

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Акустики та акустoeлектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **В.С. Дідковський**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) _____ **6.050803 Акустотехніка**
(код та назва спеціальності)

на тему: _____ **Система для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії**

Виконала: студентка 4 курсу, групи ДГ-51
(шифр групи)

Завальнюк Діана Валентинівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ **доцент, к.т.н. Гармаш О. В.** _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____ _____ _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ акустики та акустoeлектроніки _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 6.050803 Акустотехніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ В.С. Дідковський
(підпис) (ініціали, прізвище)
« ____ » _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект (роботу) студенту
Завальнюк Діані Валентинівні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Система для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії _____

керівник проекту (роботи) Гармаш Оксана Вікторівна к.т.н. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «27» травня 2019р. №1405-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07 червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Схема реєстрації сигналів акустичної емісії за умови розвитку у матеріалі недосконалостей структури під дією навантаження розтягу, основні вимірювані параметри (ГОСТ 27655 – 88) сигналів акустичної емісії (АЕ), принцип реєстрації сигналів акустичної емісії з застосуванням порогового пристрою, класифікація джерел акустичної емісії _____

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

1. Аналіз науково-технічної літератури. _____

2. Дослідження імовірнісних характеристик сигналів акустичної емісії.

3. Теоретичний розрахунок пристрою для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії

4. Імітаційне моделювання пристрою виявлення сигналів АЕ.

5. Порівняння з пороговим методом виявлення.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 5 вересня 2018 р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір матеріалів для роботи. Аналіз науково-технічної літератури.	05.09.2018 - 18.10.2018	
2	Вивчення основних принципів акустико-емісійної діагностики.	19.10.18 - 20.11.18	
3	Розширення знань про сучасні акустико-емісійні системи .	21.11.18 - 12.03.19	
4	Імітаційне моделювання пристрою виявлення сигналів АЕ. Порівняння з пороговим методом виявлення.	13.03.19 - 25.05.19	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації.	26.05.2019 - 07.06.2019	

Студент

(підпис)

Д. В. Завальнюк

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

О. В Гармаш

РЕФЕРАТ

Система для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії//Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр». Завальнюк Д.В. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра акустики та акустoeлектроніки, група ДГ-51. – К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. с. – 67, рис. – 21, табл. – 35.

Метою роботи є розробка системи для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії з безпороговим принципом реєстрації сигналів на основі використання оцінок кумулянтних коефіцієнтів.

В роботі розроблена узагальнена схема системи для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії, яка базується на вимірюванні кумулянтних коефіцієнтів на безпороговій реєстрації сигналів. В результаті імітаційного моделювання сигналів акустичної емісії встановлено, що розроблений виявляч забезпечує нульову ймовірність пропуску сигналу. Використання формул для обрахунку середньоквадратичні похибки оцінок кумулянтних коефіцієнтів п'ятого и шостого порядків за відомими центральними моментами, дозволило визначити мінімальний об'єм вибірки, необхідний при моделюванні сигналів акустичної емісії. Для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії обґрунтовані нові інформативні характеристики – кумулянтні коефіцієнти. Безпорогова реєстрація даних дозволяє здійснювати запис сигналу без втрати інформації про об'єкт діагностування і тим самим підвищує чутливість і достовірність акустико-емісійного контролю.

Ключові слова: акустична емісія, дискретна акустична емісія, неперервна акустична емісія, виявляч, кумулянти, оцінки, середньо квадратична похибка.

ABSTRACT

System for detection of discrete acoustic emission signals // Graduation thesis for the degree of higher education "bachelor". Zavalniuk D.V. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Electronics, Department of Acoustics and Acoustoelectronics, DG-51 group. - M.: KPI them. Igor Sikorsky, 2019. p. - 67, fig. - 21 tab. - 35.

The aim of the work is to develop a system for detecting discrete acoustic emission signals from the non-threshold principle of signal registration based on the use of estimates of cumulative coefficients.

A generalized system scheme for detecting discrete acoustic emission signals, which is based on measuring cumulative coefficients for non-threshold signal detection, has been developed. As a result of the simulation of acoustic emission signals, it has been established that the developed design provides a zero probability of signal skipping. The use of formulas for calculating the mean-square errors of estimating the fifth and sixth cumulative coefficients using known central moments made it possible to determine the minimum sample size required when modeling acoustic emission signals. For the detection of discrete acoustic emission signals, new informative characteristics are justified - cumulatory coefficients. Non-threshold data recording allows you to record a signal without losing information about the object being diagnosed and thereby increases the sensitivity and accuracy of acoustic emission monitoring.

Keywords: acoustic emission, discrete acoustic emission, continuous acoustic emission, detection device, cumulants, estimates, mean square error.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	11
1.1. Джерела сигналів АЕ	11
1.2. Основні вимірювані параметри сигналів акустичної емісії	14
1.3. Аналіз методів і засобів акустико-емісійної діагностики.....	16
1.4. Сучасні акустико-емісійні системи.....	20
Висновки по розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ.....	28
2.1 Модель сигналів акустичної емісії.....	28
2.2 Кумулянтний аналіз.....	31
2.3. Похибки оцінювання імовірнісних характеристик	33
Висновки по розділу 2	38
Розділ 3. СИСТЕМА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ДИСКРЕТНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ.....	39
3.1. Структурна схема детектора.....	39
3.2. Теоретичний розрахунок пристрою для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії.....	41
3.3. Імітаційне моделювання пристрою виявлення сигналів АЕ.	44
3.4. Порівняння з пороговим виявлячем.....	48
Висновки по розділу 3	52
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	54

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... 55

ПЕРЕЛІК СКОРЧЕНЬ

АЕ – акустична емісія;

АЦП - аналогово-цифровий перетворювач;

БС - блок синхронізації.

ЕОМ - електронна обчислювальна машина;

МНК – методи неруйнівного контролю;

ПАЕ - перетворювач акустичної емісії;

ПК - персональний комп'ютер;

LCD - Liquid crystal display (рідкокристалічний екран);

ВСТУП

При діагностуванні різних технічних об'єктів в процесі їх експлуатації важливу роль відіграють пасивні методи неруйнівного контролю, зокрема, метод акустичної емісії, заснований на вимірі і аналізі характеристик акустико-емісійних сигналів.

Обробку та аналіз сигналів акустичної емісії проводять на основі обраної системи класифікації джерел акустичної емісії і критеріїв оцінки результатів контролю. Для оцінки процесів руйнування конструкцій при акустико-емісійному контролі зараз застосовують методи, засновані на аналізі диференціальних характеристик сигналів акустичної емісії - амплітудний, інтегральний, локально-динамічний, інтегрально-динамічний. Ці методи передбачають, як правило, застосування порогових пристроїв реєстрації, а їх використання ефективно, якщо імпульси сигналів акустичної емісії не перекриваються.

Однак внаслідок відображень, трансформації типів хвиль і резонансних властивостей датчика частина імпульсів акустичної емісії, що реєструються в приймальному тракті, перекриваються між собою. Це призводить до того, що аналіз диференціальних характеристик сигналів акустичної емісії може призвести до недостовірних результатів і, як наслідок, до помилкових висновків про стан об'єкта, що діагностується.

Таким чином, актуальною є задача розробки нових методів і засобів акустико-емісійної діагностики, що дозволяють підвищити достовірність діагнозу. Для вирішення цього завдання необхідний аналіз інформативності імовірнісних характеристик акустико-емісійних сигналів і визначення складу діагностичних параметрів, від яких залежить чутливість і достовірність засобів технічного діагностування.

Метою роботи є створення системи для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії, на основі безпорогової реєстрації сигналів та кумулянтних

методів виявлення сигналів, що дозволить підвищити достовірність виявлення сигналів акустичної емісії.

В першому розділі, проаналізовано основні принципи акустико-емісійної діагностики. Аналіз відомих систем акустико-емісійної діагностики показав, що в більшості з них є порогові пристрої, при застосуванні яких значна кількість інформації втрачається. Тому виникає необхідність в створенні систем безпорогової реєстрації сигналів акустичної емісії.

В другому розділі, який присвячено дослідженню імовірнісних характеристик сигналів акустичної емісії, описано проведення безпорогової обробки сигналів акустичної емісії за результатами кумулянтного аналізу. На основі прийнятої моделі акустико-емісійних сигналів задача виявлення дискретної акустичної емісії (корисного сигналу) розглядається на тлі неперервної акустичної емісії (завади).

В третьому розділі, описано розробку узагальненої схеми пристрою для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії, яка базується на вимірюванні пуассонівської спектральної щільності і кумулянтних коефіцієнтів та на безпороговій реєстрації сигналів. В результаті імітаційного моделювання сигналів акустичної емісії встановлено, що розроблений детектор забезпечує нульову ймовірність пропуску сигналу.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ

1.1. Джерела сигналів АЕ

Метод акустичної емісії – це один з пасивних акустичних методів діагностики і неруйнівного контролю, який базується на поширенні пружних зсувів у твердих тілах. Акустична емісія є явищем формування хвиль напружень, які викликані раптовою перебудовою у структурі матеріалу.

При діагностиці різних технічних об'єктів в процесі їх експлуатації важливу роль відіграють пасивні методи неруйнівного контролю, зокрема, метод акустичної емісії, заснований на вимірі і аналізі характеристик акустико-емісійних сигналів.

Класичними джерелами АЕ є процеси пластичної деформації, пов'язані з появою, розвитком та зникненням недосконалостей кристалічної ґратки, утворенням і розвитком мікро-, макротріщин; фазові перетворення у твердих тілах. Раптовий рух джерела емісії викликає породження хвиль напружень, які поширюються у структурі матеріалу і доходять до перетворювача. У міру підвищення рівня напруги, активізуються більшість з наявних в матеріалі об'єкта джерел емісії. Сигнали емісії електричні, які отримані після перетворення хвиль напружень, підсилюються, реєструються апаратурою та піддаються наступній обробці і інтерпретації.

До того ж випромінювання акустичної емісії реєструється у діапазоні частот від 100 кГц до 2500 кГц. Як приклад на рис. 1 наведена схема реєстрації сигналів акустичної емісії за умови розвитку у матеріалі недосконалостей структури під дією навантаження розтягу P .

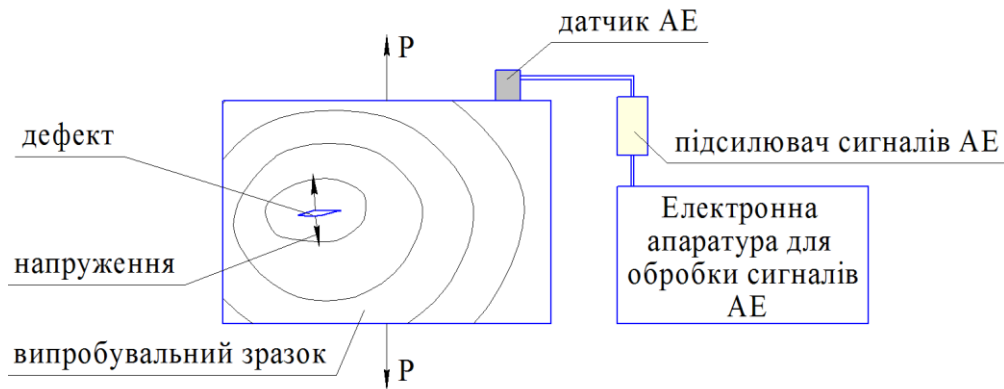


Рис.1.1. Схема реєстрації сигналів акустичної емісії за умови розвитку у матеріалі недосконалостей структури під дією навантаження розтягу P .

Реєстрація пружних зсувів відбувається за допомогою датчика, який встановлюється на хвилеводі чи на поверхні матеріалу, який має стійкий акустичний контакт із поверхнею випробовуваного зразка матеріалу. Датчик АЕ перетворює пружні зміщення частинок матеріалу в електричний сигнал, який підсилюється та обробляється електронною апаратурою на основі прийнятих концепцій.

Існує два основних фактори, що призводять до високої емісійності - це крихкість і гетерогенність матеріалу. В'язкі механізми руйнування, наприклад, злиття пор в м'яких сталях, навпаки, призводять до низької емісійності (за енергією і числом сигналів).

При тестуванні конструкцій АЕ метод використовується для контролю тиску посудини, сховища, труб і трубопроводів, авіаційних і космічних апаратів, електричних заводів, мостів, залізничних цистерн і вагонів, вантажних транспортних засобів, а також багатьох інших типів об'єктів. АЕ контроль проводиться і на новому, і на обладнанні, що було в експлуатації. Він включає виявлення тріщин, зварних дефектів та інших.

