, який реєструється з осередку надзвичайної ситуації унаслідок пожежі, лежить в області мовного частотного діапазону, що надає можливість застосувати у подальшому підхід, заснований на алгоритмах MFCC (метод кепстральних коефіцієнтів за шкалою MEL– а або Berk– а) для ідентифікації спектрів, як і при

розпізнаванні мови. Тому сформована методика проведення натурних експериментів із застосуванням розроблених раніше лабораторних установок, дозволяє провести необхідну кількість досліджень, які всебічно охоплюють можливі варіативні комбінації техногенного навантаження, як всередині, так і зовні потенційно-небезпечних об'єктів, та представити їх результати у вигляді амплітудно-частотних акустичних спектрограм миттєвих спектрів осередків поширення небезпеки надзвичайних ситуацій унаслідок пожежі.

При виконанні ідентифікації спектрів зовні об'єкту отримані характерні значення частот досліджуваних зразків. Реєстрація сигналу АЕ з осередку горіння проводилася на відкритій місцевості при $T = 26,2^{\circ}\text{C}$ і вологості 60 %. Відстань до осередку горіння (ємності зі зразком) складала відповідно від 10 см до 50 метрів.

Як зазначалося вище, відстань від осередку впливає тільки на значення амплітуди і на характер АЧХ не здійснює істотного впливу.

При проведенні експериментів зовні об'єкту враховувалися сила та напрям вітру. З метою досягнення високої достовірності результатів було внесено ряд змін в керуючий алгоритм. Зміни стосувалися довжини і енергії спектру, характерних сплесків в спектрах АЕ з осередку горіння. Результати уточнюючих експериментів зовні об'єкту наведено у табл. 4.7 – 4.8.

Таблиця 4.7.– Результати уточнюючих експериментів (дизельне пальне)

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц										
		f1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Дизельне пальне	1	0,19	0,8	1,9	2,9	5,2	5,8	7,6	8,8	9,9	12,8	15,1
	2	0,2	0,9	1,95	3	5,2	5,7	7,55	8,9	10,6	12,8	15,3
	3	0,23	1,1	2,1	3,1	5,3	6,1	7,75	8,9	10,7	12,9	15,5
	4	0,24	1,1	2,11	3,1	5,4	6,1	7,8	9	10,5	13,1	15,6
	5	0,25	1,3	2,2	3,3	5,5	6,3	8,1	9,2	10,7	13,4	15,9
\bar{f}_i	–	0,224	1,14	2,022	3,08	5,32	5,96	7,79	8,96	10,40	13,0	15,48
$\pm t, s/\sqrt{n}$	–	0,027	0,18	0,164	0,18	0,162	0,3	0,234	0,19	0,412	0,316	0,38
Дов. інтервал	Л	0,95	2,68	3,58	4,54	5,69	8,66	10,21	11,88	13,75	15,76	0,95
	П	1,33	3,36	4,31	5,40	6,67	9,34	11,29	12,87	14,84	16,99	1,33

Таблиця 4.8 – Результати уточнюючих експериментів (бензин)

Матеріал	№	Характерні пікові частоти, кГц									
		f1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Бензин	1	1,01	2,8	3,7	4,7	5,8	8,7	10,4	11,9	13,9	15,9
	2	1,1	2,9	3,8	4,8	6,1	9	10,5	12,5	14,1	16,2
	3	1,12	3	3,9	4,9	6,2	9,1	10,7	12,6	14,3	16,4
	4	1,2	3,1	4,1	5,1	6,3	9,1	11	12,7	14,5	16,7
	5	1,3	3,3	4,2	5,3	6,6	9,3	11,1	12,8	14,7	16,8
\bar{f}_i	–	1,15	3,02	3,94	4,96	6,2	9,04	10,7	12,5	14,3	16,4
$\pm t_{\gamma,s}/\sqrt{n}$	–	0,13	0,24	0,26	0,3	0,36	0,27	0,38	0,44	0,39	0,46
Дов. інтервал	Л	0,95	2,68	3,58	4,54	5,69	8,66	10,21	11,88	13,75	15,76
	П	1,33	3,36	4,31	5,40	6,67	9,34	11,29	12,87	14,84	16,99

Таблиця 4.9.– Значення показника Херста для часових рядів звукового сигналу при горінні зразків легкозаймистих рідин

