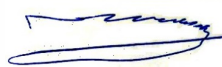


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем
Спеціальність 171 Електроніка
Освітня програма «Акустичні електронні системи та технології обробки
акустичної інформації»

«До захисту допущено»

 Завідувач кафедри
_____ С. А. Найда
« 14 » _____ об _____ 2023 р.


Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
на тему: «Дослідження акустичної емісії за допомогою спектральних
характеристик»

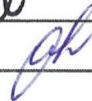
Виконала:


студентка 4 курсу, групи ДГ-91
Гречанівська Софія Костянтинівна

Керівник: доц. Гармаш О. В.

Рецензент: доцент кафедри ЕПС,
к.т.н. Тугай С.Б.





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

Київ - 2023

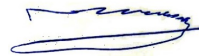
**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

Освітня програма: «Акустичні електронні системи та технології обробки
акустичної інформації»

ЗАТВЕРДЖУЮ



Завідувач кафедри

С. А. Найда

« 30 » _____ 05 _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Гречанівській Софії Костянтинівні

1. **Тема роботи:** «Дослідження акустичної емісії за допомогою спектральних характеристик» затверджена наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2063-с

2. **Термін здачі** студентом закінченого проекту «15» червня 2023 р.

3. **Вихідні дані** по роботі: об'єкт дослідження - сигнали акустичної емісії, що виникають в об'єкті дослідження в результаті їх природнього функціонування; метод дослідження – спектральний аналіз, предмет дослідження - спектральні характеристики.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Аналіз науково-технічної літератури.

2. Дослідження видів аналізу АЕ.

3. Ознайомлення із спектральним аналізом, характеристиками.

4. Вивчення прикладного застосування спектрального аналізу для дослідження АЕ.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання Позначки керівника про виконання завдань	Термін виконання Позначки керівника про виконання завдань
1	Формування завдання роботи	3.10.2022 – 6.11.2022	<i>виконано</i>
2	Обговорення змісту ПЗ	7.11.2022 – 18.12.2022	<i>виконано</i>
3	Пошук та аналіз джерел	19.12.2022 – 12.02.2023	<i>виконано</i>
4	Робота над теоретичною частиною роботи	13.02.2023 – 16.04.2023	<i>виконано</i>
5	Написання теоретичної частини, дослідження математичних характеристик	17.04.2023 – 21.05.2023	<i>виконано</i>
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації	22.05.2023 – 12.06.2023	<i>виконано</i>

Студент:

Гречанівська С. К.

Керівник дипломної роботи:

Доц. Гармаш О. В.

АНОТАЦІЯ

Метою роботи є дослідження акустичної емісії із використанням спектральних характеристик.

У роботі розглянуто теоретичні засади даного методу неруйнівного контролю, доведено поширеність та актуальність методу. Продемонстровано основні параметри різних видів аналізу сигналів акустичної емісії, описано особливості їх застосування, наведено математичні вирази. Детально показано, які переваги несуть частотний метод та спектральні характеристики як інструмент дослідження.

У практичній частині розглянуто реальні системи застосування спектральних характеристик, особливості та результати проведених експериментів.

Ключові слова: акустична емісія, акустичні хвилі, перетворення Фур'є, неруйнівний контроль, п'єзоелектричні перетворювачі, функція щільності ймовірності, випадкові процеси, спектральний аналіз, вейвлет-перетворення.

ABSTRACT

The purpose of the thesis is the study of acoustic emission using spectral characteristics.

The work considers the theoretical basis of this method of non-destructive testing, proves the extension and relevance of the method. The main parameters of various types of analysis of acoustic emission signals are demonstrated, the features of their application are described, and mathematical expressions are given. The advantages of the frequency method and spectral characteristics as a research tool are shown in detail.

The practical part presents real systems of application of spectral characteristics, features and results of conducted experiments.

Key words: Acoustic emission, Acoustic waves, Fourier transforms, Nondestructive testing, Piezoelectric transducers, Probability density function, Random processes, Spectral Analysis, Wavelet Transforms.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	11
1.1. Місце методу акустичної емісії у неруйнівному контролі	11
1.2. Види та джерела виникнення акустичної емісії	15
1.3. Загальний підхід до використання методу акустичної емісії та приклади його застосування	16
Висновки до Розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. МІСЦЕ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕД ВИДІВ АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	21
2.1. Основні математичні характеристики сигналів акустичної емісії..	21
2.2. Статистичний метод дослідження сигналів акустичної емісії.....	23
2.3. Амплітудний метод дослідження сигналів акустичної емісії	24
2.4. Дослідження сигналів акустичної емісії у часовій області	26
2.5. Аналіз частотної області сигналів акустичної емісії.....	27
2.6. Перетворення Фур'є	30
2.7. Вейвлет-аналіз та його приклади застосування.....	30
Висновки до Розділу 2	34
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РЕАЛЬНИХ ДОСЛІДАХ	35
3.1. Дослідження бетонних зразків після кліматичних навантажень	35
3.2. Дослідження руйнувань за енергетичними рівнями корунду, натрій-кальцій-силікатне скло та сталь 38ХНЗМФА	38

3.3. Дослідження руйнувань конструкційної сталі 38ХНЗМФА через вейвлет-перетворення	41
Висновки до Розділу 3	43
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЕ – акустична емісія;

ВП – випадковий процес;

ДВП – дискретне вейвлет-перетворення;

КІН – коефіцієнт інтенсивності навантажень;

НВП – неперервне вейвлет-перетворення;

НК – неруйнівний контроль;

ОК – об'єкт контролю ;

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;

ПП – первинний перетворювач;

САЕ – сигнали АЕ;

УЗ – ультразвук, ультразвуковий.

ВСТУП

Неруйнівний контроль має на меті оцінку різного роду виробів на наявність дефектів, шляхом огляду його структури неруйнівними методами. Будівлі, мости, залізничний та авіатранспорт, обладнання електростанцій та інших промислових заводів, окремі одиниці обладнання та їх компоненти – усе це постійно перевіряється інженерами у галузі неруйнівного контролю. Більше того, є конкретні методики для періодичних перевірок як на етапі будівництва чи збирання приладу або конструкції, де оцінюються стан окремих складових, так і під час його експлуатації.

Момент вчасного виявлення дефектів у критично важливих об'єктах є найважливішою метою. Для підприємства чи заводу випадок виходу зі строю дорогої апаратури, великих резервуарів, труб є катастрофічним, тому питанню технічного контролю приділяються максимальні увага і, відповідно, людські ресурси та знання у галузі неруйнівного контролю. Висновок про наявність дефектів здатний запобігти неякісному замовленню, закриттю підприємства чи збереженню його грошей.

Дефекти, які знаходяться на стадії початкового розвитку, є особливо небезпечними. Для їх виявлення треба дослідити максимально широкий спектр інформації. Одним із методів, що здатен зафіксувати дефект на ранній стадії є метод акустичної емісії. Завдяки чутливості цього методу дистанційному контролю об'єкту він здатен локалізувати дефект, встановити пороговиявляючі значення та задати кореляцію між різними параметрами.