Основна перевага методу АЕ пов'язана з можливістю проведення неруйнівного контролю всього об'єкта в цілому за один цикл навантаження. Даний метод є дистанційним, він не вимагає сканування поверхні об'єкта для пошуку локальних дефектів. Необхідно просто правильним чином

розташувати потрібне число датчиків і використовувати їх для здійснення локації джерела хвиль напружень. Можливості, пов'язані з дистанційним використанням методу, дають великі переваги в порівнянні з іншими методами контролю, які вимагають, наприклад, видалення ізоляційних оболонок, звільнення контейнерів контролю від внутрішнього змісту або сканування великих поверхонь.

Типовий приклад використання АЕ полягає у визначенні місця розташування дефектних ділянок, після чого для більш точного визначення природи дефектів використовуються інші МНК.

Обладнання здатне реєструвати не тільки зростання тріщин або розвиток пластичної деформації, а й процеси затвердіння, кристалізації, тертя, ударів, течеутворень і фазових переходів. Нижче перераховані основні програми, в яких використовується АЕ метод контролю [1]:

- Контроль процесу зварювання;
- Контроль зносу і дотику обладнання при автоматичній механічній обробці;
- Контроль зносу і втрат мастила на об'єктах, пов'язаних з обертанням і тертям компонентів;
- Детектування втрачених частин і частинок обладнання ;
- Виявлення і контроль течі, кавітації і потоків рідини в об'єктах;
- Контроль хімічних реакторів, що включає контроль корозійних процесів, рідко-твердого переходу, фазових перетворень.

Отже, джерелом акустико-емісійної енергії служить поле пружних напружень в матеріалі. Без напруг немає і емісії, тому акустико-емісійний контроль зазвичай проводиться шляхом навантаження контрольованого об'єкта. Це може бути контроль для перевірки перед запуском об'єкта, контроль змін навантаження під час роботи об'єкта, випробування на втомлюваність, повзучість або комплексне навантаження. Дуже часто конструкція навантажується довільним способом. У даному випадку використання АЕ контролю дозволяє отримувати певну цінну інформацію

щодо поведінки конструкції під впливом навантаження. В деяких інших випадках емісія застосовується з причин економічності і безпеки; для саме таких завдань розробляються спеціальні процедури навантаження і тестування.

Джерелами акустичних сигналів при деформації металів є процеси анігіляції дислокацій, вихід дислокацій на вільну поверхню, робота дислокаційних джерел, утворення або захоплення мікроскопічних скупчень дислокацій, відрив дислокацій від домішкових атмосфер і прорив перешкод, гальмування дислокацій, що швидко рухаються, формування смуги ковзання, зернограничного ковзання. Головне значення у формуванні акустичних сигналів великої інтенсивності мають механізми перехідного випромінювання (вихід дислокацій на поверхню, анігіляція дислокацій, утворення скупчень дислокацій), пов'язані з різкою зміною швидкості процесу.

Кількість можливих параметрів сигналів акустичної емісії, що реєструються може бути досить великою, тому важливим є вибір найбільш інформативних параметрів, які містять необхідну інформацію про динамічне локальне перелаштування внутрішньої структури твердих тіл.

1.2. Основні вимірювані параметри сигналів акустичної емісії

При встановленні найбільш інформативних параметрів акустичної емісії розглядаються амплітудні розподіли імпульсів акустичної емісії, які відповідають окремим актам акустичної емісії, викликаних зливом накопичень дислокацій з точок закріплення, проривами через перешкоди і розподіли часових інтервалів між ними. Це зумовлено тим, що більшість зв'язаних з кінетикою дефектів особливостей сигналів акустичної емісії більше визначаються загальними статистичними характеристиками ансамблів структури, ніж їх індивідуальними особливостями. Ці особливості, а також випадковий характер розташування дефектів решітки реальних

твердих тіл, дозволяють використовувати апарат теорії потоків випадкових подій для описання стійких статистичних закономірностей явища акустичної емісії.

Основні вимірювані параметри (ГОСТ 27655 – 88) сигналів акустичної емісії (АЕ) наведені в табл. 1.1. Вказані параметри є випадковими величинами, виходячи з цього, вони повністю характеризуються своїми законами розподілу.

В табл. 1.2 наведені орієнтовні діапазони зміни деяких параметрів сигналів акустичної емісії. Найчастіше використовують параметри сигналів акустичної емісії: амплітуда акустичного сигналу, середнє значення постійної складової амплітуди, швидкість рахунку, сумарний рахунок, амплітудні розподіли, амплітудно-частотні спектри. Окрім основних параметрів сигналів акустичної емісії в окремих роботах іде мова про амплітудний розподіл. Автори роботи [1] на підставі проведеного аналізу стверджують, що для дискретної акустичної емісії коректного опису амплітудного розподілу ще немає.

Таблиця 1.1. Основні вимірювані параметри сигналів АЕ

Назва параметра	Познач.	Визначення
Кількість Імпульсів АЕ	N_{Σ}	Кількість зареєстрованих імпульсів дискретної АЕ за інтервал часу спостереження
Сумарний рахунок АЕ	N	Кількість зареєстрованих перевищень імпульсами акустичної емісії встановленого рівня дискримінації за інтервал часу спостереження
Активність АЕ	Σ	Кількість зареєстрованих імпульсів АЕ за одиницю часу
Швидкість рахунку АЕ	\dot{N}	Відношення сумарного рахунку АЕ до інтервалу часу спостереження
Енергія АЕ	E	Енергія, яку виділяє джерело АЕ і яка переноситься хвилями, виникаючими в матеріалі

Параметр класифікації	n	Показник степені у виразі, який описує залежність сумарного рахунку АЕ N від коефіцієнта інтенсивності напруг K , $N = aK^n$, де a – константа, яка відображає умови випробування
-----------------------	-----	--

Таблиця 1.2. Діапазони змін деяких параметрів сигналів АЕ

Параметр	Діапазон зміни параметра	Примітка
Сумарна АЕ	0 ... 10^7 імп.	За час розтягнення до руйнування
Інтенсивність	0 ... 10^5 імп./с	Те ж
Амплітуда	10^{-7} ... 10^{-2} В 10^{-14} ... 10^{-7} м	Електричний сигнал Механічний сигнал
Енергія сигналу	10^{-9} ... 10^{-5} Дж	Одиничний сигнал
Тривалість імпульсу	10^{-8} ... 10^{-2} с	—————
Енергія імпульсу	10^{-19} ... 10^{-2} Дж	—————

Крім того, на сьогодні відсутні завершені дослідження, в яких чітко описано в загальному вигляді амплітудний розподіл сигналів акустичної емісії, що дозволило б отримати як окремий випадок опис амплітудних розподілів дискретної та неперервної акустичної емісії.

1.3. Аналіз методів і засобів акустико-емісійної діагностики

Аналіз відомих систем акустико-емісійної діагностики показав, що в більшості з них є порогові пристрої. Принцип реєстрації сигналів акустичної емісії з застосуванням порогового пристрою описаний в роботах [2-6] та полягає в наступному. Після того, як сигнал був прийнятий датчиком та підсилений попереднім підсилювачем, він надходить в основну систему, де знову посилюється і фільтрується. На наступному важливому етапі

відбувається безпосередньо виділення сигналу. Етап закінчується тим, що коли сигнал перевищує встановлений поріг в компараторному ланцюзі, у цифровому вигляді генерується вихідний імпульс. Принцип реєстрації сигналів АЕ проілюстрований на рис. 1.2.

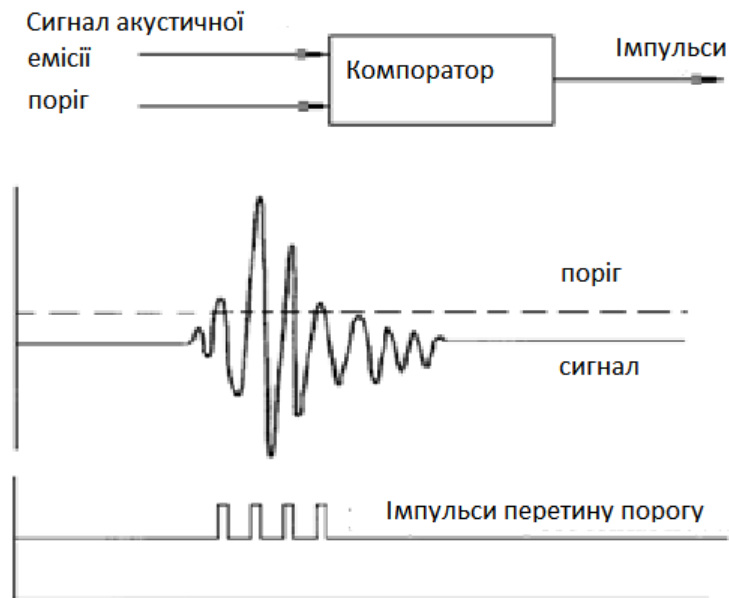


Рис. 1.2. Принцип реєстрації сигналів акустичної емісії

Рівень порогу зазвичай регулюється оператором, цей параметр є ключовим, який визначає чутливість акустико-емісійного методу при випробуванні. Крім того, в залежності від типу акустико-емісійного обладнання, чутливість можна регулювати, змінюючи величину підсилення основного підсилювача.

При застосуванні порогових пристроїв велика частина сигналів акустичної емісії відсівається, таким чином, втрачається значна інформація. В результаті порогової обробки виділяються лише ті сигнали акустичної емісії, які значно (на 6-8 дБ) перевершують рівень шумів.

Обробку та аналіз сигналів акустичної емісії проводять за допомогою обраної системи класифікації джерел акустичної емісії і критеріїв оцінки результатів контролю. Перед проведенням аналізу даних проводять фільтрацію з метою видалення інформації не пов'язаної з процесами

створення і наростання дефектів. Відомі амплітудний, інтегральний, локально-динамічний, інтегрально-динамічний методи оцінки процесів руйнування конструкцій при застосуванні акустико-емісійного контролю. Дані методи засновані на аналізі диференціальних характеристик сигналів акустичної емісії. Найпростішим методом акустико-емісійної діагностики є аналіз сумарного рахунку сигналів акустичної емісії. Перевищення вказаної величини заданого порогу свідчить про появу дефекту.

В роботі [7] було здійснено класифікацію джерел акустичної емісії і вважають, що найбільш вдалим класифікаційним параметром є сумарний рахунок акустичної емісії, пов'язаний з амплітудою, тривалістю і, як наслідок, з енергією процесу. Вважається, що даний параметр легко виміряти, що й зумовлює його широке застосування. Однак дане твердження справедливо лише для імпульсів, які не перекриваються.

Крім досліджень диференціальних характеристик сигналів акустичної емісії відомі окремі роботи [8-12], в яких застосовано статистичний підхід для класифікації джерел акустичної емісії, заснований на її інтегральних характеристиках.

У роботі [8] доведено інформативність вторинних параметрів спектральної функції, таких як енергія сигналу, нормованого по спектру і інтервал між екстремумами спектральної функції сигналу, при вирішенні завдань прогнозування і діагностики. Показано, що використання спектральних характеристик сигналів акустичної емісії дозволяє не тільки виявити дефекти, а й ідентифікувати їх. Однак при цьому не вказані чіткі критерії ідентифікації.

У роботі [9] запропоновано метод оцінки динаміки розвитку процесів акустичної емісії на основі їх феноменологічних моделей і експериментальних даних, що дозволяє встановлювати факт порушення пуассонівського характеру виникнення імпульсів акустичної емісії, що є сигналом початку розвитку процесу руйнування конструкції. Запропонований метод функціональних інваріантів заснований на гіпотезі

суттєвої різниці залежності функціонального інваріанту від ступеня деформації матеріалу в зоні пуассонівського розподілу моментів, яка відповідає початковому етапу деформування, і при порушенні пуассонівського розподілу моментів часу. Різниця є наслідком залежності, яка виникає між моментами появи імпульсів акустичної емісії, зумовленої утворенням і розвитком мікротріщин з подальшим об'єднанням в макротріщини.

На основі методу інваріантів [10] в роботі [11] була запропонована функціональна схема пристрою для оцінки процесів руйнування конструкцій при акустико-емісійному контролі та описаний основний принцип його роботи. Простота постановки діагнозу полягає в порівнянні інваріанту інтервалів часу з двійкою, що відповідає пуассонівському розподілу інтервалів [10].