№	Н (показник Херста)	КОМПОНЕНТИ							
		Метанол	Ізоаміл. Спирт	Октанол	Ацетон	Сира Нафта	Бензин	Дизельне паливо	Парафін
1	H ₁	0.271	0.33	0.34	0.71	0.61	0.45	0.32	0.39
2	H ₂	0.307	0.36	0.36	0.67	0.57	0.34	0.34	0.34
3	H ₃	0.288	0.38	0.33	0.70	0.52	0.42	0,35	0,314
4	H ₄	0.310	0.37	0,35	0,68	0,58	0,37	0,33	0,327
5	H ₅	0,28	0,34	0,34	0,69	0,56	0,410	0,34	0,364
6	H ₆	0,3	0,347	0,36	0,71	0,55	0,405	0,335	0,381
7	H ₇	0,305	0,379	0,36	0,69	0,60	0,378	0,329	0,372
8	H ₈	0,289	0,35	0,36	0,68	0,61	0,415	0,347	0,36
9	H ₉	0,31	0,369	0,34	0,69	0,58	0,427	0,329	0,354
10	H ₁₀	0,29	0,38	0,35	0,71	0,57	0,430	0,33	0,388
\bar{H}_i	–	0,295	0,3605	0,349	0,693	0,575	0,399	0,335	0,359
$\pm t_{\gamma,s}/\sqrt{n}$	–	0,01	0,0128	0,008	0,010	0,020	0,023	0,007	0,018
Дов. інтервал	Л	0,2691	0,3257	0,3276	0,666	0,5218	0,3407	0,3167	0,3100
	П	0,320	0,3939	0,3694	0,7194	0,6270	0,4586	0,3521	0,4066

Таблиця 4.10.– Значення показника Херста для часових рядів звукового сигналу при горінні зразків целюлозомістких речовин

Номер	Показник Херста	Дерево	Вага	Картон	Папір
1	H_1	0.32849	0.1694	0.2582	0.3152
2	H_2	0.29671	0.1612	0.2791	0.3048
3	H_3	0.31064	0.1631	0.2769	0.3002
4	H_4	0,31021	0,1682	0,2705	0,3101
5	H_5	0,3024	0,1690	0,2604	0,3081
6	H_6	0,2975	0,17	0,2784	0,3171
7	H_7	0,3101	0,1687	0,2769	0,2998
8	H_8	0,32051	0,171	0,2714	0,3141
9	H_9	0,2998	0.1642	0,2699	0,3119
10	H_{10}	0,3129	0,1698	0,2703	0,3148
\bar{H}_i	–	0,3096	0,1675	0,2714	0,3096
$\pm t_{\gamma,s}/\sqrt{n}$	–	0,00714	0,00245	0,00518	0,00446
дов.	Л	0,291062	0,161124	0,25793	0,298013
інтервал	П	0,328491	0,173314	0,283773	0,320888

4.3. Оцінка похибки результатів експериментальних вимірювань та порівняння їх з результатами імітаційного моделювання

Припустимо, що систематичні похибки в результатах спостережень відсутні або виключені. Можна лише з певною часткою ймовірності стверджувати, що істинне значення вимірюваної величини знаходиться в межах розкиду значень результатів спостережень. Проте залишається невизначеним, наскільки ймовірною є поява того чи іншого значення похибки.

Розглянемо групу з n незалежних результатів спостережень випадкової величини x , що підкоряється нормальному розподілу σ . Оцінка розсіювання одиничних результатів спостережень в групі щодо середнього їх значення \bar{x} обчислюється за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (4.6)$$

Повторивши багаторазово серії спостережень і обчислюючи кожен раз їх середнє арифметичне значення, яке приймається за результат вимірювання, можна переконатися в розсіянні середніх арифметичних значень, характеристикою яких, за виразом (4.7), є середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного S_x^-

$$S_x^- = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.7)$$

Середнє квадратичне відхилення S_x^- використовується для оцінки похибки результату вимірів з багаторазовими спостереженнями.