Оскільки ми не можемо чітко передбачити, які результати в конкретному об'єкті будуть отримані, кожний окремий експеримент є унікальним, а процес акустичної емісії – випадковим. Враховуючи природу пружних хвиль емісії при аналізі отриманих даних необхідно також враховувати наявність багатьох завад різного роду та вміти виділяти на їх фоні корисний сигнал.

Метою роботи є дослідити, яку роль в трактуванні сигналів акустичної емісії складають спектральні характеристики, які їх переваги над іншими видами аналізу та чому саме вони несуть ключову інформацію, без якої не

можливо повноцінно робити висновок про стан дефекту в конкретному об'єкті; навести актуальність застосування таких характеристик як вейвлет-перетворення, перетворення Фур'є тощо; продемонструвати застосування спектральних характеристик у реальних системах дослідження.

У першому розділі описується актуальність та місце методу акустичної емісії у неруйнівному контролі. Коротко виділено переваги та недоліки різних методів. Описано фізичний зміст хвиль акустичної емісії, причини та джерела їх виникнення, види акустичної емісії. Досліджено типові системи для проведення вимірювань цим методом, описано структурні схеми. Наведено аналіз низки робіт, де він застосовується для дослідження різноманітних об'єктів, цим самим доведено його поширеність та доступність.

У другому розділі задано стандартну математичну модель акустичної емісії. Досліджено, які основні параметри задають цей процес, зведено існуючу інформацію про діапазони значень, що найчастіше отримуються в результаті застосування цього методу. Досліджено, яку інформацію несуть перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення, кумулянтні коефіцієнти, спектральна густина потужності тощо.

У третьому розділі розібрані реальні експерименти, описано зміст досліджень, способи застосування спектральних характеристик, обговорено графічний матеріал (графіки тощо), зроблено висновки.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

1.1. Місце методу акустичної емісії у неруйнівному контролі

Існує велика кількість видів НК в залежності від форми застосування, фізичних принципів тощо. Відповідно, кожен вид містить певні методи, що використовуються для отримання інформації про дефекти або поступові руйнування структури матеріалу, чи *об'єкту контролю* (ОК) в цілому.

На рис. 1.1 наведено їх класифікацію:

Активні										Пасивні										
Ультразвукові методи бігучих хвиль							Спектральні													
Засновані на проходженні			Комбіновані		Засновані на відбиванні				Вимушених коливань	Вільних коливань										
Тіньовий амплітудний	Тіньовий часовий	Велосиметричний	Дзеркально-тіньовий	Ехо- тіньовий	Ехо-наскрізний	Ех-ометод	Ехо-дзеркальний метод	Дельта-метод	Дифракційно-часовий	Ревербаційний	Товщинометрія	Локальний	Інтегральний	Локальний	Інтегральний	Імпедансний	Акустико-емісійний	Шумодіагностичний	Спектральні	Вібродіагностичний

Рис. 1.1. Види УЗ НК

Найбільш широким є поділ на активні та пасивні методи. Під час застосування перших на ОК подається певна енергія ззовні для отримання необхідної інформації від потенційного дефекту, других – дослідження проводяться дистанційно; відбувається спостереження за фізичними процесами всередині ОК та подальший аналіз результатів [11].

Нижче наведено таблицю порівнянь основних видів НК [1]:

Таблиця 1.1

Порівняння видів НК

Вид НК	Призначення методу	Переваги методу	Обмеження методу
Візуально-оптичний	Аналіз поверхонь ОК на наявність яскраво виражених дефектів	Не залежить від матеріалу контрольованого виробу, прямий доступ до ОК, найпростіший у реалізації	Неможливість дослідити внутрішню структуру ОК на наявність дефектів та побачити мікроскопічні дефекти на поверхні, низька вибірковість та чутливість
Контроль проникаючими речовинами	Дослідження слабо розкритих або наскрізних дефектів	Високий контраст яскравості між ділянкою з дефектом та звичайною ділянкою ОК, недорогий для реалізації	Підбір правильних властивостей проникаючої речовини, залишок частини рідини у дефекті
Акустичний (УЗ)	Розповсюдження пружних механічних коливань з метою прийому відбиття від потенційного дефекту; виявлення дефектів, що розвиваються; виявлення витікання речовини в ОК	Велика кількість методів (активні та пасивні); дослідження ОК великої товщини; оцінка глибини залягання	Неінформативність щодо форми дефекту; проблеми дослідження ОК складної форми; необхідність створення різних типів перетворювачів

Вихрострумний	Аналіз зміни електромагнітного поля вихрових струмів для ОК у металургії	Підходить для будь-яких металів; можливі дефектоскопія, товщинометрія, структурометрія тощо	Лише зовнішні та підповерхневі (не глибше 2 мм) дефекти; чутливість залежить від багатьох факторів; перетворювач може вловлювати зайві магнітні процеси та спотворювати сигнал
Магнітний	Для ОК з феромагнітних матеріалів в намагніченому стані	Дослідження і простої, і складної форм ОК; існування активних і пасивних методів	Визначення лише поверхневих та підповерхневих дефектів (не більше 15 мм); лише феромагніти
Електричний	Вимірювання глибини попередньо знайденого дефекту; вимірювання товщини ізолюючих покриттів	Виявлення місця наскрізного пробою ізоляції	Утворення скін-ефекту; використання дуже великих значень струму, опору тощо
Радіохвильовий	Пошук металевих часток в неметалевих матеріалах	Безперервний режим випромінювання; можливість роботи при заземленому ОК	Двосторонній синхронізований доступ антен до ОК; неможливість визначення глибини дефекту
Радіаційний	Контроль зварних з'єднань шляхом взаємодії іонізуючого випромінювання та ОК	Наочність результатів; можливість виявлення дрібних округлих дефектів	Необхідно дотримуватися заходів безпеки; великі вага апаратури, витрати енергії; загалом є застарілим

Можна помітити, що найбільш поширеним у використанні є акустичний метод, або *ультразвукова (УЗ) дефектоскопія*: він максимально закриває потреби у різного роду питаннях по діагностуванню металів та неметалів, при тому що є безпечним у використанні та портативним; дозволяє знаходити дефекти як на поверхні, так і всередині ОК.

Принцип роботи УЗ методів наступний: хвилі малої амплітуди, що посилає *п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП)*, реєструють певну перешкоду на своєму шляху і відбиваються від неї, таким чином повертаючи інформацію про змінену амплітуду, час приходу сигналу та інші характеристики на приймач. Після цього отриманий сигнал перетворюється в електричний, далі – у цифровий, і на фінальному етапі проводиться аналіз результатів.

Як вже було сказано, у випадку пасивного НК дефекти не виникають одразу як окремий об'єкт. Можна узагальнити, що для початкових стадій його зародження доцільніше вважати, що це низка процесів перебудови кристалічної ґратки матеріалу на мікрорівні. Їм притаманні зміна форми, розміру та інших характеристик із плином часу. Для дослідження такого періоду зародження та розвитку дефекту необхідний окремий метод, який би поєднав у собі високу чутливість, здатність контролювати ОК під час роботи (контроль розвитку дефекту у реальному часі) та швидкість аналізу одразу багатьох інформативних параметрів.