В роботі [12] автори вважають, що для кількісного аналізу взаємодії та розвитку мікротріщин доцільно використовувати статистичні закономірності. В результаті дослідження було встановлено, що за величиною середньоквадратичного відхилення амплітуди сигналів акустичної емісії можна надійно прогнозувати момент переходу накопичення пошкоджень до катастрофічного руйнування.

Коливання поверхні об'єкта, викликані акустичною емісією, характеризуються великою кількістю параметрів. Перелік контрольованих параметрів залежить від призначення апаратури і цілей досліджень. Особливості сигналів акустичної емісії (широкий динамічний діапазон за потужністю, широкий діапазон частот, різна інтенсивність і тривалість та ін.) зумовлюють ряд вимог до вимірювальної апаратури. Приймний перетворювач і електронні блоки обробки інформації повинні вносити мінімальні спотворення до форми сигналів, мати високу чутливість і великий коефіцієнт підсилення, володіти мінімальним рівнем власних шумів. Для боротьби зі сторонніми шумами необхідна частотна і амплітудна селекція сигналів, ретельне екранування обладнання від електромагнітних наведень.

Необхідно відзначити наступне. По-перше, сигнал акустичної емісії носить нестационарний стохастичний характер [13], тому такі параметри як сумарна кількість імпульсів і активність акустичної емісії в свою чергу є випадковими величинами. У багатьох приладах і системах акустико-емісійного контролю обчислюються середні значення даних параметрів, для оцінки яких необхідно досліджувати статистичні характеристики сигналів.

По-друге, внаслідок відображень, трансформації типів хвиль і резонансних властивостей датчика частина імпульсів акустичної емісії, що реєструються в приймальному тракті, перекриваються між собою. Це спотворює сумарний рахунок і швидкість рахунку в порівнянні з істинними значеннями кількості імпульсів і інтенсивності потоку імпульсів.

І, нарешті, відзначимо, що відсутня єдина математична модель сигналів акустичної емісії і недостатньо досліджені їх статистичні характеристики.

1.4. Сучасні акустико-емісійні системи

Характерною особливістю акустико-емісійної апаратури є необхідність роботи у відносно великому динамічному діапазоні, що зумовлено важливістю виявлення одиничних сигналів акустичної емісії малої амплітуди, а також необхідністю реєструвати сигнали акустичної емісії при прискореному розвитку тріщин, для яких характерні інтенсивний потік імпульсів щодо великих амплітуд. Динамічний діапазон сигналів акустичної емісії в процесі контролю може досягати 100 дБ і більше.

Акустико-емісійна система повинна забезпечувати прийом, оперативну обробку і відображення інформації в режимі реального часу, а також накопичення, документування, обробку, відображення і виведення на периферійні пристрої для документування накопичених протягом випробування даних після закінчення випробування.

За функціональним призначенням акустико-емісійну апаратуру можна розділити на три основні групи: прилади виробничого застосування; багатофункціональні прилади лабораторного і виробничого застосування;

системи акустико-емісійного контролю [14].

Прилади виробничого застосування зазвичай реєструють один-два параметра акустичної емісії, мають досить просту конструкцію і зручні в експлуатації. Ці прилади використовуються, як правило, для контролю однотипних конструкцій або процесів. Для контролю інших об'єктів або процесів потрібна перебудова схеми [14]. До таких приладів відносяться АРКС-01, АМУР-Д4, АМУР-Д6, РПТ-1, АРД-31, АРД-41, АРД-42, САКЕМ-2, NDT-200, АЕМС-1, АЕМС-2, та ін.

Багатофункціональні прилади акустико-емісійного контролю є блоковими конструкціями. Кожен блок виконує певну функцію по виділенню і реєстрації того чи іншого параметра сигналів акустичної емісії. Прикладами багатофункціональних акустико-емісійних приладів є АФ-11, АФ-15, АВН-1М, АВН-2, система 3000 фірми «Данеган / Ендевко» і ін. Ці прилади дозволяють підраховувати кількість імпульсів акустичної емісії, активність, інтенсивність і енергію акустичної емісії, координати джерела при лінійній локації, розподіл амплітуд, тривалість імпульсів і ін. Багатофункціональні прилади акустичної емісії дають можливість не тільки проводити контроль об'єктів і процесів, але також досліджувати явище акустичної емісії [14].

Системи контролю - найбільш складна апаратура. Принципові відмінності цих систем: багатофункціональність (4 - 50 і більше каналів); використання ЕОМ для обробки інформації. Системи представляють розвиток багатофункціональних акустико-емісійних приладів і, так само як вони, побудовані за блоковим принципом [14]. До них відносяться системи АФ-33, акуст-1, акуст-2 і акуст-3 фірми «Джрсі Ньюклеар», система SIMS 7500 фірми «Тродайн» і ін.

На сьогодні характерне впровадження в вимірювальні системи складних і коштовних приладів - аналізаторів амплітудно-частотного спектра, приладів для вимірювання кореляційних характеристик, обчислювальних машин і т. п. Все більше уваги приділяється багатоканальним системам для визначення місця розташування дефекту, попри їх складність і високу вартість. Для

одноканальних систем характерне збільшення кількості приладів сигналів акустичної емісії з конкретним функціональним призначенням: для контролю якості зварювання, вимірювання границі текучості, довжини тріщини і т. д. Наявність великої кількості способів вимірювання параметрів сигналів акустичної емісії і схемних рішень апаратури говорить про відсутність на даний момент усталеного уявлення про оптимальний підхід до вимірювання параметрів сигналів акустичної емісії і універсальної апаратури.

В роботі [15] на підставі проведеного аналізу характеристик деяких сучасних акустико-емісійних систем встановлено, що базовий універсальний модуль акустико-емісійної системи повинен містити до 8 каналів. Повний динамічний діапазон повинен бути не менше 60 дБ. Нижня межа частотного діапазону лежить в смузі 20 ... 50 кГц. Для акустико-емісійних вимірювань на трубопроводі частотний діапазон належить смузі частот 20 ... 300 кГц. Верхня межа частотного діапазону лежить в смузі частот 2 ... 3 МГц.

Як перетворювачі акустичної емісії переважно [13] використовують п'єзоелектричні перетворювачі. При контролі виробничих об'єктів застосовують резонансні перетворювачі акустичної емісії. При високих температурах рекомендується застосовувати магніострикційні (до 200 °С), високотемпературні п'єзоелементи (до 400 °С) або хвилеводи. Ємнісні і оптичні перетворювачі рекомендується застосовувати в широкому діапазоні частот, враховуючи, що при цьому погіршується чутливість прийому в порівнянні з іншими (вузькосмуговими) перетворювачами.

Наведемо приклади сучасних акустико-емісійних систем та опишемо їх характеристики.

Система акустико-емісійного контролю ГАЛС-1 (рис. 1.4)

Вказана система здійснює виміри наступних параметрів сигналів акустичної емісії : час приходу сигналу, час досягнення максимальної амплітуди, загальна тривалість сигналу, максимальна амплітуда сигналу, енергія сигналу, MARSE (площа під обвідною), рахунок (кількість викидів – перетинів порогу), середня частота спектра сигналу, мінімальна частота

спектра сигналу, максимальна частота спектра сигналу, рівень шуму перед сигналом.



Рис.1.4. Система акустико-емісійного контролю ГАЛС-1

В таблиці 1.3 наведено технічні характеристики системи акустико-емісійного контролю ГАЛС-1.

Таблиця 1.3. Технічні характеристики системи АЕ контролю ГАЛС-1

Кількість каналів	від 1 до 100 з дискретністю в 1 канал
Типи блоків синхронізації	7-канальні і 15-канальні
Довжина сегменту кабелю між БС і каналом	до 100 м
Реєстрація всіх параметрів сигналів на канал	до 1000 сиг/с
Реєстрація всіх параметрів сигналів на комплекс	до 15700 сиг/с
Електроживлення комплексу	~220 В(187÷242 В) 50±1 Гц

Також в таблиці 1.4. вкажемо деякі кількісні характеристики описуваної системи.

Таблиця 1.4. Деякі кількісні характеристики системи АЕ контролю ГАЛС-1

Максимальна амплітуда	до не менше ніж 108 дБ
Динамічний діапазон вимірювань амплітуди	не менше ніж 95 дБ
Динамічний діапазон вимірювань енергії	не менше 175 дБ
Діапазон вимірювання рахунку сигналу	1 ÷ 52000
Діапазон вимірювання протяжності сигналу	1 ÷ 65000 мкс
Похибки вимірювання амплітуди сигналу	не більше ± 1 дБ

Двоканальна акустико-емісійна система UNISCOPE (рис. 1.5).

UNISCOPE - двоканальна портативна акустико-емісійна система, яка опційно може бути укомплектована додатковим блоком акустичного течешукача (поставляється опціонально, при безпосередньому втручанні в електроніку приладу і програмне забезпечення на базі виробника)

Система UNISCOPE блокова, тобто при бажанні можна придбати окремі блоки і прошивку приладу, яка необхідна для вирішення тих чи інших завдань. Але в першу чергу це акустико-емісійна система.



Рис.1.5 Двоканальна акустико-емісійна система UNISCOPE

Особливості UNISCOPE:

- Мала вага і максимальна зручність при роботі в польових умовах

- Надійний захист від несприятливих зовнішніх чинників
- Пристосованість до від'ємних температур
- Сучасний рівень апаратно-програмного забезпечення
- Розширений функціонал приладу за рахунок використання зовнішніх вимірювальних блоків, для вирішення різноманітних завдань
 - Графічне відображення результатів вимірювань на кольоровому LCD дисплеї зі світлодіодним підсвічуванням
 - Можливість зберігання великих обсягів даних на легкодоступних знімних носіях інформації
 - Тривалий час роботи від двох вбудованих акумуляторів
 - Інтегральність методу АЕ, яка полягає в тому, що, використовуючи один або декілька датчиків, встановлених нерухомо на поверхні об'єкта, можна проконтролювати весь об'єкт цілком (100% контроль). Це властивість методу акустичної емісії особливо корисно при дослідженні важкодоступних (які будуть недоступні) поверхонь контрольованого об'єкта
 - Виявлення та реєстрація дефектів, що розвиваються, що дає можливість класифікувати дефекти за ступенем їх небезпеки (вплив на міцність) для контрольованого об'єкта
 - Оптимальне співвідношення ефективності – вартість.

В таблиці 1.5. вказано АЕ параметри основного приборного блоку.

Таблиця 1.5. АЕ параметри основного приборного блоку:

Дисплей	TFTLED, 5,7" , 640x480 точок, 262 144 кольорів
Час роботи в автономному режимі	8 годин
Інтерфейси, які підтримуються	Карти пам'яті SD/SDHC, Ethernet, USB2.0
Процесор	ARM9
Операційна система	Linux
Діапазон робочих температур	- 20 ÷ +40 °C

Захист від зовнішніх впливів	IP 65
Габаритні розміри	300 × 170 × 60 мм
Маса	2,6 кг

Отже, акустико-емісійні системи діагностики в загальному випадку містять такі основні компоненти [13]: перетворювачі акустичної емісії; попередні і основні підсилювачі; засоби ідентифікації та обробки сигналів, включаючи порогові пристрої, пристрої виділення і вимірювання параметрів сигналів АЕ, пристрої реєстрації та подання інформації (блоки обробки сигналів акустичної емісії); контролери; персональний комп'ютер; параметричні канали, що передають інформацію про навантаження, температури і іншу необхідну інформацію, яка супроводжує АЕ контроль.

Таким чином, узагальнену структурну схему існуючих систем виявлення сигналів дискретної акустичної емісії можна представити у вигляді (рис. 1.2).