У разі нормального закону розподілу, щільності ймовірностей результатів спостережень і невеликого числа спостережень середнє арифметичне підкоряється закону розподілу Стьюдента з тим же середнім арифметичним значенням. Особливістю цього розподілу є те, що довірчий інтервал зі зменшенням числа спостережень розширюється в порівнянні з нормальним законом розподілу за тієї ж довірчої ймовірності. Для оцінки довірчих меж випадкової похибки в цьому випадку застосовується наступне рівняння

$$P\left(\left|\frac{\bar{x} - a}{s/\sqrt{n}}\right| < t_\gamma\right) = \gamma, \quad (4.8)$$

де \bar{x} – емпіричне математичне очікування (середнє арифметичне за вибіркою);

a – математичне очікування випадкової величини, розподіленої за нормальним законом;

s^2 – емпірична дисперсія;

n – обсяг вибірки;

t_γ – коефіцієнт розподілу Стьюдента, який залежить від числа спостережень і обраної довірчої ймовірності.

У даному випадку для 15 вимірювань маємо $t_\gamma = 2.151$, для 10 – $t_\gamma = 2.226$, для 5 – $t_\gamma = 2.776$.

З рівняння (4.8) отримаємо вираз з обчислення довірчого інтервалу для математичного очікування a випадкової величини з достовірністю γ :

$$\bar{x} - t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}} < a < \bar{x} + t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (4.9)$$

З урахуванням значень $n = 15$ та $t_\gamma = 2.151$

$$\bar{x} - 2.15 \frac{s}{\sqrt{15}} < a < \bar{x} + 2.15 \frac{s}{\sqrt{15}}. \quad (4.10)$$

Методика статистичної обробки результатів вимірювання з багаторазовими спостереженнями відповідно до критерію Стьюдента повинна враховувати, що результати спостережень можуть містити систематичну похибку, а в групі спостережень x_i можуть зустрічатися грубі похибки, при цьому розподіл випадкових похибок може відрізнятися від нормального.

З урахуванням вище наведеного алгоритм обробки результатів спостережень наступний.

1) Виключаємо з результатів спостережень шляхом введення відповідних поправок відомі систематичні похибки.

2) Обчислюємо середнє арифметичне значення виправлених результатів спостережень за виразом $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ та прийняти його в якості результату вимірювання.

3) Оцінюємо розсіювання одиничних результатів спостережень в групі щодо середнього їх значення \bar{x} , для чого обчислюємо за формулою (4.7) значення дисперсії σ_i , перевіряємо наявність грубих похибок в групі спостережень, враховуючи, що при нормальному законі розподілу жодна випадкова похибка $x_i - \bar{x}$ з ймовірністю, що практично дорівнює одиниці, не може вийти за межі $\pm 3\sigma$.

4) Обчислюємо середнє відхилення S_x^- результату вимірювання за формулою (4.8) для оцінки похибки результату вимірів з багаторазовими спостереженнями.

5) Доводимо, що результати спостережень належать нормальному розподілу.

6) Обчислюємо довірчий інтервал для математичного очікування випадкової величини з надійністю γ за формулою (4.9).

На рисунках по осі y наведена щільність ймовірності значень кожної характерної частоти акустичного спектру, які попадають в умовний інтервал представлений по осі x .

Для усіх наведених груп експериментів маємо нормальний закон розподілу результатів. Перевіримо графічно гіпотезу про те, що результати двох груп експериментів (табл.4.5 и табл.4.8) належать до нормального розподілу, для цього побудуємо відповідні гістограми (рис.4.5; 4,6).