Ці завдання виконує *метод акустичної емісії*. Для її визначення попередньо необхідно визначити поняття *пружності*.

Пружність – це здатність середовища відновлювати своє початкове положення до початку дії сили, яка призводить до будь-якого ступеня деформації. Відповідно, середовище, в будь-якій точці якого виконується ця властивість, називається пружним; а хвилі, що поширюватимуться в ньому – пружними [1].

Акустична емісія (АЕ) – це явище, при якому відбувається руйнування матеріалу, а саме його кристалічної ґратки, на певній ділянці ОК у зв'язку із випромінюванням пружних хвиль і подальшої деформації структури

матеріалу. Іншими слова, АЕ може виникати лише при наявності навантаження на об'єкт (механічне навантаження, зміна тиску, зміна температури).

Дослідження цим методом проводяться дистанційно, таким чином не потрібен прямий доступ до ОК, а також можливо досліджувати дефект як і порожніх резервуарів (дефекти у стінках), так і в суцільних ОК (опори мосту тощо). Ще однією суттєвою перевагою над іншими методами є можливість визначати координати дефекту [9, 16].

1.2. Види та джерела виникнення акустичної емісії

Розрізняють два види акустичної емісії: *дискретна* (імпульсні удари) та *неперервна* (випромінювання) [22, 23].

Дискретна АЕ характеризується «сплесками», які перевищують певний встановлений поріг. Таким чином окремі «події» із занадто високою амплітудою спричинятимуть поступове руйнування структури матеріалу. До інформативних параметрів належать амплітуда, тривалість імпульсу ($10^{-8} \dots 10^{-4}$ с), енергія сигналу ($10^{-9} \dots 10^{-5}$ Дж) [1].

Неперервна АЕ існує у випадку, коли імпульси генеруються так, що інтервал між появою двох послідовних імпульсів є меншим, ніж час загасання та тривалістю перехідних процесів. У такому випадку під час обробки результатів беруться не окремі значення, а їх усереднення, через що малоімовірна втрата корисної інформації, у порівняння з пороговим виявленням одиночних імпульсів.

У контексті параметрів для аналізу сигналів акустичної емісії (САЕ) також існує поділ на дискретні та інтегральні. *Дискретні параметри* використовуються для опису конкретних моментів в одній АЕ реалізації. До цих параметрів можна віднести початковий момент АЕ, миттєву амплітуда сигналу, тривалість імпульсу та його енергію, час початку певної події, час наростання переднього фронту імпульсу інтенсивність АЕ. У результаті буде досліджена одна подія АЕ, але задати кореляцію з іншою подією досить важко.

Інтегральні параметри, в свою чергу, мають на меті охоплення та узагальнення характеристик повної реалізації АЕ, тобто від початку до кінця експерименту. Для прикладу, при усередненні амплітуд протягом часу повної реалізації можна визначити їх середнє значення та використати це для пороговиявлення. Так само можна дослідити інтервали між подіями, чи мають вони закономірності; дізнатися про спектральний розподіл частот, потужності, густину спектра тощо [7, 5].

АЕ може проявлятися у різного роду процесах. До джерел можна віднести наступні групи подій [9, 12]:

- фазові зміни, або руйнування кристалічної решітки;
- магнетні ефекти (у разі пружного деформування матеріалу);
- дислокаційні процеси (зміщення низькоенергетичних станів, має переривчастий характер);
- руйнування матеріалів (пластичні деформації, різання або розтягування; корозійне руйнування);
- поверхневі явища (відшарування шарів при дослідженні певних матеріалів);
- витік рідини/газу (протікання речовини на певній ділянці ОК).

Джерела АЕ також залежать від матеріалу. Наприклад, розвиток пластичних деформацій і руйнування твердих включень найбільш характерні для металів; розрив волокон, розтріскування матриці та розшарування – для композитів; руйнування заповнювача, закриття пустот – для бетону. Матеріали, з яких найчастіше будуть об'єкти для потенційного виявлення АЕ – це сталь, алюміній, цинк, мідь інші метали та сплави, бетон тощо.

1.3. Загальний підхід до використання методу акустичної емісії та приклади його застосування

Розглянемо, які функції виконує метод АЕ, та чому результати, отримані саме цим методом, здатні надати важливу інформацію про пошкодження матеріалу.

Метод АЕ передбачає, що, при прикладанні до ОК навантаження (і в робочому стані, і в стані спокою), джерела АЕ (рис. 1.2) – мікро-тріщини – почнуть випромінювати пружні хвилі, які зможуть потрапити у зону ПЕП (датчики встановлені на поверхні ОК); після чого отримані пружні САЕ перетворюються в електричні, подаються на підсилювач, реєструються та відображаються на екрані пристрою вимірювання (рис. 1.3):

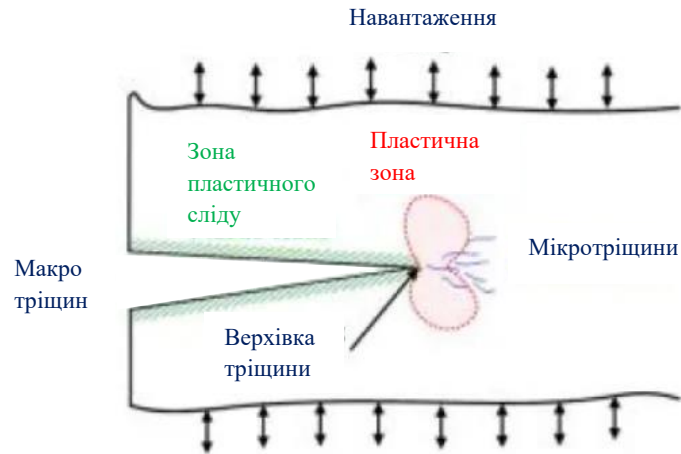


Рис. 1.2. Зародження макро- та мікро-тріщин в ОК

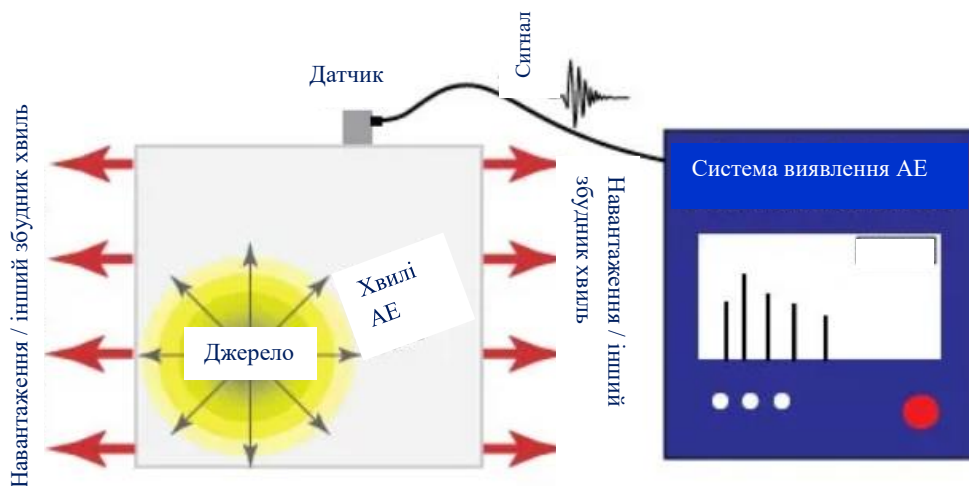


Рис. 1.3. Принцип роботи методу АЕ

Для детального розуміння процесу отримання цифрового АЕ сигналу наведемо структурну схему (рис. 1.4) та ілюстрацію до перетворення механічних хвиль в електричні (рис. 1.5):