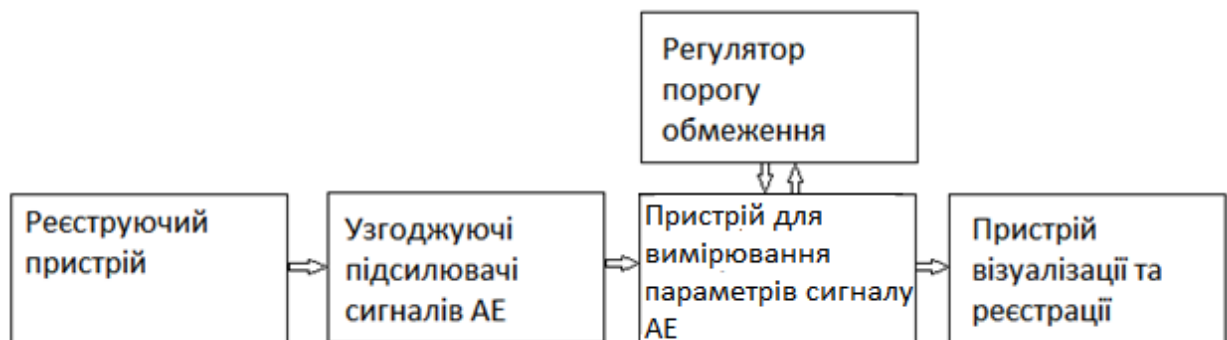


Рис. 1.3. Узагальнена схема типового порогового пристрою виявлення

Висновки по розділу 1

Акустична емісія є явищем формування хвиль напружень, які викликані раптовою перебудовою у структурі матеріалу. Класичними джерелами АЕ є процеси пластичної деформації, пов'язані з появою, розвитком та зникненням недосконалостей кристалічної ґратки, утворенням і розвитком мікро-, макротріщин; фазові перетворення у твердих тілах.

Найчастіше використовують диференційні інформаційні параметри сигналів АЕ, зокрема сумарний рахунок і швидкість рахунку. При збільшенні інтенсивності потоку імпульсів, що характерне при зародженні тріщини, імпульси перекриваються. Це спотворює сумарний рахунок і швидкість рахунку в порівнянні з істинними значеннями кількості імпульсів і інтенсивності потоку імпульсів. Тому виникає необхідність в аналізі інтегральних параметрів сигналів АЕ, інформація щодо використання яких, практично відсутня в літературі.

Аналіз відомих систем акустико-емісійної діагностики показав, що в більшості з них є порогові пристрої, при застосуванні яких значна кількість інформації втрачається. Тому виникає необхідність в створенні систем безпорогової реєстрації сигналів акустичної емісії.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

2.1 Модель сигналів акустичної емісії.

З проведеного раніше короткого аналізу фізики виникнення акустико-емісійних сигналів, а також на основі результатів робіт [16] випливає, що розвиток тріщини супроводжується пластичною деформацією, тобто дискретна акустична емісія з'являється на тлі неперервної, тому прийmemo загальну модель сигналу акустичної емісії в наступному вигляді:

$$\xi(t) = \xi_n(t) + \xi_d(t) \quad (2.1)$$

де індексами «н» і «д» позначені сигнали неперервної і дискретної акустичної емісії, відповідно. Слід зазначити, що зараз при дослідженні акустичної емісії обмежуються, як правило, аналізом лише дискретної складової виразу (2.1) і не враховують вплив неперервної складової.

Дискретна акустична емісія виникає незалежно від неперервної, тому доданки моделі (2.1) є незалежними випадковими процесами. Слідуючи роботам [17, 5, 18] розглянемо завдання в рамках стаціонарної моделі.

Модель сигналу $\xi_n(t)$ аргументована в роботі [19] і має вигляд:

$$\xi_n(t) = \sum_{k=1}^{v_n(t)} \eta_{kn} h_n(t - t_k) \quad (2.2)$$

де $v_n(t)$ – однорідний процес Пуассона з параметром розподілу λ_n ;

t_k – момент появи імпульсів; $h_n(t)$ – форма елементарного імпульсу; амплітуди імпульсів η_{kn} – взаємно незалежні, однаково розподілені випадкові величини, незалежні від t_k .

Дискретна складова моделі (2.1) має вигляд [19]:

$$\xi_d(t) = \sum_{k=1}^{v_d(t)} \eta_{kd} h_d(t - t_k), \quad (2.3)$$

де $v_d(t)$ – однорідний процес Пуассона з параметром λ_d ; амплітуди імпульсів η_{kd} є взаємно незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами, які не залежать від t_k .

Конкретизуємо параметри моделей (2.2) и (2.3). Слідуючи відомим роботам [3, 4, 19, 18] будемо вважати, що форма елементарних імпульсів у неперервної та дискретної емісії однакова та різниться лише параметрами. Прийmemo для опису форми імпульсів наступну модель [4]:

$$h(t) = (t / \tau_0)^{b-1} e^{-t/\tau_0} E(t) \quad (2.4)$$

де $b > 0$ – параметр форми імпульсу; τ_0 – ефективна протяжність імпульсу.

Параметр форми b характеризує зміни форми імпульсу під час його розповсюдження та визначається властивостями середовища. Значення $b = 1$ відповідає імпульсу поблизу джерела виникнення акустичного імпульсу, значення $b > 1$ – імпульсу при видаленні від джерела випромінювання [4].

Згідно з роботою [20] при неперервній емісії величина τ_0 належить діапазону $5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ с, а при дискретній емісії, викликаній утворенням мікротріщин в металі – лежить в діапазоні $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с.

Випадкові величини η_{kn} і η_{kd} , які входять в моделі (2.2) і (2.3), визначаються власними законами розподілу, які можуть відрізнятися для неперервної та дискретної емісії. Згідно з результатами роботи [4] закон розподілу випадкових амплітуд є показниковим з різними параметрами розподілу β_n і β_d , які обернено пропорційні середнім значенням амплітуд імпульсів. Крім того, при дискретній емісії спостерігається [4, 5] збільшення амплітуд η_{kn} . В роботі [3] для сталі ОХ18Н10Т наведені значення амплітуд сигналів неперервної та дискретної акустичної емісії, які, відповідно, приймають значення з діапазонів: 50...160 мкВ, 80...5000 мкВ, тобто амплітуди різняться не менше ніж на порядок. Наведені параметри підтверджуються результатами роботи [13], в якій наведені параметри імпульсів акустичної емісії при утворенні та рості тріщин (табл. 2.3).

Таблиця 2.3. Параметри імпульсів АЕ при утворенні та рості тріщин

Параметр	Мікротріщина, $2a < 10$ мкм	Мезотріщина, $10 < 2a < 10^2$ мкм	Макротріщина, $2a > 10^2$ мкм
Амплітуда сигналу, мкВ	<5	5...50	>50
Протяжність імпульсу, мкс	<0,05	0,05...0,5	>0,5
Енергія імпульсу, Дж	<10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁶ ...10 ⁻¹⁴	>10 ⁻¹⁴

Аналіз законів розподілу [21] сигналів з формою імпульсів (2.4) показав, що при $\lambda\tau_0 < 1$ закон розподілу може суттєво відрізнятися від гаусівського, особливо коли значення параметру b мале. При $\lambda\tau_0 > 1$ відбувається нормалізація процесу, що не суперечить відомому факту [22-24] про те, що при $\lambda\tau_0 \rightarrow \infty$ пуассонівські імпульсні процеси нормалізуються. Ефект нормалізації пояснюється [22, 24] тим, що при збільшенні $\lambda\tau_0$ відбувається перекриття багатьох елементарних імпульсів.

В роботі [21] показано, що закон розподілу процесу з формою імпульсів (2.4) може лише наближено вважатися гаусівським при одночасному виконанні наступних умов:

$$1) \quad b \gg 1; \quad 2) \quad \lambda\tau_0 \gg 1.$$

Виходячи з вище викладеного, можна стверджувати, що для неперервної акустичної емісії параметр $\lambda_n\tau_{0n} \gg 1$, а для дискретної акустичної емісії $\lambda_d\tau_{0d} < 1$.

Проаналізуємо ймовірнісні характеристики сигналів акустичної емісії – кумулянти та закони розподілу.

2.2 Кумулянтний аналіз.

Відомо [23], що характеристична функція та твірна функція кумулянт можуть бути представлені у вигляді:

$$f_{\xi}(u) = \exp \left[\sum_{s=1}^{\infty} \frac{\kappa_s}{s!} (iu)^s \right], \quad \phi_{\xi}(u) = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\kappa_s}{s!} (iu)^s,$$

де, $i = \sqrt{-1}$

$$\phi_{\xi}(u) = \ln f_{\xi}(u) \quad (2.5)$$

Так як сигнали неперервної та дискретної емісії незалежні, то кумулянти κ_s процесу (2.1) зв'язані з кумулянтами складових формулою

$$\kappa_s = \kappa_{sд} + \kappa_{sн}$$

В роботі [21] отримано вираз для знаходження кумулянт пуассонівських імпульсних процесів сигналів з формою імпульсів (4.4):

$$\kappa_s = \kappa_{s\eta} \tau_0 \Gamma(sb - s + 1) / s^{sb-s+1}, \quad (2.6)$$

де $\kappa_{s\eta} = \lambda \alpha_s$, α_s – s -е початкові моменти амплітуд η_k , $\alpha_s = \mathbf{M}\{\eta_k^s\}$; $\Gamma(x)$ – гамма-функція

Очевидно, що формула (2.6) для сигналів дискретної та неперервної акустичної емісії буде різнитися тільки множником $\kappa_{s\eta} \tau_0$, який несе інформацію про відповідні складові процесу (2.1).

Визначимо співвідношення сигнал/завада наступним чином:

$$C/3 = \sqrt{\frac{\kappa_2[\xi_{д}(t)]}{\kappa_2[\xi_{н}(t)]}} = \sqrt{\frac{\kappa_2[\eta_{кд}] \tau_{0д}}{\kappa_2[\eta_{кн}] \tau_{0н}}}$$

Зі врахуванням показникового закону розподілу випадкових амплітуд $\eta_{кн}$ та $\eta_{кд}$ з параметрами $\beta_{н}$ і $\beta_{д}$, відповідно, останній вираз прийме вигляд :

$$C/3 = \frac{\beta_{н}}{\beta_{д}} \sqrt{\frac{\lambda_{д} \tau_{0д}}{\lambda_{н} \tau_{0н}}} \quad (2.7)$$

В табл. 2.4 наведені числові значення кумулянт κ_s , $s = \overline{2,6}$, для неперервної, дискретної акустичної емісії та їх суміші в залежності від співвідношення сигнал/завада, у відносних одиницях (при $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$ і $\lambda_n \tau_{0n} = 10$).

Аналіз даних табл. 2.4 показав, що кумулянти суміші коли співвідношення $C/3=1$, як мінімум вдвічі більші, ніж відповідні кумулянти сигналів неперервної акустичної емісії.

Таблиця 2.4. Кумулянти сигналів АЕ в залежності від значень $C/3$

		Значення кумулянт κ_s , $s = \overline{1,6}$, при $b = 1$					
		κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6
Неперервна АЕ		10	10	20	60	240	$1,2 \cdot 10^3$
$C/3=0,1$	Дискр. АЕ	0,1	0,1	0,2	0,6	2,4	12
	Суміш	10,1	10,1	20,2	60,6	242,4	$1,212 \cdot 10^3$
$C/3=1$	Дискр. АЕ		10	200	$6 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$
	Суміш	11	20	220	$6,06 \cdot 10^3$	$2,402 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$
$C/3=5$	Дискр. АЕ		50	$2,5 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^8$	$1,875 \cdot 10^{11}$
	Суміш	15	260	$2,502 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^8$	$1,875 \cdot 10^{11}$

В практичних задачах часто оперують безрозмірними кумулянтними коефіцієнтами γ_s , які зі врахуванням формули (2.4) рівні [21]

$$\gamma_s = \gamma_s[\eta] \tau_0^{1-s/2} \frac{2^{\frac{s}{2}(2b-1)} \Gamma(sb-s+1)}{s^{sb-s+1} [\Gamma(2b-1)]^{\frac{s}{2}}} \quad (2.8)$$

В табл. 2.5 наведені числові значення кумулянтних коефіцієнтів

сигналів неперервної, дискретної акустичної емісії та їх суміші, в залежності від співвідношення $C/3$ (при $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$ і $\lambda_n \tau_{0n} = 10$).

Таблиця 2.5. Значення кумулянтних коефіцієнтів сигналів АЕ в залежності від $C/3$

$b = 1$		Значення кумулянтних коефіцієнтів γ_s			
		γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
Неперервна АЕ		0,632	0,6	0,759	1,2
Дискретна АЕ		6,325	60	758,947	$1,2 \cdot 10^4$
Суміш	$C/3=0,1$	0,629	0,594	0,748	1,176
	$C/3=1$	2,46	15,15	134,298	$1,5 \cdot 10^3$
	$C/3=5$	5,968	55,474	688,063	$1,067 \cdot 10^4$

Аналіз даних табл. 2.5 показав, що при співвідношенні $C/3=1$ кумулянтні коефіцієнти суміші як мінімум на порядок більші за значення кумулянтних коефіцієнтів неперервної акустичної емісії.