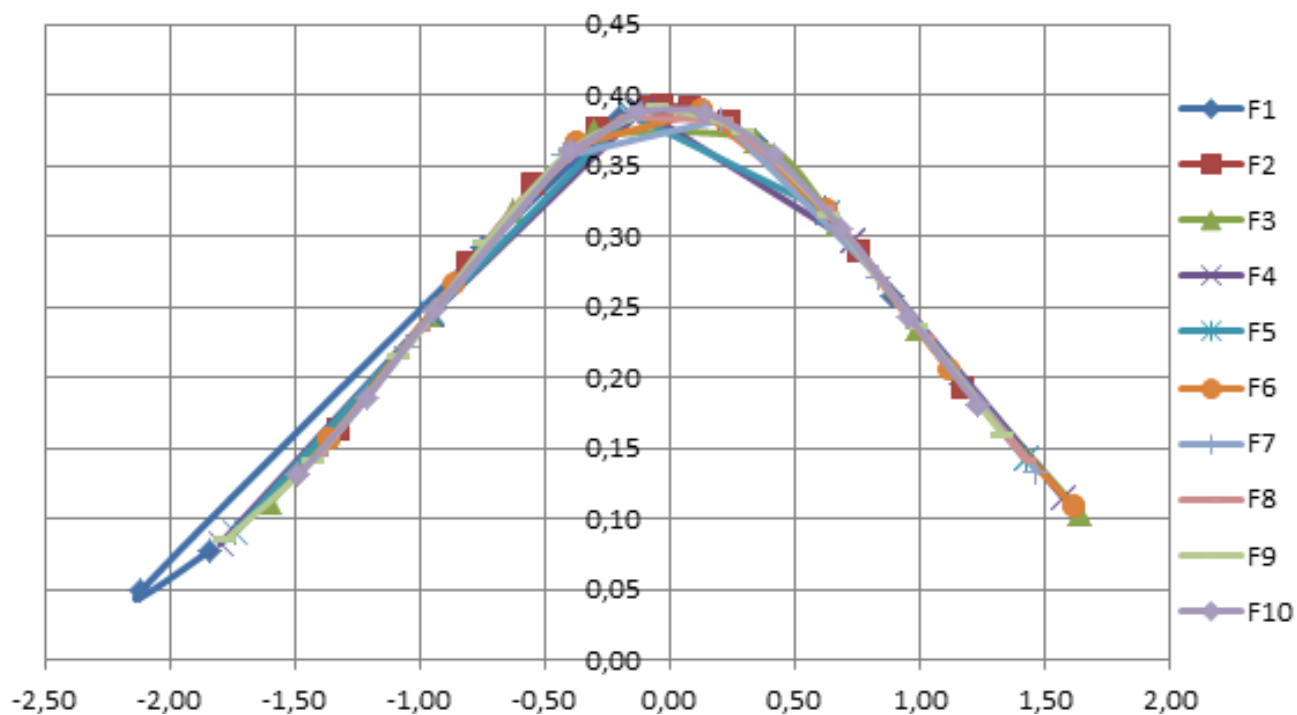


Рис. 4.5. Гістограма результатів розподілу характерних частот акустичного сигналу при горінні бензину, перша група експериментів