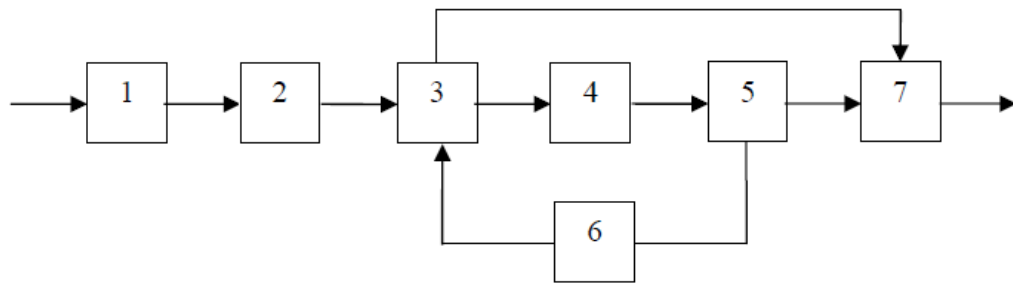


Рис. 1.4. Структурна схема розпізнавання корисного САЕ на фоні завад

Блоки відповідають наступним складовим:

- 1 – приймач САЕ;
- 2 – пристрій перетворення САЕ в електричні імпульси;
- 3 – пристрій порівняння;
- 4 – реєструвальний пристрій;
- 5 – блок збереження інформації;
- 6 – блок масштабу та амплітудної дискримінації;
- 7 – блок статистичної обробки інформації.

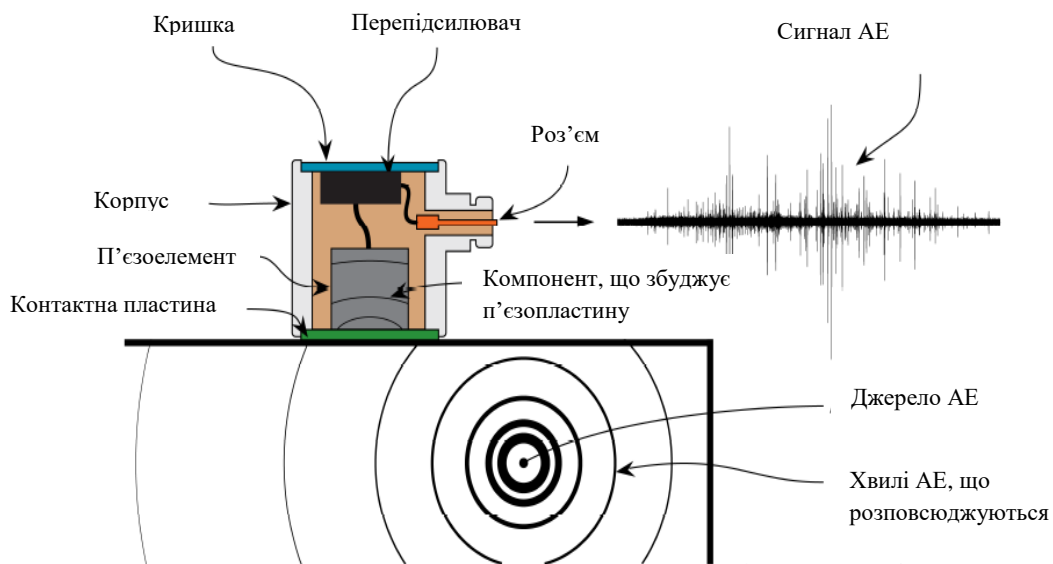


Рис. 1.5. Схема роботи перетворювача САЕ

Із рис. 5 видно детальну будову датчика, а саме, що хвилі збуджують п'єзопластину із певною частотою, яка перетворюється в електричний сигнал,

подається на попередній підсилювач (одразу для підсилення може бути занижений рівень), далі – аналогічно опису, зазначеному вище.

Важливо зазначити дві речі. По-перше, від моменту випромінювання пружних хвиль до моменту отримання інформації перетворювачем, на ці хвилі впливатиме дисперсія, розсіювання, загасання та інші фізичні явища (шуми та вібрації, відбиття інших типів хвиль), через що сигнал буде спотворюватися. У зв'язку із цим на експерименти із дослідження АЕ дуже впливатиме стан ОК, його матеріал із певними властивостями у поєднанні із фізичними параметрами вимірювальних компонентів (наприклад, вид п'єзоматеріалу). Також це є причиною існування неперервної емісії, коли надходять декілька інформативних хвиль одночасно [12]. По-друге, якщо АЕ проявляється при певному ступені навантаження на ОК, то у випадку зупинки цього навантаження ступінь наступного має бути не менше попередньо створеного – інакше АЕ не виникне.

Сфери застосування АЕ доволі різноманітні.

Наприклад, у роботі [18], що є збіркою різних досліджень на цю тему, Розділ 3 демонструє приклад контролю сталевих мостів. Протягом декількох тижнів проводилися вимірювання шляхом під'єднання необхідних датчиків в конкретні точки опор. Збиралися масиви даних від впливу різних подій, таких як рух мостом потягу, пориви вітру.

Праця [15] має на меті дослідження можливих кутів набігання колеса локомотива на колію за допомогою акустичної емісії. За допомогою сумарних САЕ від рейки та колісної пари можна отримати амплітудний спектр, по якому можна робити висновки про вібраційні контакти при заданому куті, а також про параметр шорсткості.

У роботі [3] зведено інформацію з різних джерел про моніторинг корпусів ядерних реакторів. Виявлено, що не тільки частоти роботи обладнання в діапазоні 20...50 кГц несуть шуми, які заважатимуть ефективному контролю. Також перешкодою є явище кавітації з амплітудою в спектрі порядку 1000 кГц. У результаті оптимальним діапазоном частот для

контролю методом АЕ обрано 750-3000 кГц. При цьому було виявлено декілька типів САЕ, в залежності від типу фронту та форми огинаючої.

Слід уточнити, що у різних джерелах інформація про діапазони різних параметрів САЕ може певною мірою відрізнятися. Наприклад, у праці [4] зазначено, що тривалість імпульсу належить проміжку $10^{-8} \dots 10^{-4}$ с, енергія – $10^{-9} \dots 10^{-5}$ Дж при коливаннях $10^{-11} \dots 10^{-4}$ мм.