На відміну від кумулянт, кумулянтні коефіцієнти не мають властивостей адитивності, однак, як слідує з аналізу результатів табл. 2.5, при $C/3 \rightarrow \infty$ значення кумулянтних коефіцієнтів суміші схожі до значень відповідних кумулянтних коефіцієнтів дискретної АЕ.

Отримані результати кумулянтного аналізу дозволяють проводити безпорогову обробку сигналів акустичної емісії.

2.3. Похибки оцінювання імовірнісних характеристик

При практичному застосуванні кумулянтних коефіцієнтів використовуються їх оцінки $\bar{\gamma}_s$, отримані за експериментальними даними. Оскільки будь які оцінки є випадковими величинами, то необхідно знати помилки оцінок, зокрема, середньоквадратичні помилки, які виражаються через математичні сподівання і дисперсію оцінок. . В роботах [25, 26]

отримані математичне сподівання і дисперсія оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s , $s = 3, 4$, для $s \geq 5$ такі результати отримані в роботі [27].

Наведемо основні результати роботи [27].

Загальні співвідношення. Нехай ϵ випадкова величина ξ , яка має кумулянти κ_s , $s = \overline{1, 12}$. Після проведення експерименту з випадковою величиною ξ маємо вибірку ξ_1, \dots, ξ_N об'єму N , елементи якої є незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами. Необхідно отримати формули для оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s , $s = 5, 6$, і знайти середньоквадратичні похибки цих оцінок.

Для отримання оцінок параметрів випадкової величини використовуються різні методи [28, 29, 25], зокрема, метод моментів, метод максимальної правдоподібності, метод найменших квадратів, метод максимізації полінома та інше.

Найпростіше формули для оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s , $s = 5, 6$ можна отримати методом моментів, використовуючи відомі співвідношення [25, 26], які виражають кумулянтні коефіцієнти через центральні моменти:

$$\bar{\gamma}_5 = \frac{\bar{\mu}_5 - 10\bar{\mu}_3\bar{\mu}_2}{\bar{\mu}_2^{5/2}}, \quad (2.8)$$

$$\bar{\gamma}_6 = \frac{\bar{\mu}_6 - 15\bar{\mu}_4\bar{\mu}_2 - 10\bar{\mu}_3^2}{\bar{\mu}_2^3} + 30, \quad (2.9)$$

де $\bar{\mu}_s$ – оцінки центральних моментів:

$$\bar{\mu}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\xi_k - \bar{m})^s, \quad \bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_k.$$

В математичній статистиці [28, 29, 25, 26] основними характеристиками якості оцінок будь якого параметра θ випадкової величини ξ є незміщеність та змістовність оцінки $\bar{\theta}$.

Оцінка $\bar{\theta}$ параметра θ називається незміщеною, якщо її математичне сподівання рівне θ при будь якому об'ємі вибірки, тобто $M\{\bar{\theta}\} = \theta$.

Якщо приведена умова не виконується, то оцінка $\bar{\theta}$ є зміщеною, а величина $\Delta\{\bar{\theta}\} = M\{\bar{\theta}\} - \theta$ називається зміщенням оцінки. Якщо при збільшенні об'єму вибірки зміщення прямує до нуля, то оцінка є асимптотично незміщеною. Оцінка $\bar{\theta}$ називається змістовною, якщо при збільшенні об'єму вибірки вона сходиться до параметра θ по ймовірності. Критерієм змістовності є виконання умов $\lim_{N \rightarrow \infty} D\{\bar{\theta}\} = 0$. В технічних задачах [30, 31] характеристикою точності оцінки $\bar{\theta}$ параметра θ є середньоквадратична похибка

$$\varepsilon = \left[\mathbf{D}\{\bar{\theta}\} + \Delta^2\{\bar{\theta}\} \right]^{1/2}, \quad (2.10)$$

в якій дисперсія $D\{\bar{\theta}\}$ характеризує випадкову похибку оцінки, а зміщення $\Delta\{\bar{\theta}\}$ – її систематичну похибку.

За умови $\theta \neq 0$ зручно розглядати відносну похибку оцінки $\bar{\theta}$:

$$\delta = \varepsilon / \theta. \quad (2.11)$$

Похибки оцінки кумулянтного коефіцієнта γ_5 . Математичне сподівання оцінки (2.8) коефіцієнта γ_5 дорівнює [27].

$$\mathbf{M}\{\bar{\gamma}_5\} = \frac{\mu_5 - 10\mu_3\mu_2}{\mu_2^{5/2}} = \gamma_5. \quad (2.12)$$

З формули (2.12) слідує, що оцінка (2.8) є незміщеною, тобто систематична похибка відсутня.

Дисперсія оцінки визначається за формулою [27].

$$\mathbf{D}\{\bar{\gamma}_5\} = c_5 / N \quad (2.13)$$

де

$$c_5 = \left(\begin{array}{l} 75M_3^2M_4 + 875M_3^2 - 50M_3M_4M_5 - 435M_3M_5 + \frac{25}{4}M_4M_5^2 + 160M_6 + M_{10} + \\ + \frac{191}{4}M_5^2 + 900 - 900M_4 - 10M_4M_6 + 125M_4^2 + 30M_3M_7 - 5M_5M_7 - 20M_8 \end{array} \right). \quad (2.14)$$

$$M_s = \mu_s / \mu_2^{s/2}. \quad (2.15)$$

З виразу (2.13) слідує, що оцінка (2.8) є змістовною.

Для симетричних розподілів виразів (2.12) і (2.14) приймають наступний вигляд

$$M\{\bar{\gamma}_5\} = 0,$$

$$c_5 = 160M_6 - 900M_4 + 900 + M_{10} - 10M_4M_6 + 125M_4^2 - 20M_8. \quad (2.16)$$

Похибки оцінки кумулянтного коефіцієнта γ_6 [32]. Математичне сподівання оцінки (2.9) коефіцієнта γ_6 рівне

$$M\{\bar{\gamma}_6\} = \frac{\mu_6 - 15\mu_4\mu_2 - 10\mu_3^2}{\mu_2^3} + 30 = \gamma_6. \quad (2.17)$$

З формули (2.17) слідує, що оцінка (2.9) є незміщеною, тобто систематична похибка відсутня.

Вираз для дисперсії оцінки має вигляд [27].

$$D\{\bar{\gamma}_6\} = c_6 / N, \quad (2.18)$$

де

$$c_6 = \left(\begin{aligned} &900M_3^4M_4 + 7100M_3^4 - 180M_3^2M_4M_6 - 1180M_3^2M_6 + 9M_4M_6^2 + \\ &+ 86M_6^2 + 1800M_3^2M_4^2 + 2100M_3^2M_4 - 180M_4^2M_6 - 225M_4^2 - \\ &- 840M_4M_6 + 900M_4^3 + 14400M_3^2 + 225M_8 - 5040M_3M_5 + 60M_3^2M_8 \\ &- 12M_5M_7 + 216M_5^2 - 1560M_3^3M_5 - 1320M_3M_4M_5 + 156M_3M_5M_6 + \\ &+ M_{12} + 60M_4M_8 - 6M_6M_8 + 840M_3M_7 - 40M_3M_9 - 30M_{10} \end{aligned} \right) \quad (2.19)$$

З виразу (2.18) слідує, що оцінка (2.9) є змістовною.

В роботі [27], що при фіксованому об'ємі N вибірки середньоквадратичні похибки оцінок зростають з ростом порядку оцінюваного коефіцієнта і суттєво залежать від типу розподілу. Крім того, встановлено, що найбільші середньоквадратичні похибки мають оцінки

кумулянтних коефіцієнтів розподілення Лапласа, найменші – гаусівського розподілення.

Отримані результати дозволяють визначити діапазон можливих значень оцінок кумулянтних коефіцієнтів. Якщо припустити, що оцінки мають асимптотично гаусівський розподіл, тоді значення оцінок лежать в діапазоні $M\{\bar{\gamma}_s\} \pm 3\varepsilon_s$ зі ймовірністю 0,9973.

Середньоквадратичні похибки характеризують величину абсолютного відхилення результатів оцінювання кумулянтних коефіцієнтів γ_s від їх істинних значень. Тому доцільно зрівняти при фіксованому об'ємі N вибірки відносні похибки оцінок кумулянтних коефіцієнтів $\gamma_s \neq 0$, які в цьому випадку рівні

$$\delta_s = \frac{\varepsilon_s}{\gamma_s} = \frac{\sqrt{D\{\bar{\gamma}_s\}}}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_s} \sqrt{\frac{c_s}{N}}. \quad (2.20)$$

З формули (2.20) можна визначити мінімальний об'єм вибірки N_{\min} , при якому забезпечується задана відносна похибка δ_s : $N_{\min} = c_s / (\delta_s \gamma_s)^2$.

Результати роботи [27] свідчать про те, що для розподілів, кумулянтні коефіцієнти яких суттєво відрізняються від нуля (Лапласа, Стюдента ($\nu = 13$), логістичного) порядок мінімальних об'ємів вибірки N_{\min} для забезпечення відносних похибок 1 % і 5 % для γ_4 дорівнює відповідно 10^6 і 10^5 , а для γ_6 – 10^7 і 10^6 . Коли значення кумулянтних коефіцієнтів прагнуть до нуля (розподіл Стюдента, $\nu = 200$) необхідно суттєво збільшити мінімальний об'єм вибірки: для γ_4 – на два порядки, для γ_6 – на чотири порядки.

На основі порівняльного аналізу середньоквадратичних похибок оцінок кумулянтних коефіцієнтів типових симетричних розподілів встановлено, що для оцінок кумулянтних коефіцієнтів, значення яких суттєво відрізняються від нуля, відносна похибка 5 % забезпечується при об'ємі вибірки не менше

10^5 (для оцінки $\bar{\gamma}_4$) і 10^6 (для оцінки $\bar{\gamma}_6$). При прагненні значень кумулянтних коефіцієнтів до нуля мінімальний об'єм вибірки зростає на кілька порядків.

Висновки по розділу 2

На основі прийнятої моделі акустико-емісійних сигналів задача виявлення дискретної акустичної емісії (корисного сигналу) розглядається на тлі неперервної акустичної емісії (завади).

Для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії обґрунтовані нові інформативні характеристики кумулянтні коефіцієнти. Встановлено, що при появі дискретної акустичної емісії кумулянтні коефіцієнти збільшуються на порядок и більше, що дозволяє виявляти сигнали дискретної акустичної емісії при співвідношенні сигнал/завада $C/Z = 1$.

Аналіз похибок оцінювання оцінок кумулянтних коефіцієнтів п'ятого и шостого порядків за відомими центральними моментами, дозволяє з наперед заданими похибками оцінювання визначити мінімальний об'єм вибірки, необхідний при моделюванні сигналів акустичної емісії.

Розділ 3. СИСТЕМА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ДИСКРЕТНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

3.1. Структурна схема детектора

На основі результатів параграфів 3.1-3.3 розроблено структурну схему детектора (рис. 3.1) сигналів дискретної акустичної емісії.



Рис. 3.1. Структурна схема безпорогового пристрою для виявлення сигналів АЕ

Основною відмінністю розробленого пристрою є відсутність в схемі детектора-дискримінатора. Безпорогова реєстрація даних дозволяє здійснювати запис сигналу без втрати інформації про об'єкт діагностування і тим самим підвищує чутливість і достовірність акустико-емісійного контролю.

Схема реєстрації сигналів акустичної емісії включає в себе перетворювач акустичної емісії (ПАЕ), попередній широкопasmовий підсилювач, АЦП, блок реєстрації сигналів акустичної емісії (АЕ), що представляє собою пам'ять на жорсткому диску персонального комп'ютера (ПК), і блок управління. У блоці управління програмно встановлюються

необхідні параметри запису - частота дискретизації, підсилення в АЦП, час реєстрації, тривалість запису і ін.

Блок експрес-аналізу призначений для попереднього аналізу акустико-емісійного сигналу. У блоці передбачена програмна установка порогу дискримінації і можливість розрахунку основних стандартних параметрів АЕ - числа імпульсів, сумарного рахунку, активності, швидкості рахунку, енергії.