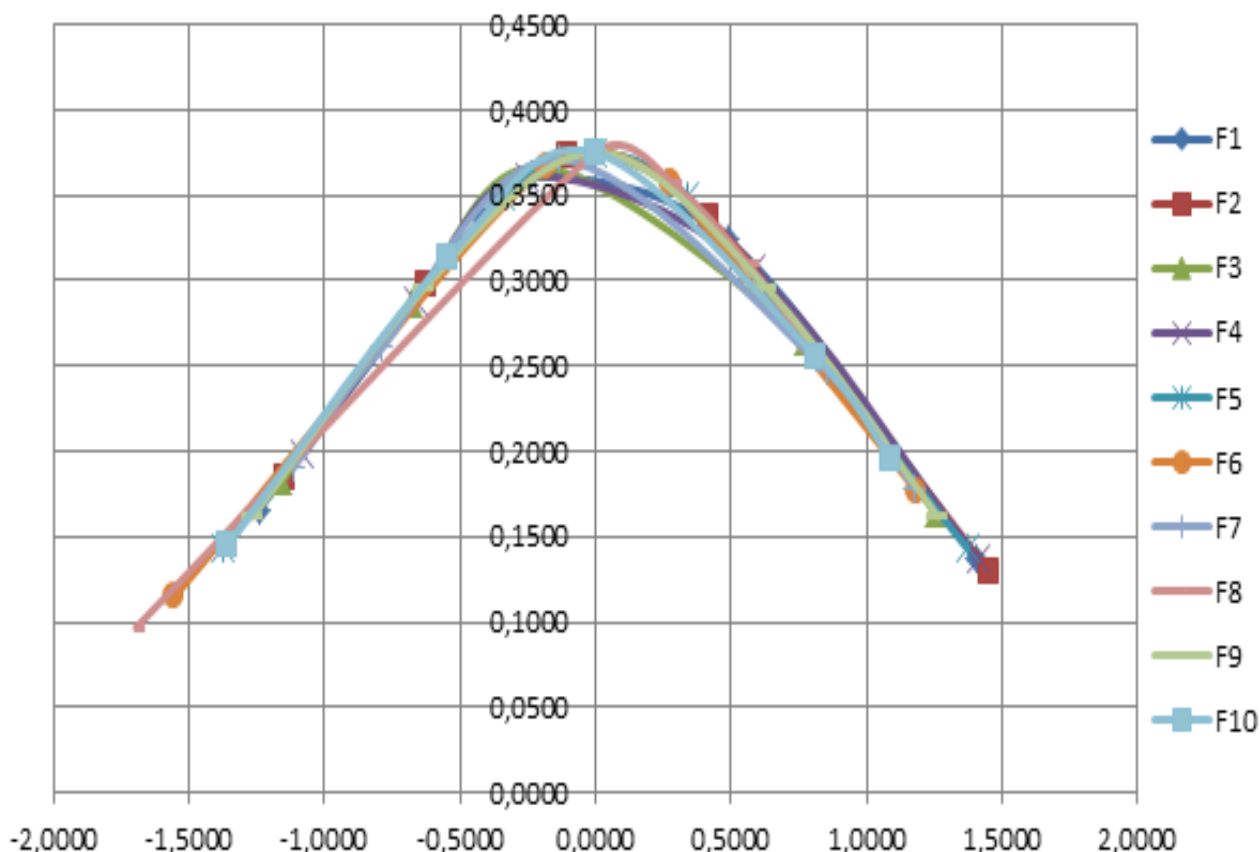


Рис. 4.6. Гістограма результатів розподілу характерних частот акустичного сигналу при горінні бензину, уточнена група експериментів

Для усіх наведених груп експериментів маємо нормальний закон розподілу результатів. Оцінка похибки результатів експериментальних вимірювань та порівняння їх з результатами імітаційного моделювання представлена безпосередньо у другому розділі.

Достовірність та надійність результатів застосування наведеної процедури інженерно-технічних методів підтверджується ідентичністю результатів натурних експериментів з результатами імітаційного моделювання, укладанням в довірчі інтервали, які розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стьюдента.

Сформована методика проведення натурних експериментів, із застосуванням розроблених лабораторних установок, дозволяє провести необхідну кількість досліджень, які всебічно охоплюють можливі варіативні комбінації техногенного навантаження, як всередині, так і зовні контрольованих об'єктів, та представити їх

результати у вигляді амплітудно-частотних акустичних спектрограм миттєвих спектрів осередків горіння різних матеріалів.

Результати експериментів співпадають з результатами імітаційних моделей, укладаються в довірчі інтервали, розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стьюдента, що підтверджує адекватність та надійність отриманих експериментальних значень фізичних величин та заснованих на них аналітичних та математичних уявлень.

РЕЗЮМЕ

Використання енергії горіння стало запорукою соціального розвитку людства, що однак не вберегло його від одного з найбільш руйнівних явищ техногенного та природного характеру – пожеж. Проблема раннього виявлення осередку горіння і швидка його ліквідація для уникнення наслідків пожежі, залишається неминучим викликом. У монографії для раннього виявлення осередку загоряння розглядається використання акустичних випромінювань, що супроводжують процеси горіння.

Обраний напрямок досліджень знаходиться на перетині різних наукових напрямків, що завжди є продуктивним. Запропоновано принципово новий підхід зі створення ефективного методу акустичної емісії визначення параметрів процесу термодеструкції матеріалу (речовини) внаслідок займання. Для аналізу процесу використовується «живий» аналоговий сигнал, що надходить із зони випромінювання. Вирішує завдання ідентифікації та прогнозування фрактальний R/S аналіз часових рядів. Енергетичні "сплески" (характерні екстремуми амплітуд) горіння встановлюються традиційним спектральним аналізом.

Науково обґрунтований метод дозволяє встановити факт загорання (енергетичного критерію), сформулювати акустичний образ осередку горіння, отримати можливість ідентифікації матеріалу, що загорівся, і створити базу акустичних еталонів безпеки.

На основі розробленого методу акустичної емісії, що оперує характеристиками акустичних випромінювань при горінні різних матеріалів та можливістю порівняння акустичного образу осередку загоряння з еталоном небезпек представлено інженерно-технічний метод виявлення осередку горіння та способів раннього попередження розвитку пожежі як всередині, так і зовні контрольованого об'єкту.