Можна зробити висновок, що прикладів ОК, до яких застосовується метод АЕ, є велика кількість, а отже, для коректного експерименту не менш важливим є вірне трактування та аналіз отриманих даних. У Розділі 2 увагу зосереджено саме на математичній складовій обрахунку отриманих результатів.

Висновки до Розділу 1

У даному розділі було доведено актуальність використання методу АЕ. Після порівняння його з іншими методами НК зроблено висновок про його практичність та ефективність у наданні результатів. Проаналізовано роботи різних галузей, де застосовується метод АЕ, таким чином показано, що він зручний у використанні при різних умовах. Описано основні характеристики, джерела виникнення тощо. Подано основні теоретичні відомості про даний метод для подальшого дослідження з математичної та експериментальної сторін у наступних частинах роботи.

РОЗДІЛ 2. МІСЦЕ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕД ВИДІВ АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

2.1. Основні математичні характеристики сигналів акустичної емісії

Явище АЕ є випадковим процесом (ВП), оскільки для нього характерні наявність випадкових амплітуд; випадковість виникнення за часом, за координатами; опис статистичними величинами (середнє значення, функція розподілу, спектральна густина енергії). Цей процес є нестационарним: імовірнісні характеристики та частоти залежать від початку відліку і не можуть бути передбачені в інший момент реалізації процесу.

Враховуючи, що САЕ є імпульсними, та використавши загальну математичну модель для цих сигналів, можна записати математичну модель АЕ [7]:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} a_k h(t - t_k), \quad t > 0 \quad (2.1)$$

де t_k – однорідний пуассонівський потік; a_k – амплітуди імпульсів, що є взаємно незалежними однаково розподіленими випадковими величинами та не залежать від випадкових моментів часу t_k ; $N(t)$ – однорідні процеси Пуассона на інтервалі часу $[0; t]$; $h(t)$ – форма імпульсу, не є випадковою функцією.

Природа пружних хвиль, що виникають у джерелі АЕ, та процес випромінення як окремих імпульсів, так і поступової в часі деформації, дозволяє аналогічним чином утворити вирази для дискретної та неперервної АЕ [13], дописавши у рівняння відповідні індекси «д» або «н». Варта уточнення природа САЕ - дискретна, тому поняття неперервної означає лише відсутність інтервалу часу між двома дискретними імпульсами. Окрім цього, можна узагальнити, що повна АЕ являє собою суміш корисного сигналу та завад (шуми, вібрації, постійний тиск на ОК тощо), на тлі яких імпульси накладаються один на одній. Іншими словами, важливою задачею аналізу АЕ є вдосконалення здатності відділяти корисний сигнал від фонових сигналів іншого типу.

Робота [19] пропонує наступний поділ завдань та методів обробки САЕ:

Таблиця 2.1

Класифікація досліджень САЕ

Методи обробки САЕ (загальний поділ)	Параметричний	Моделльний	Статистичний	Лінійний
Приклади методів обробки САЕ	Підсилення корисного сигналу	Детермінована лінійна фільтрація	Шумоподавлення за допомогою вейвлетів	
		Статистична лінійна фільтрація		
Види аналізу САЕ	Аналіз у часовій області	Спектральний аналіз	Фазово-просторовий аналіз	Частотно-часовий аналіз (вважається спектральним)
Параметри, що аналізують/застосовують	Тривалість, амплітуда, розподіл піків амплітуд, час повернення, середні частоти, енергія одиночної події, рівень	Перетворення Фур'є, швидке перетворення Фур'є, спектральна густина потужності; статистичні χ -ки (дисперсія, коеф. ексцесу тощо) для аналізу спектру	Змінений фазовий простір, його різноманітні диференціальні характеристики	Вейвлет-перетворення; різні репрезентації області (квадратична, лінійна)

Провівши аналіз різних досліджень, а також спираючись на збірку методів у даній таблиці, можна звести методи аналізу САЕ до наступних видів: статистичний метод, амплітудний метод, дослідження параметрів часової області, дослідження параметрів частотної області.

2.2. Статистичний метод дослідження сигналів акустичної емісії

Для статистичних розрахунків приймається, що САЕ під час деформації можна описувати формулою загасаючого радіоімпульсу:

$$u(t) = \begin{cases} A_0 \cdot \exp\left(\frac{-t - t_0}{\tau_0}\right) \cdot \sin(2\pi f_0) \cdot (t - t_0), & t > 0, \\ 0, & t < t_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

де стала часу має наступний діапазон: $\tau_0 \approx 10^{-4} \dots 10^{-2}$ с. Цей вираз також називають *амплітудним розподілом САЕ*.

Ефективна тривалість імпульсу для неперервної емісії становить $5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ мкс, для дискретної - $5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ мкс [7].

Якщо задати імпульсні перехідні функції як $\varphi_0(t, \tau)$ (характеристика ОК) та $\varphi_1(t, \tau)$ (первинний перетворювач) та підставити їх у модель лінійних випадкових процесів, тоді сигнал на виході первинного перетворювача (ПП) набуде наступного вигляду:

$$\xi(t) = \iint_{-\infty}^{-\infty} \varphi_1(t, \tau) \varphi_0(\tau, \tau_1) d\zeta(\tau_1) d\tau, \quad (2.3)$$

де добуток цих двох функцій виступатиме як ядро лінійного випадкового процесу, а диференціал $d\zeta(\tau_1)$ – як однорідний породжувальний процес з незалежними приростами.

Найчастіше для ймовірнісних обчислень АЕ застосовуються такі розподіли, як Пуассона, Гаусса, Вейбулла, Рейлі.

Наведемо інші математичні вирази, що застосовуються при дослідженнях амплітуд САЕ.

Для аналізу конкретних значень задамо кількість подій N . Поділимо повний час спостереження на менші проміжки кількості k для оцінок. Тоді враховуючи кількість подій на двох сусідніх інтервалах

$$\frac{N_{k+1}}{N_k} = \begin{cases} 1, & N_k = 0, N_{k+1} > 0 \\ 0, & N_k > 0, N_{k+1} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, k' \end{cases} \quad (2.4)$$

можна записати формулу для розрахунку інтенсивності АЕ:

$$I = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{k+1}}{N_k}, \quad (2.5)$$

При відомому встановленому порозі амплітуди (рівень дискримінації) $U_{\text{пор}}$, можна встановити оптимальну величину перевищення порогу САЕ A_c . Тоді при перевищенні цього порогу амплітуда рахуватиметься наступним чином:

$$A_t = B_1 U_{\text{пор}} + B_2 A_c, \quad (2.6)$$

де B_1, B_2 – коефіцієнти, отримані експериментальним шляхом.

При усередненні по кількості вибірок, отримуємо амплітуду:

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N |A_i|}{N}, \quad (2.7)$$

Також обраховуються такі статистичні параметри між одиничними САЕ як середні значення інтервалів та дисперсії інтервалів; середні значення амплітуди та дисперсії амплітуд; кореляція між значеннями інтервалів та амплітуд; час спостереження тощо. Важливо наголосити, що вагомість обрахунку та аналізу САЕ несе побудова різних графіків кореляцій та встановленню залежності багатьох параметрів від інших.