За відсутності в результатах експрес-аналізу ознак наявності сигналів дискретної акустичної емісії, аналізований сигнал подається на блок стандартної обробки. У блоці проводиться оцінка найпростіших імовірнісних характеристик - математичного сподівання і дисперсії, на підставі яких здійснюється перевірка сигналу на стаціонарність і випадковість. Також в блоці вимірюються кореляційна функція, спектральна щільність і щільність ймовірностей.

Основним блоком пристрою для виявлення сигналів АЕ є блок обчислення запропонованих в роботі інформативних характеристик виявлення, на виході якого отримуємо оцінки кумулянтних коефіцієнтів γ_s , $s = \overline{3,6}$.

У блоці виявлення відбувається перевірка основних правил для кумулянтних коефіцієнтів та здійснюється прийняття рішення про наявність чи відсутність сигналів дискретної акустичної емісії.

Для перевірки можливості працювати програмного забезпечення є блок моделювання тестових сигналів, що дозволяє змодельовати сигнали безперервної, дискретної АЕ і їх суміші з наперед заданими параметрами.

У блоці візуалізації і реєстрації відображаються отримані інформативні параметри, графіки реалізацій сигналів і їх імовірнісних характеристик.

Робота безпорогового пристрою виявлення перевірена імітаційним комп'ютерним моделюванням з використанням розробленого блоку моделювання тестових сигналів.

3.2. Теоретичний розрахунок пристрою для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії

Сформулюємо правило виявлення сигналів дискретної АЕ, покладене в основу роботи детектора (див. Рис. 3.1).

Позначимо H_0 , H_1 – гіпотези відсутності і наявності сигналу дискретної АЕ в прийнятому сигналі. Для перевірки гіпотез використовуємо оцінки кумулянтних коефіцієнтів прийнятого сигналу.

Нехай $\bar{\gamma}_s$ – оцінки кумулянтних коефіцієнтів досліджуваного сигналу; γ_{SH} – теоретичні значення кумулянтних коефіцієнтів сигналу безперервної АЕ. Приймається гіпотеза H_1 , якщо відмінна від нуля відстань між гіпотезами:

$$d_s(H_0, H_1) = M \{ \bar{\gamma}_s \} - \gamma_{SH}, \quad s = \overline{3, 6}, \quad (3.1)$$

Обчислимо середньоквадратичні похибки оцінок коефіцієнтів γ_s , $s = \overline{3, 6}$, сигналів неперервної та дискретної АЕ. Обмежимося розглядом сигналів АЕ поблизу джерела виникнення, тому будемо вважати форму імпульсів експоненціальною, а розподіл амплітуд імпульсів - показовим. Базуючись на результатах параграфу 3.2 в цьому випадку сигнали АЕ мають гамма-розподіл з параметром форми $\lambda\tau_0$ і параметром масштабу β^{-1} .

Для отримання похибок оцінок $\bar{\gamma}_s$, $s = \overline{3, 6}$, для суміші неперервної і дискретної АЕ необхідно отримати значення центральних моментів, для чого використовуємо розраховані значення кумулянт суміші і врахуємо їх зв'язок з центральними моментами [26]

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \kappa_2, & \mu_3 &= \kappa_3, & \mu_4 &= \kappa_4 + 3\kappa_2^2, & \mu_5 &= \kappa_5 + 10\kappa_2\kappa_3, \\ \mu_6 &= \kappa_6 + 15\kappa_2\kappa_4 + 10\kappa_3^2 + 15\kappa_2^3, & \mu_7 &= \kappa_7 + 21\kappa_2\kappa_5 + 35\kappa_3\kappa_4 + 105\kappa_2^2\kappa_3, \\ \mu_8 &= \kappa_8 + 28\kappa_2\kappa_6 + 56\kappa_3\kappa_5 + 35\kappa_4^2 + 210\kappa_2^2\kappa_4 + 280\kappa_2\kappa_3^2 + 105\kappa_2^4, \\ \mu_{10} &= \kappa_{10} + 45\kappa_2\kappa_8 + 120\kappa_3\kappa_7 + 210\kappa_4\kappa_6 + 630\kappa_2^2\kappa_6 + 126\kappa_5^2 + \\ &+ 2520\kappa_2\kappa_3\kappa_5 + 1575\kappa_2\kappa_4^2 + 2100\kappa_3^2\kappa_4 + 3150\kappa_2^3\kappa_4 + 6300\kappa_2^2\kappa_3^2 + 945\kappa_2^5. \end{aligned} \quad (3.2)$$

При розрахунках обмежимося об'ємом вибірки $N = 5 \cdot 10^5$, що пов'язано з часом моделювання при подальшому комп'ютерному моделюванні сигналів АЕ. Помилка оцінки $\bar{\gamma}_6$ для суміші не аналізується, так як в літературі відсутні вирази, які пов'язують центральні моменти і кумулянти вище десятого порядку (в наведених нижче таблицях у відповідній колонці стоїть прочерк).

В табл. 3.12 наведені значення коефіцієнтів c_s оцінок $\bar{\gamma}_s$, $s = \overline{3,6}$, розраховані за формулами для неперервної, дискретної акустичної емісії та їх суміші при $\lambda_n \tau_{0n} = 10$; $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$; $C/3=1$.

Таблиця 3.12. Значення коефіцієнтів c_s , при $N = 5 \cdot 10^5$

Вид сигналу	c_s			
	c_3	c_4	c_5	c_6
Неперервна АЕ	9,9	167,904	$3,147 \cdot 10^3$	$7,747 \cdot 10^4$
Дискретна АЕ	$3,366 \cdot 10^3$	$3,435 \cdot 10^6$	$3,431 \cdot 10^9$	$4,327 \cdot 10^{12}$
Суміш	830,514	$2,799 \cdot 10^5$	$1,211 \cdot 10^8$	-

У табл. 3.13 наведені розраховані середньоквадратичні похибки оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s для вибірок об'єму $N = 5 \cdot 10^5$.

Таблиця 3.13. Значення середньоквадратичної похибки оцінок при $N = 5 \cdot 10^5$

Вид сигналу	ε_s			
	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
Неперервна АЕ	$4,45 \cdot 10^{-3}$	0,018	0,079	0,394
Дискретна АЕ	0,082	2,621	82,841	$2,942 \cdot 10^3$
Суміш	0,041	0,748	15,562	-

В табл. 3.14 наведені числові значення відносних похибок $\delta_s, s = \overline{3,6}$ при об'ємі вибірки $N = 5 \cdot 10^5$.

Таблиця 3.14. Значення відносної похибки при $N = 5 \cdot 10^5$

Вид сигналу	$\delta_s, \%$			
	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
Неперервна АЕ	0,704	3,054	10,454	32,801
Дискретна АЕ	1,297	4,368	10,915	24,514
Суміш	1,657	4,939	11,588	-

Отримані результати дозволяють визначити діапазон можливих значень оцінок кумулянтних коефіцієнтів. Якщо припустити, виходячи з [25], що оцінки $\bar{\gamma}_s$ мають асимптотично гауссівський розподіл, то значення оцінок належать діапазону $M\{\bar{\gamma}_s\} \pm 3\varepsilon_s$ зі ймовірністю 0,9973.

В табл. 3.15 наведені можливі діапазони значень кумулянтних коефіцієнтів $\gamma_s, s = \overline{3,6}$, сигналів неперервної і дискретної акустичної емісії, суміші при об'ємі вибірки $N = 5 \cdot 10^5$.

Таблиця 3.15. Діапазони можливих значень оцінок γ_s при $N = 5 \cdot 10^5$

Вид Сигналу	$M\{\bar{\gamma}_3\} \pm 3\varepsilon_3$	$M\{\bar{\gamma}_4\} \pm 3\varepsilon_4$	$M\{\bar{\gamma}_5\} \pm 3\varepsilon_5$	$M\{\bar{\gamma}_6\} \pm 3\varepsilon_6$
Непер. АЕ			0,759±0,238	
Дискр. АЕ	0,632±0,013	0,6±0,055	758,947±248,52	1,2±1,181
Суміш	6,325±0,246	60±7,863	3	$1,2 \cdot 10^4 \pm 8,825 \cdot 10^3$
	2,46±0,122	15,15±2,245	134,298±46,687	-

3.3. Імітаційне моделювання пристрою виявлення сигналів АЕ.

Імітаційне моделювання сигналів акустичної емісії реалізоване в блоці тестового моделювання на основі моделей (3.1) – (3.3) і базується на результатах роботи [33]. Алгоритм моделювання містить наступні основні етапи.

1. Визначення кроку дискретизації Δt сигналу, що моделюють. Величину Δt вибирають на основі кореляційної функції сигналу (набагато менше інтервалу кореляції $\Delta t \ll \tau_{cor}$) або на основі його спектральної щільності (обернено пропорційно ефективній смузі частот спектра сигналу).

2. Визначення необхідної протяжності реалізацій, що моделюють і формування масиву дискретних моментів часу t , для яких будуть змодельовані рахунки шумового сигналу. Часовий інтервал Δt між сусідніми елементами масиву рівний кроку дискретизації сигналу.

3. Створення масиву моментів часу t_k , поява елементарних імпульсів. Випадкові величини t_k моделюються виходячи з заданої інтенсивності λ пуассонівського потоку подій, у якого інтервали між сусідніми моментами t_k розподілені за показниковим законом.

4. Формування масиву випадкових амплітуд η_k імпульсів з потрібним законом розподілу. Для отримання значень величини η_k використовуються або стандартні датчики псевдовипадкових чисел, або відомі методи моделювання випадкових величин.

5. Формування k -го елементарного імпульсу. Для цього моделюється функція $h(t)$, зміщена на величину t_k і помножена на відповідне значення амплітуди η_k .

6. Моделювання реалізацій процесів (3.2) і (3.3). Реалізація формується сумуванням отриманих раніше елементарних імпульсів для всіх значень з масиву часу.

Алгоритм моделювання реалізований за допомогою програмного середовища Matlab. Змодельований ансамбль з 70-ти реалізацій $\xi_i(t)$, $i = \overline{1, 70}$, сигналів неперервної, дискретної АЕ та їх суміші. Об'єм вибірки для кожної реалізації складає $N = 5 \cdot 10^5$ рахунків; $\lambda_n \tau_{0n} = 10$; $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$; $C/3=1$.

Для кожної з реалізацій $\xi_i(t)$, $i = \overline{1, 70}$, проведена оцінка кумулянтних коефіцієнтів. Теоретичні значення кумулянтних коефіцієнтів γ_s , математичні сподівання та відносні похибки їх оцінок наведені в табл. 4.16.

Таблиця 3.16. Значення кумулянтних коефіцієнтів

Вид сигналу		γ_s			
		γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
Неперервна АЕ	теор. знач. оцінка	0,632 0,6279	0,6 0,6058	0,759 0,7684	1,2 1,0877
	віднозн. похибка, %	0,65	0,97	1,23	9,35
Дискретна АЕ	теор. знач. оцінка	6,325 6,1959	60 56,4209	758,947 665,0673	$1,2 \cdot 10^4$ 9431,499
	віднозн. похибка, %	2,04	5,97	12,37	21,4
Суміш	теор. знач. оцінка	2,46 2,4698	15,15 14,7471	134,298 122,0586	1500 1219,595
	віднозн. похибка, %	0,40	2,66	9,11	18,69

На рис. 3.2 представлені області оцінок кумулянтних коефіцієнтів $\gamma_s, s = \overline{3, 6}$, сигналів неперервної акустичної емісії та суміші.

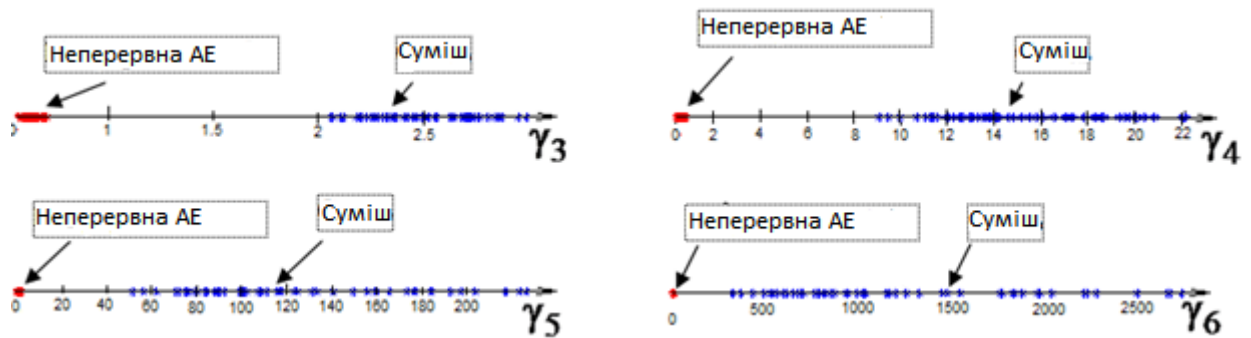


Рис. 3.2. Одномірні області оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s

З приведених даних видно, що області оцінок кумулянтних коефіцієнтів для неперервної акустичної емісії не перетинаються з аналогічними областями оцінок кумулянтних коефіцієнтів суміші.