Особливо враховано вплив та зміну зовнішніх природних та техногенних умов на прийом та якість акустичного сигналу від джерела загоряння. Для запобігання викривленню сигналу розроблено принципи штучного інтелекту та евристичних алгоритмів, робото-технічні системи контролю, що віддалено фіксують ситуацію

поза зоною об'єкта за допомогою БПЛА і прискорюють процес прийняття рішення згідно керуючого алгоритму, в тому числі завдяки мобільній робото-технічній системі у разі аварійної ситуації. Керуючі алгоритми забезпечують реалізацію акустичного методу виявлення осередку загоряння та попередження наслідків пожежі як зовні, так і всередині об'єкту, формуючі умови попередження розвитку пожежі, та передбачають виконання наступних процедур: збір і систематизація даних; формалізація систематизованих даних; розв'язання задачі з розміщення пристроїв контролю акустичного випромінювання осередку; розв'язання задачі з формування акустичних образів небезпек осередку; задачі порівняння акустичних образів осередку з еталоном небезпек; прийняття управлінського рішення; аналіз ефективності процесу попередження надзвичайної ситуації унаслідок пожежі як всередині, так і зовні об'єкту після застосування штатних (та за необхідності спеціальних) засобів попередження.

Сформована методика проведення натурних експериментів, із застосуванням розроблених лабораторних установок, дозволяє провести необхідну кількість досліджень, які всебічно охоплюють можливі варіативні комбінації техногенного навантаження, як всередині, так і зовні контрольованих об'єктів, та представити їх результати у вигляді амплітудно-частотних акустичних спектрограм миттєвих спектрів осередків горіння різних матеріалів. Результати експериментів співпадають з результатами імітаційних моделей, укладаються в довірчі інтервали, розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стьюдента, що підтверджує адекватність та надійність отриманих експериментальних значень фізичних величин та заснованих на них аналітичних та математичних уявлень.

Список літератури

1. International Association of Fire and Rescue Services. World Fire Statistics/ N.Brushlinsky, S.Sokolov, P. Wagner//CTIF_Report27.– 2022.–№27.–65p.
2. ТСН (Телевізійна служба новин). URL: <https://tsn.ua/ru/ukrayina/v-ukraine-v-srednem-kazhdye-sem-minut-proishodit-pozhar-a-kazhdy-den-v-ogne-pogibaet-pyat-chelovek-395434.html>. (дата звернення: 10.12.2019).
3. Zervas, E.; Mripoudisb, A.; Anagnostopoulos, C.; Sekkasb, O.; Hadjiefthymiades, S. Multisensor data fusion for fire detection. Inf. Fusion 2011, 12, 150–159.
4. Karter, M.J. False Alarm Activity in the US 2012; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2013.
5. Ahrens, M. Trends and Patterns of US Fire Loss; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2017.
6. National Fire Data System. Available online: http://www.nfds.go.kr/fr_fact_0101.jsf (accessed on 12 March 2019).
7. Carpinteri, A.; Lacidogna, G.; Pugno, N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring. Eng. Fract. Mech. 2007, 74, 273–289.
8. Carpinteri, A.; Lacidogna, G.; Puzzi, S. From criticality to final collapse: Evolution of the b-value from 1.5 to 1.0. Chaos Soliton Fract. 2009, 41, 843–853.
9. The Effectiveness of Flaw Detection Caused by Cracking using Acoustic Emission Technique,” Proceedings of ECNDT 2006, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 2006.
10. Lateef N. Assi, Rafal Anay, Davis Leaphart/ Investigation of Early Geopolymerization Process of Fly Ash-Based Geopolymer Paste Using Acoustic Emission Technique// Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, SCMT4 Las Vegas, USA, August 7-11, 2016.– 10 p.
11. G. Lacidogna, G. Piana, A. Carpinteri/Acoustic Emission and Modal Frequency Variation in Concrete Specimens under Four-Point Bending //Appl. Sci. 2017, 7, 339.