Узагальнюючи, можна сказати, що даний метод здатний продемонструвати загальну картину поведінки сигналу, проте при дослідженні менших фрагментів результат може вийти не точним через нестачу більшої кількості даних. Окрім цього, важко дати чітку оцінку щодо наявності різних частот у фрагменті САЕ.

2.3. Амплітудний метод дослідження сигналів акустичної емісії

Важливим етапом, який варто виділити окремо, є пороговиявлення.

Однією з причин, що найчастіше спотворює корисний сигнал, є обрання невірною порогу дискримінації. Часто він може або занижким, і тоді набагато

більше зайвої інформації буде задіяно як САЕ (помилка другого роду); або зависоким, і у випадку швидшого загасання хвиль буде неактуальним (помилка першого роду). Іншими словами цю методику можна назвати «фільтрація за амплітудною ознакою».

При визначенні координат джерела цей поріг САЕ мають перевищувати, відповідно, для кожного датчика. Задаються додаткові порогові умови такі як тривалість конкретного імпульсу, черговість надходжень.

Форма САЕ має вигляд радіоімпульсу. Виведено, за одного і того ж джерела АЕ дві підряд виникаючих імпульси матимуть однакову кількість перетинів.

При використанні амплітудного методу зазвичай використовують такі поняття як амплітуда, амплітудний розподіл, ентропія.

Відомо, що амплітуда є пропорційною до площі приросту тріщини, а розподіл здатен пояснити саме природу джерела [7].

Основні формули для цього методу зведено у таблиці:

Таблиця 2.2

Основні формули для оцінок та похибок амплітудного методу

Назва параметра	Формула	Похибка
Гістограма амплітудного розподілу	$\hat{h} = N_l / \sum_{l=1}^{l_0} N_l$	Відносна статистична похибка оцінки: $\delta h(l) = \frac{1}{\sqrt{N_l}}$
Оцінка першого моменту	$\hat{U} = \Delta u / \sum_{l=1}^{l_0} (l \hat{h}(l))$	$\delta \hat{U} = N_{\Sigma} \sum_{l=1}^{l_0} l^2 N_l \left(\sum_{l=1}^{l_0} l N_l \right)^{-2} - 1$
Оцінка другого моменту	$\hat{U}^2 = (\Delta u)^2 / \sum_{l=1}^{l_0} (l^2 \hat{h}(l))$	$\delta \hat{U}^2 = N_{\Sigma} \sum_{l=1}^{l_0} l^4 N_l \left(\sum_{l=1}^{l_0} l^2 N_l \right)^{-2} - 1$

Оцінка ентропії	$\hat{H} = - \sum_{l=1}^{l_0} \hat{h}(l) \ln \hat{h}(l)$	$\delta \hat{H} = N_{\Sigma} \sum_{l=1}^{l_0} N_l \ln^2 \frac{N_l}{N_{\Sigma}} \left(\sum_{l=1}^{l_0} N_l \ln \frac{N_l}{N_{\Sigma}} \right)^{-2} - 1$
-----------------	--	---

2.4. Дослідження сигналів акустичної емісії у часовій області

Аналіз параметрів у часовій області дозволяє зосередити увагу на формі сигналу та його особливостях у певний момент часу; провести кореляцію та встановити, чи існує залежність між ними та видом руйнування. Для прикладу виявлено, що сумарна кількість САЕ прямопропорційна до четвертого степеню коефіцієнта інтенсивності навантажень (КІН). До них відносяться наступні кількісні ознаки [7, 9]:

Таблиця 2.3

Основні діапазони часових параметрів

Назва параметра	Діапазон (узагальнений)	При утворенні мікро-тріщини	При пластичній деформації
Тривалість імпульсу	$\tau_0 = 10^{-4} \dots 10^{-8} \text{ с}$	$\tau_0 = 10^{-4} \dots 10^{-8} \text{ мкс}$	$\tau_0 = 10^{-4} \dots 10^{-8} \text{ мкс}$
Енергія одиночного САЕ	$E = 10^{-11} \dots 10^{-15} \text{ Дж}$	$E = 10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ Дж}$ (або амплітуда)	$E = 10^{-4} \text{ Дж}$ (або амплітуда)
Амплітуда одиночного САЕ	$A = 10^{-7} \dots 10^{-2} \text{ В}$ (ел. сигнал)		
	$A = 10^{-4} \dots 10^{-8} \text{ В}$ (мех. сигнал)		
Сумарний рахунок САЕ	$N = 0 \dots 10^7 \text{ імп}$	Ширина спектра, МГц	
Інтенсивність	$I = 0 \dots 10^5 \text{ імп/с}$	≤ 50	≤ 0.5

Можна сказати, що метод є початковим для аналізу САЕ. Для прикладу, дивлячись на графік сигналу, одразу можна виділити координати стрибків, координати тривалого загасання тощо, проте саме висновок про ці моменти вийде зробити із використанням частотної області.

Метод має ряд недоліків. По-перше, при наявності великої шумової складової (мале відношення сигнал/шум) форма сигналу буде менш доступною. По-друге, складнощі можуть виникати при ситуації, коли багато імпульсів накладатимуться. Ця ситуація вже буде відноситися до статистичного підходу (усереднення результатів тощо).

Як було сказано у попередніх пунктах, у момент отримання сигналу приймачем вони вже будуть відрізнятися від випромінених від джерела: це відбувається через послаблення сигналу на шляху проходження до датчика, матеріалу та координати датчика. Таким чином інформація для аналізу є ускладненою багатьма факторами, і головною задачею є грамотне відокремлення корисного сигналу від будь-яких зайвих складових, оскільки кожна завада робить певний частотний вклад у сигнал, що буде досліджуватися.

2.5. Аналіз частотної області сигналів акустичної емісії

Однією з найбільших переваг аналізу частот можна назвати можливість класифікації типів руйнувань в залежності від частотних проміжків. Іншими словами, провівши n експериментів на подібних ОК можна зробити висновок про схожість частотних складових при конкретних умовах спостереження, тим самим знайти кореляцію деяких параметрів та заздалегідь мати уявлення про результат в наступних експериментах; розрізняти/ідентифікувати джерела.

До спектральних характеристик відносять наступні [21]: спектральна густина потужності, функції розподілу та щільності ймовірності, кумулянтні коефіцієнти, кореляційна функція, моменти, спектр сигналу, спектрограма; а також перетворення Фур'є, швидке перетворення Фур'є, вейвлет-

перетворення. При цьому попередньо варто застосувати подавлення шуму, базову корекцію, фільтрацію за потреби.

Розглянемо ці методи більш детально.

У роботі [13] проводиться дослідження моделі АЕ, що є сумою дискретної та неперервної АЕ. Вводяться такі імовірнісні характеристики як закон розподілу в рамках пуассонівських спектральних щільностей та кумулянтні коефіцієнти.