Кількісно відстань між гіпотезами оцінюється величиною $d_s(H_0, H_1)$, числові значення якої наведені в табл. 3.17.

Таблиця 3.17. Значення відстані між гіпотезами $d_s(H_0, H_1)$

	s			
	3	4	5	6
$d_s(H_0, H_1)$	1,359	8,237	49,483	314,788

На рис. 4.8–4.10 наведені області оцінок кумулянтних коефіцієнтів в одномірній, двомірній и трьохмірній системах координат, що дозволяє в якості характеристик виявлення застосувати як самі кумулянтні коефіцієнти, так і їх різноманітні комбінації.

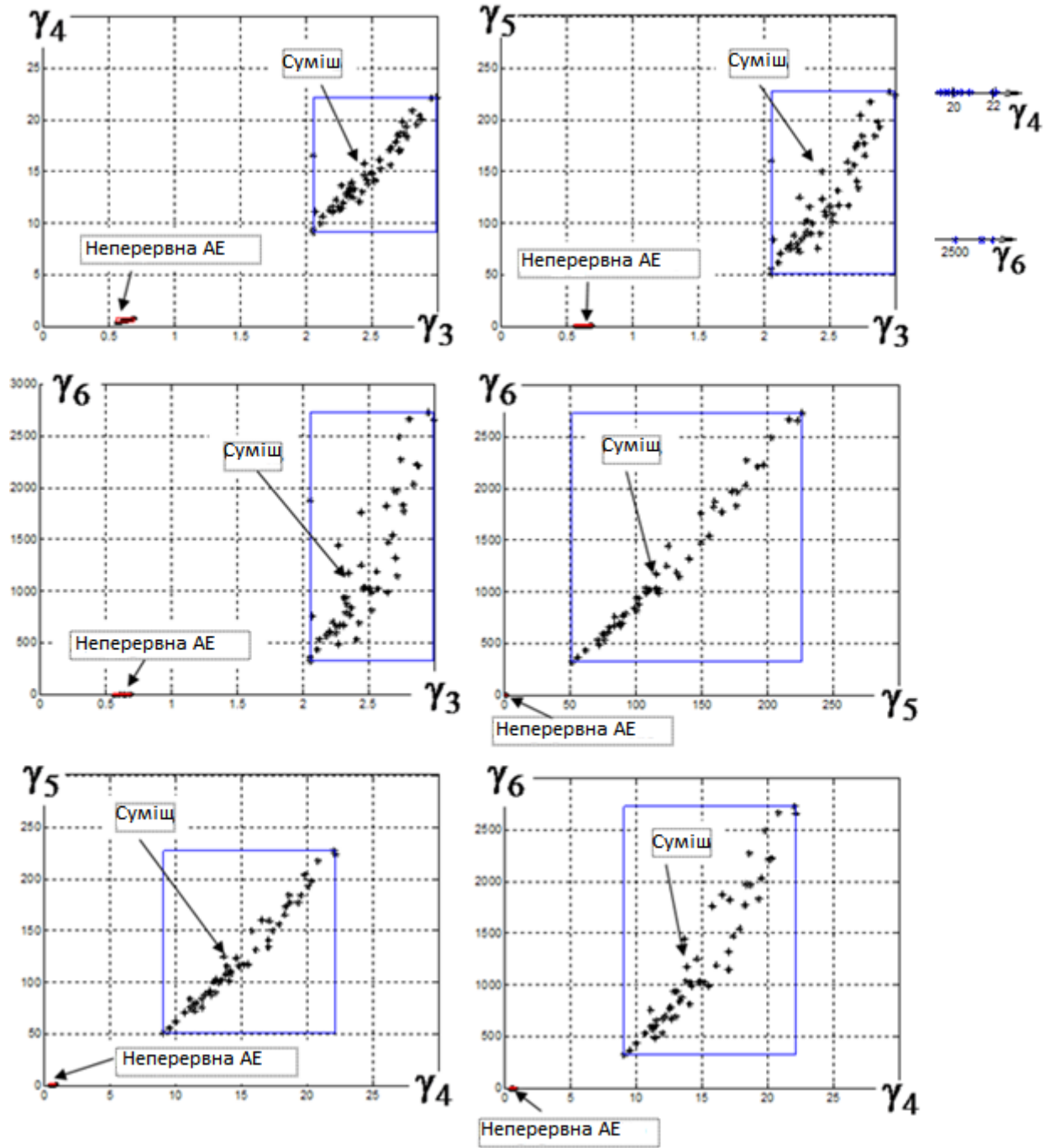


Рис. 3.3. Двомірні області оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s

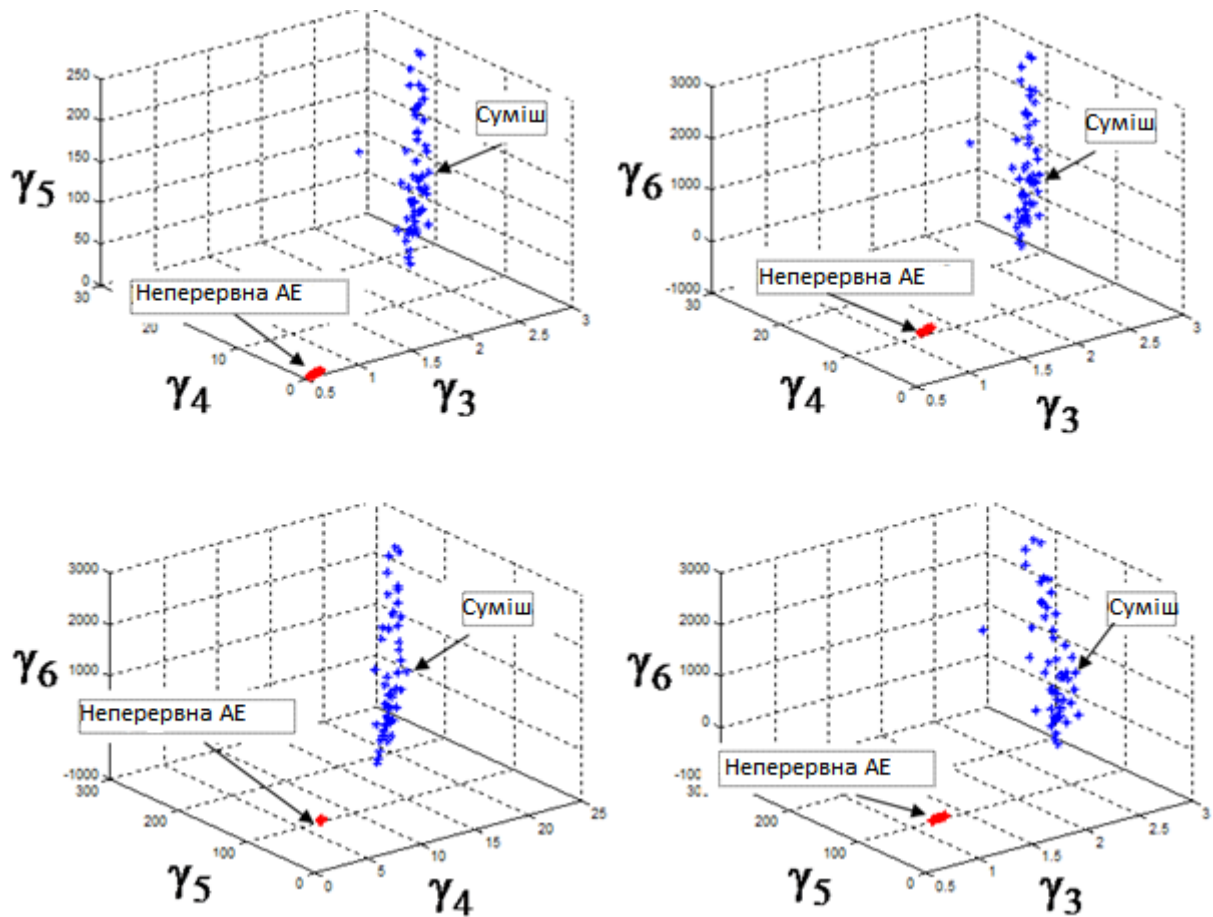


Рис. 3.4. Трьохмірні області оцінок кумулянтних коефіцієнтів γ_s

З аналізу рис. 3.2–3.4 и даних табл. 3.17 слідує, що в результаті застосування розробленого детектора сигнали дискретної акустичної емісії з одиничною ймовірністю можна виявити на тлі неперервної акустичної емісії уже при співвідношенні $C/Z=1$.

3.4. Порівняння з пороговим виявлячем

В параграфі 3.1 відмічалось, що одним з основних методів виявлення дискретної акустичної емісії є аналіз сумарного рахунку акустичної емісії, тобто суми імпульсів, які перевищили деякий поріг.

Порівняємо характеристики такого виявлення дискретної акустичної емісії на тлі неперервної з характеристиками розробленого пристрою для виявлення

при $\lambda_n \tau_{0n} = 10$; $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$; $C/3 = 1$.

Часто в літературі закон розподілу сигналів акустичної емісії вважають гауссівським, тому порогове значення розраховують виходячи з правила

« 3σ », де $\sigma = \sqrt{D\{\xi_n(t)\}}$, $D\{\}$ – оператор дисперсії, тобто

$$x_{\text{пор}} = M\{\xi_n(t)\} + 3\sqrt{D\{\xi_n(t)\}}. \quad (3.3)$$

Враховуючи, що $\kappa_1 = M\{\xi(t)\}$, $\kappa_2 = D\{\xi(t)\}$ и використовуючи вираз (3.1), отримуємо з формули (3.3) при $\beta_n = 1$.

$$x_{\text{пор}} = \lambda_n \tau_{0n} \beta_n^{-1} + 3\sqrt{\lambda_n \tau_{0n} \beta_n^{-2}} = 10 + 3\sqrt{10} \approx 19,487. \quad (3.4)$$

В роботі проведено імітаційне моделювання 100 реалізацій сигналів акустичної емісії, об'ємом вибірки по 50 000 рахунків кожна. В результаті усереднення по всіх реалізаціях за допомогою програмного середовища Matlab отримані значення сумарного рахунку акустичної емісії N_Σ , кількості імпульсів неперервної $N_{\text{нп}}$ та дискретної $N_{\text{дп}}$ акустичної емісії, які перевищили порогове значення $x_{\text{пор}}$, а також загальну кількість імпульсів дискретної акустичної емісії N_d (табл. 3.18).

Таблиця 3.18. Значення кількості імпульсів N_Σ , $N_{\text{нп}}$, $N_{\text{дп}}$, N_d

$C/3$	N_Σ	$N_{\text{нп}}$	$N_{\text{дп}}$	N_d
0,1	39	37	0	50
1	83	40	9	49
2	96	34	20	51

Для виявлення всіх імпульсів дискретної акустичної емісії необхідно виконання умови:

$$N_\Sigma = N_{\text{нп}} + N_d.$$

Як видно з табл. 3.18 дана умова не виконується. Пояснимо цей факт для

$C/3=1$ на прикладі отриманих за допомогою моделювання графіків реалізацій (рис. 3.5). Проаналізуємо реалізацію сигналу дискретної акустичної емісії та реалізацію суміші.