12. Takahiro Omori, Takashi Usui, Kazuo Watabe / Elastic Wave Measurement Using a MEMS AE Sensor// *Appl. Sci.* 2017, 7, 737; doi:10.3390.
13. Alberto Martini, Marco Troncossi, Alessandro Rivola / Leak Detection in Water-Filled Small-Diameter Polyethylene Pipes by Means of Acoustic Emission Measurements // *Appl. Sci.* 2017, 7, 2; doi:10.3390.
14. A. Mostafapour, S. Davoudi/Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method// *Applied Acoustics*, vol.74, no.3, pp.335–342, 2013.
15. W. Liang, L. Zhang, Q. Xu, C. Yan /Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology // *Engineering Failure Analysis*, vol.31, pp.1–7, 2013.
16. Dan Xiang/ Acoustic Emission Detection of Early Stages of Cracks in Rotating Gearbox Components // *AIP Conference Proceedings* 1806, 070010 (2017); doi: 10.1063.
17. Lu Zhang, Didem Ozevin , William Hardman, Alan Timmons/ Acoustic Emission Signatures of Fatigue Damage in Idealized Bevel Gear Spline for Localized Sensing // *Journal Metals* 2017, 7, 242–263; doi:10.3390.
18. Shi S., Han Z., Liu Z. ,Vallely P., more/Quantitative monitoring of brittle fatigue crack growth in railway steel using acoustic emission// *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2017, vol. 232, no. 4, pp. 1211-1224.
19. Eric SERRIS, Ana CAMEIRAO, Frederic GRUY/ Monitoring industrial crystallization using acoustic emission// *32nd European Conference on Acoustic Emission Testing Prague, Czech Republic, September 07-09, 2016.*– P. 451–460.
20. Early fire detection using acoustic emissions//C. Kwan, X. Zhang, and R. Xu, *IFAC Proceedings Volumes* , 2003.–P. 351 – 355.
21. D. Viegas, L. Pita, F. Nielsen, K. Haddad и др./ Acoustic and thermal characterization of a forest fire event// *Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires* , 2008, Vol 119.– P. 171–179.
22. Физическая химия в 2 кн. Кн.1. Строение вещества. Термодинамика. Под ред. К.С. Краснова. М.: Высш. шк. 1995. 512 с.

23. U. Glombitza, H. Hoff /Fibre Optic Radar System for Fire Detection in Cable Trays//13th International conference on automatic fire detection, September, Germany, 2004.– 23 p.

24. Bossi I., Ferriello P., De Luca L. Acoustic emission of underwater burning composite solid rocket propellants / I. Bossi, P. Ferriello, L. De Luca // XVI CONGRESSO NAZIONALE AIDAA, 2001, 24-28 September, PALERMO, Pa, ITALY.– 12 p.

25. Grosshandler W, Jackson M. Acoustic emission of structural materials exposed to open flames. Fire Safety Journal Volume 22, Issue 3, 1994, Pages 209–228.

26. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы: Пер. с англ. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

27. Kronover R.M. Fraktaly i haos v dinamicheskikh sistemah. Osnovy teorii.– М.: Postmarket, 2000 – 352 p.

28. Zosimov V.V., Lyamshev L.M. Fractals and scaling in acoustics/ V.V. Zosimov, L.M. Lyamshev // Acoustical Physics, 1994, 40(5), P. 627–653.

29. Kantelhardt, J.W. (2012). Fractal and Multifractal Time Series. In: Meyers, R. (eds) Mathematics of Complexity and Dynamical Systems. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1_30.– pp 463–487

30. S. I. Builo, D. M. Kuznetsov Acoustic-emission testing and diagnostics of the kinetics of physicochemical processes in liquid media//Journal of Nondestructive Testing, 2010.–vol 46.– P. 684–689.

31. Э. Петерс Фрактальный анализ финансовых рынков: Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике, 2004.– М.: Интернет–трейдинг.– 304 с.

32. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 1951, 116.– P. 770 – 808.

33. Басараб М.А., Строганов И. С. Обнаружение аномалий в информационных процессах на основе мультифрактального анализа //Вопросы кибербезопасности.– 2014, №4(7).– С 30 – 40.

34. Левтеров А.А. Определение возгораний веществ по спектральному отпечатку в акустическом диапазоне. Актуальні питання судової експертизи і

криміналістики. Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 150-річчю з дня народження Засл. проф. М.С. Бокаріуса. Харків 18–19 квітня. ХНДІСЕ. 2019. С. 330-332.

35. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навчальний посібник, КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2018.–88 с.

36. Левтеров А.А. Использование эффекта акустической эмиссии при раннем обнаружении возгорания целлюлозосодержащих материалов объектовой подсистемой универсальной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций в Украине / В.Д. Калугин, В.В. Тютюник // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков. – ХНУРЭ. – Том. 16. – №1,2. – 2017.– С. 23 – 40.

37. Левтеров А.А. Методы идентификации процесса горения целлюлозосодержащих материалов на основе эффекта акустической эмиссии. / В.Д. Калугин, В.В. Тютюник // Проблемы пожарной безопасности. – Харків: НУЦЗУ, 2017. Вып. 42. С. 72 – 84.

38. Levterov A.A. Acoustic Research Method for Burning Flammable Substances. Acoustical Physics. Volume 65. 2019. №4. P. 444–449.