Вводяться характеристична функція та функція кумулянтів :

$$f_{\xi}(u) = \exp \left[\sum_{s=1}^{\infty} \frac{\kappa_s}{s!} (iu)^s \right], \quad (2.8)$$

$$\phi_{\xi}(u) = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\kappa_s}{s!} (iu)^s, \quad (2.9)$$

де $i = \sqrt{-1}$; $\phi_{\xi}(u) = \ln f_{\xi}(u)$; $\kappa_s = \kappa_n + \kappa_d$ – кумулянтні коефіцієнти;

Вираз для відношення С/Ш подається у наступному вигляді:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \sqrt{\frac{\kappa_2[\xi_d(t)]}{\kappa_2[\xi_n(t)]}} = \sqrt{\frac{\kappa_2[\eta_{kd}]\tau_{0d}}{\kappa_2[\eta_{kn}]\tau_{0n}}} = \frac{\beta_n}{\beta_d} \sqrt{\frac{\lambda_d \tau_{0d}}{\lambda_n \tau_{0n}}}, \quad (2.10)$$

де β_d, β_n – параметри розподілу, що обернено пропорційні середнім значенням амплітуд імпульсів; η_{kd}, η_{kn} – амплітуди; λ_d, λ_n – параметри розподілу Пуассона; τ_{0d}, τ_{0n} – ефективна тривалість імпульсу.

Як було зазначено в п. 2.1. для опису ВП АЕ застосовується процес Пуассона. У результаті теоретично показано, що чим більше відношення сигнал/шум, тим більше у спектральній щільності суміші проявлятиметься двовершинний вид, тим самим дискретну АЕ легше відокремити на фоні завад (рис. 2.1):

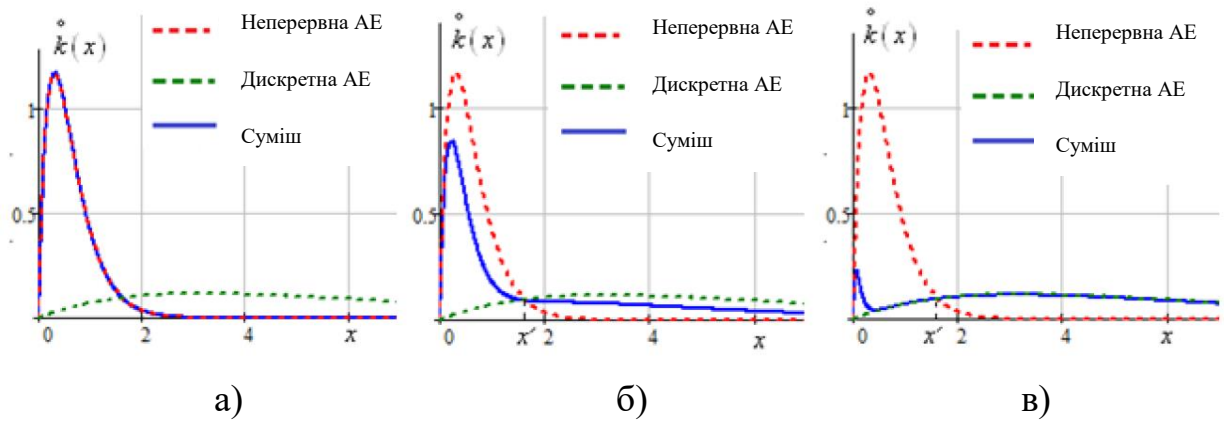


Рис. 2.1. Нормовані пуассонівські спектральні щільності САЕ при $C/Ш = 0.1$ (а), $C/Ш = 1$ (б), $C/Ш = 5$ (в),

У роботі [5] проводиться дослідження поверхонь композиційних матеріалів під час фрикційного контакту. У якості підтвердження зміни амплітуд при різного ступеня навантаження автор демонструє спектрограми у нормованих одиницях.

Спектрограма (рис. 2.2) показує залежність, що при постійній швидкості обертання, зростання навантаження веде до зростання сумарної амплітуди САЕ:

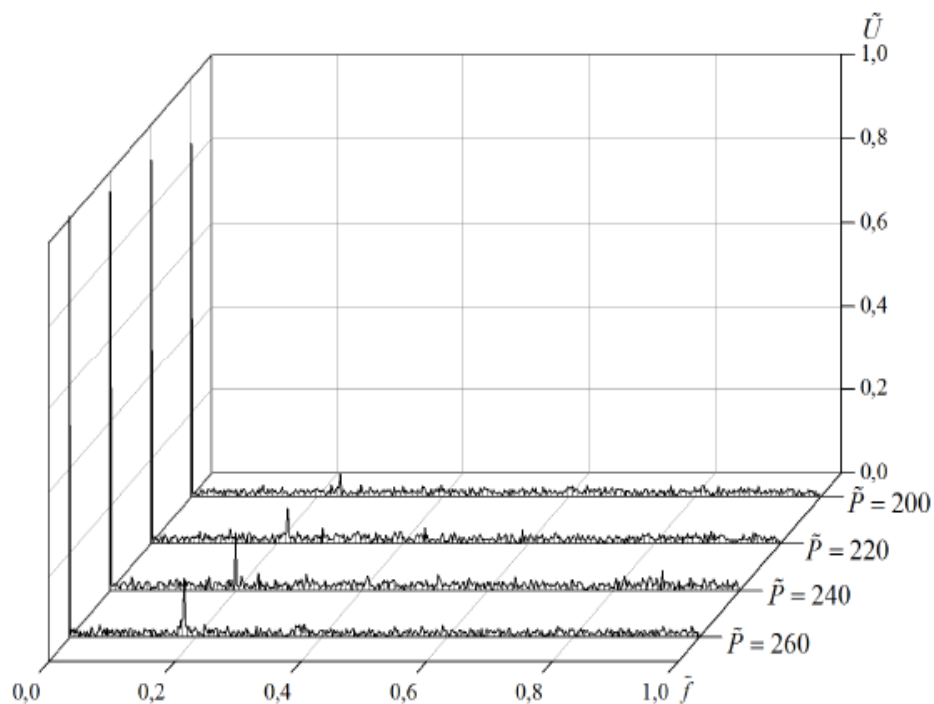


Рис. 2.2. Спектрограма навантажень

2.6. Перетворення Фур'є

Одним із найпоширеніших методів аналізу САЕ є перетворення Фур'є, коли

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\Omega t} dt, \quad (2.11)$$

До недоліків Фур'є перетворення відносять згладжування форми піків, через що можуть виникати похибки. Як відомо, САЕ мають як різкі імпульси, що означають одиничну тріщину, так і доволі короткі перехідні процеси. У такому випадку вводять множник, що є локальною функцією часу [16, 17]:

$$F(\Omega, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \omega(t - b) \cdot e^{-j\Omega t} dt, \quad (2.12)$$

У роботі також зазначено, що за швидким перетворенням Фур'є виявлено, що під час руйнування матриці генеруються сигнали АЕ з домінуючим діапазоном частот < 100 кГц, за відшарування волокна – з 200...300 кГц, а під час його руйнування – з 400...450 кГц.

2.7. Вейвлет-аналіз та його приклади застосування

Однією з найголовніших спектральних характеристик на даний момент виділяють вейвлет-перетворення. Він набув особливої поширеності через можливість максимально наблизитися до аналізування конкретної події як в частотній, так і в часовій областях.