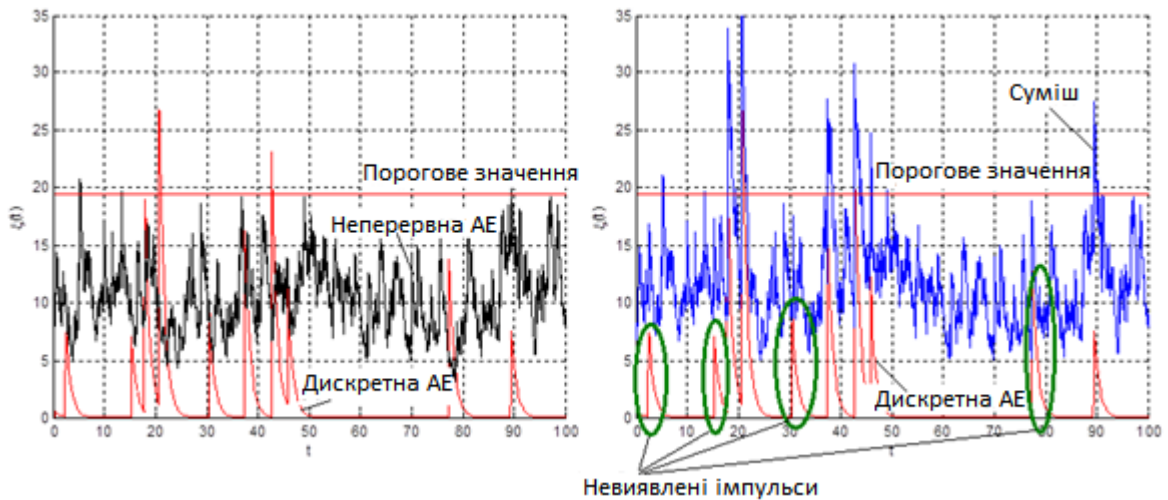


Рис. 3.5. Реалізації сигналів АЕ: неперервна і дискретна АЕ (а); дискретна АЕ (б) і суміші при $C/3=1$

З рис. 3.5 видно, що частина імпульсів дискретної АЕ в результаті порогової обробки не виявлена (виділені еліпсами). Дослідження показали, що для невиявлених імпульсів дискретної акустичної емісії досягає 30 % і більше. З іншого боку, декілька імпульсів неперервної АЕ можуть перевищити вказаний поріг за рахунок протяжності одного імпульсу дискретної АЕ, що в підсумку приводить до хибного виявлення. Таким чином, однозначно інтерпретувати результати сумарної акустичної емісії (табл. 3.18) не є можливим.

Визначимо частоти хибного виявлення \bar{p}_2 сигналу і його пропуску \bar{p}_1 для змодельованих реалізацій сигналів неперервної АЕ і суміші. Частоту хибного виявлення \bar{p}_2 визначимо як відношення кількості рахунків сигналів неперервної АЕ, які перевищили вибраний поріг, до загальної кількості рахунків N . Частота пропуску сигналу \bar{p}_1 визначається як відношення кількості рахунків суміші, які не перевищили поріг, до загальної кількості рахунків N , тобто

$$\bar{p}_1 = P\{\xi(t) < x_{\text{пор}}\}, \quad \bar{p}_2 = P\{\xi_{\text{ш}}(t) > x_{\text{пор}}\}, \quad (3.5)$$

де $x_{\text{пор}}$ визначається з виразу (3.48).

Частоти, отримані шляхом усереднення 70-ти реалізацій сигналів АЕ, рівні $\bar{p}_1 = 0,96$, $\bar{p}_2 = 0,007$. Очевидно, що вибір порогового значення впливає на величини ймовірності хибного виявлення і пропуску сигналу, до того ж зменшення ймовірності пропуску сигналу несе за собою збільшення ймовірності хибного виявлення. Допустимі значення вказаних величин визначаються умовами конкретної задачі.

Визначимо частоти хибного виявлення $\bar{p}_2(s)$ і пропуску $\bar{p}_1(s)$ сигналу дискретної АЕ по оцінках кумулянтних коефіцієнтів γ_s , ґрунтуючись на припущенні про гауссівський закон розподілу оцінок кумулянтних коефіцієнтів, тобто

$$\bar{p}_1(s) = P\{\bar{\gamma}_s < \gamma_{\text{ш}} + 3\varepsilon_{\text{ш}}\}; \quad \bar{p}_2(s) = P\{\bar{\gamma}_{\text{ш}} > \gamma_{\text{ш}} + 3\varepsilon_{\text{ш}}\}. \quad (3.6)$$

Значення частот, отримані за сімдесятьма оцінками кумулянтних коефіцієнтів $\gamma_s, s = \overline{3,6}$, зведені в табл. 3.19.

Таблиця 3.19. Частоти хибного виявлення і пропуску сигналу АЕ по оцінках кумулянтних коефіцієнтів

	s			
	3	4	5	6
$\bar{p}_1(s)$	0	0	0	0
$\bar{p}_2(s)$	0,24	0,34	0,3	0,3

Порівняння результатів обрахувань частот хибного виявлення і пропуску сигналу по формулах (3.5) і (3.6), показало перевагу розробленого пристрою. Перевагою виявлення сигналів дискретної АЕ за оцінками кумулянтних коефіцієнтів порівняно з пороговим виявленням є зменшення ймовірності пропуску сигналу з 0,96 до 0. До недоліків можна віднести

збільшення ймовірності хибного виявлення з 0,007 до 0,24. Такий недолік пояснюється малою величиною вибраного в формулі (3.6) порогу $\gamma_{\text{SH}} + 3\varepsilon_{\text{SH}}$ і легко усувається збільшенням значення порогу. Тоді ймовірність хибного виявлення кумулянтного детектора можна зменшити практично до нуля, зберігаючи при цьому незмінною ймовірність пропуску сигналу.

Висновки по розділу 3

Розроблена узагальнена схема пристрою для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії, яка базується на вимірюванні пуассонівської спектральної щільності і кумулянтних коефіцієнтів та на безпороговій реєстрації сигналів. В результаті імітаційного моделювання сигналів акустичної емісії встановлено, що розроблений детектор забезпечує нульову ймовірність пропуску сигналу.

Основною відмінною особливістю розробленого пристрою є відсутність в схемі детектора-дискримінатора. Безпорогова реєстрація даних дозволяє здійснювати запис сигналу без втрати інформації про об'єкт діагностування і тим самим підвищує чутливість і достовірність акустико-емісійного контролю.

В результаті застосування розробленого детектора сигнали дискретної акустичної емісії з одиничною ймовірністю можна виявити на тлі неперервної акустичної емісії уже при співвідношенні $C/3=1$.

Перевагою виявлення сигналів дискретної АЕ за оцінками кумулянтних коефіцієнтів порівняно з пороговим виявленням є зменшення ймовірності пропуску сигналу з 0,96 до 0. До недоліків можна віднести збільшення ймовірності хибного виявлення з 0,007 до 0,24. Такий недолік пояснюється малою величиною вибраного в формулі (3.6) порогу $\gamma_{\text{SH}} + 3\varepsilon_{\text{SH}}$ і легко усувається збільшенням значення порогу. Тоді ймовірність хибного виявлення кумулянтного детектора можна зменшити практично до нуля,

зберігаючи при цьому незмінною ймовірність пропуску сигналу.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Відомі методи і системи акустико-емісійної діагностики базуються на аналізі сигналів акустичної емісії, при реєстрації яких використовуються порогові пристрої, що призводить до втрати частини корисної інформації, яка міститься в сигналі.

2. На основі прийнятої моделі акустико-емісійних сигналів задача виявлення дискретної акустичної емісії (корисного сигналу) розглядається на тлі неперервної акустичної емісії (перешкоди).

3. Для виявлення сигналів дискретної акустичної емісії обґрунтоване використання кумулянтних коефіцієнтів. Встановлено, що при появі дискретної акустичної емісії кумулянтні коефіцієнти збільшуються на порядок і більше, що дозволяє виявляти сигнали дискретної акустичної емісії при співвідношенні сигнал / завада $C / Z = 1$.

5. Розроблено узагальнену схему детектора сигналів дискретної акустичної емісії, яка базується на вимірюванні пуассонівської спектральної щільності і кумулянтних коефіцієнтів і безпорогової реєстрації сигналів. В результаті імітаційного моделювання сигналів акустичної емісії встановлено, що розроблений пристрій для виявлення забезпечує нульову ймовірність пропуску сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: у 3 т. – Т.1: Теоретичні основи методу акустичної емісії / З. Т. Назарчук. – К.: Наукова думка, 2009. – 287 с.
2. Андрейкив А. Е. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак. – К.: Наукова думка, 1989. – 172 с.
3. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / С. Ф. Филоненко. – К.: КМУГА, 1999. – 312 с.
4. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. – Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.
5. Дробот Ю. Б. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю. Б. Дробот, А. М. Лазарев. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
6. Pollock A. Acoustic Emission Inspection / A. Pollock // Metals Handbook. – 9th Edition, ASM International. – 1989. – Vol. 17. – P. 278–294.
7. Иванов В. И. Классификация источников акустической эмиссии / В. И. Иванов, С. П. Быков // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1985. – № 1. – С. 67–74.
8. Овчарук В. Н. Использование вторичных параметров спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии / В. Н. Овчарук // Моделирование систем. – 2005. – №2 (10). – С. 14–24.
9. Попов А. В. Оценка прочности на основе инвариантов амплитуд сигналов акустической эмиссии / А. В. Попов, В. Э. Жумай // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 21–25.

10. Расщепляев Ю. С. Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии / Ю. С. Расщепляев, А. В. Попов // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 79–82.
11. Попов А. В. Акустико-эмиссионное устройство контроля технического состояния конструкций с использованием метода инвариантов / А. В. Попов, И. В. Косенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 116–120.
12. Куксенко В. С. Акустико-эмиссионный метод регистрации трещинообразования в реальных конструкциях / В. С. Куксенко, К. Е. Нагиев, В. Н. Савельев, М. З. Рустамова // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 9. – С. 45–48.
13. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
14. Иванов В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
15. Оглезнева Л. А. Сравнительные характеристики акустико – эмиссионных систем / Л. А. Оглезнева // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1(1). – С. 211–219.
16. Красильников А.И. Конструктивные модели акустико-эмиссионных сигналов: Консонанс-2015: акустичний симпозиум, 29–30 вересня 2015р.: збірник праць. К., Інститут гідромеханіки НАНУ, 2015, С. 110–115.
17. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики / С.И. Буйло. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федеральн. ун-та, 2008. – 192 с.
18. Акустическая эмиссия и её применения для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др.; под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.

19. Акустическая эмиссия и её применения для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др.; под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
20. Красновский Р. О. Современные методы и средства измерения акустической эмиссии: Обзорн. информ. / Р. О. Красновский, М. В. Чернопыжский. – М.: ВНИИКИ, 1987. – 64 с.
21. Горовецкая Т. А. Кумулянтный анализ $1/f$ шума / Т. А. Горовецкая, А. И. Красильников // Электроника и связь. – 2007. – № 6 (41). – С. 5–18.
22. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы / С. М. Рытов. – М.: Наука, 1976. – 496 с.
23. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований / А. Н. Малахов. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
24. Пугачев В.С. Стохастические дифференциальные системы / В. С. Пугачев, И. Н. Синицын. – М.: Наука, 1985. – 560 с.
25. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер; пер. с англ. А. С. Мониной, А. А. Петрова; под. ред. А. Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
26. Кендалл М. Теория распределений / М. Кендалл, А. Стьюарт; пер. с англ. В. В. Сазонова, А. Н. Ширяева; под. ред. А. Н. Колмогорова. – М.: Наука, 1966. – 588 с.
27. Берегун В.С., О.В. Гармаш, А.И. Красильников. Среднеквадратические ошибки оценок кумулянтных коэффициентов пятого и шестого порядков – Электронное моделирование, Т. 36, № 1, 2014, С. 17–28.
28. Кунченко Ю. П. Полиномиальные оценки параметров близких к гауссовским случайных величин. Ч. 1. Стохастические полиномы, их свойства и применения для нахождения оценок параметров / Ю. П. Кунченко. – Черкассы: ЧИТИ, 2001. – 133 с.

29. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
30. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – 2-е. изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
31. Бендат Дж., Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер с англ. В. Е. Привальского, А. И. Кочубинского; под ред. И. Н. Коваленко. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
32. Берегун В. С. Среднеквадратические ошибки оценок кумулянтных коэффициентов пятого и шестого порядков / В. С. Берегун, О. В. Гармаш, А. И. Красильников // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36., № 1. – С. 17–28.
33. Бабак В. П. Имитационное моделирование шумовых сигналов, возникающих при работе теплоэнергетического оборудования / В. П. Бабак, В. С. Берегун, А. И. Красильников, Т. А. Полобюк // Научни известия на НТСМ. – год. XXI, бр. 2 (139) – юни 2013. – С. 124–128. (ISSN 1310-3946) (Болгарія).