Вейвлет (або хвилька) – це функція, що осцилює при початковій нульовій амплітуді, яка поступово зростає та знову згасає до нуля; має нульове середнє значення [8].

Основна ідея НВП витікає із принципу невизначеності Гейзенберга:

$$\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2}, \quad (2.13)$$

З даної нерівності можна побачити, що чим вища роздільна здатність даного сигналу по часу, тим нижча по частоті, і навпаки. Тобто якщо задати певну функцію для аналізу конкретного сигналу, вона рухаючись по часовій

осі буде знаходити ділянки сигналу із максимальною схожістю, які у свою чергу зберігають за собою конкретні частотні діапазони. Відповідно графік вейвлет-перетворення будуватиметься в залежності частоти від часу.

Існують декілька стандартних вейвлетів: Хаара, Добеші, Мейєра, Гауса, Мексиканська шляпа, Шенона, Морле, біортогональні сплайни тощо. Це хвилики, що мають скінченну енергію і також характеризуються гладкістю; дивлячись, який сигнал досліджується, робиться висновок, який вейвлет доцільніше використовувати.

При дослідженні АЕ вейвлет-аналізом виявляється більш точна структура досліджуваного сигналу. Зокрема таким чином зручно досліджувати нестационарні у часі або неоднорідні в просторі сигнали. У результаті можна отримати детальну інформацію про наявність певних частот у кожній точці, певні їх координати і тп. За допомогою ВП також можна досліджувати зношеність систем [14].

Серед експериментів АЕ найчастіше зустрічається використання вейвлетів Габора та Добеші.

У праці [6] автор досліджує низку робіт про застосування ВП як засіб виявлення АЕ. Серед них були наступні:

- контактна втома залізничної колії за методом виділення окремих АЕ-подій;
- опрацювання САЕ для виявлення дефектів компонентів підшипників кочення за різних швидкостей виконання операцій, навантаження та розмірів дефектів;
- Вплив на частотні параметри сигналів АЕ шорсткості поверхні та геометричних параметрів зразків і запропонували ефективну методику прогнозування якості поверхні виробів, оцінювання похибок шліфування.
- Класифікація сигналів АЕ, які виникають під час моніторингу корозії. з вейвлетом Габора для ідентифікації та оцінки дефектів у корозійній сталі. Використовуючи частоту, якій відповідає вейвлет-коефіцієнт з

максимальною амплітудою, отримано кореляцію між типом вейвлет-хвильки та руйнуванням.

- Для виявлення дефекту у вітротурбінній коробці із використанням вейвлету Морле;
- Метод для ідентифікування тріщини у плитах;
- ідентифікувати момент виникнення тертя у роторі із використання ДВП САЕ АЕ з вейвлетом Добеші;
- використанні ВПП для локалізації дефектів зварювання
- ідентифікування мікромеханізмів руйнування у двофазній сталі.
- Зародження тріщини під час розтягу та втомного руйнування алюмінієвого сплаву

Як і з поділом АЕ, існують дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) та неперервне (НВП):

Таблиця 2.4

Види вейвлет-перетворень

Дискретне ВП	Неперервне ВП
$\sum_{m \in \mathbb{Z}} s(n) \Psi_{j,k}(t)$ $a = 2^j, b = k2^j$	$\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \Psi(t) dt = 0$

Для оцінки ступеня руйнування в певний момент часу вводять критерій κ і фіксують локальний момент часу, коли вейвлет-коефіцієнт при цьому досягає максимального значення:

$$\kappa = WT_{max} \cdot \frac{\Delta f_0}{\Delta f}, \quad (2.14)$$

де WT_{max} – локальний максимум коефіцієнта при конкретній події; Δf_0 – ширина смуги частот АЕ-тракту, що залежить від робочої смуги частот ПП;

Δf – ширина смуги частот локального максимуму в координатній площині $WT - f$.

Важливою властивістю є осцилювання вейвлет-функціїї навколо нуля та нульова площа:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0, \quad (2.15)$$

Кінцева енергія (еквівалент часової локалізації), що вимірюється в цей самий момент часу, виражається наступним співвідношенням:

$$E_{WT} = \int_{t_1}^{t_2} |WT_a(t)|^2 dt, \quad (2.16)$$

де $WT_a(t) = A + B \cdot e^{-0.5\left(\frac{t-c}{D}\right)^2}$ — функція апроксимації проєкції локального максимуму (площина $WT - t$); A, B, C, D – коефіцієнти апроксимації. Інтегрування проводиться на інтенсивній тривалості випромінювання імпульсу на рівні $0.5WT_{max}$.

У контексті АЕ одним із найпоширеніших базисів є базис на основі функції Гаусса, оскільки він максимально здатен закривати потребу у локалізації як в часовій, так і в частотній областях:

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (2.17)$$

Якщо для першої області задати параметр a , для другої – b , тоді функція перетвореного сигналу матиме наступний вигляд:

$$\Psi_{ab}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \cdot \Psi\left(\frac{t-a}{b}\right), \quad (2.18)$$

Із дискретизацією параметрів:

$$a = 2^j, b = k2^j, \quad (2.19)$$

$$\Psi_{jk}(t) = a^{-\frac{j}{2}} \cdot \Psi(2^{-j}t - k), \quad (2.20)$$

Де k – ціле число, j – параметр масштабу.

У випадку неперервного (НВП) формула (2.20) видозміниться:

$$\Psi_{ab}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \cdot \int s(t) \Psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt, \quad (2.21)$$

де $s(t)$ – вхідний сигнал.

Для дослідження САЕ часто можна зустріти використання різних вейвлетів, наприклад Вейвлет Габора:

$$\Psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{t^2}{2} \left(\left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2 \right) + i\omega_p t \right], \quad (2.22)$$

де $\gamma = 5.336$, ω_p – несуча частота.

Висновки до Розділу 2

У даному розділі розглянуто основні спектральні характеристики для САЕ. Описано їх математичні формули, приклади застосування.

Важливою метою при аналізі САЕ є дізнатися вклад певних частот на конкретній досліджувальній ділянці. Для цього найзручніше підходять перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення.

Окрім цього наведено інформативність параметрів кумулянтних коефіцієнтів, виявлено, що з їх допомогою зручніше виділяти корисний сигнал АЕ на фоні завад.

РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РЕАЛЬНИХ ДОСЛІДАХ

Для конкретного результату впливу спектральних характеристик на хід дослідження АЕ важливо продемонструвати їх застосування у реальних експериментах.

3.1. Дослідження бетонних зразків після кліматичних навантажень

Таблиця 3.1

ОК першого дослідження

Об'єкт дослідження	Циліндричний зразок бетону після двох місяців застигання матеріалу		
	$d = l = 100$ мм	$d = 100$ мм $l = 150$ мм	$d = l = 150$ мм
	Призми		
	95 x 95 x 380 мм		
Початкові параметри системи	$f_s = 4$ МГц, поріг для відліків 200 мВ, поріг для одиночного імпульса 400 мВ, смуга частот 10 – 2000 кГц		

Об'єкти розділено на три групи [20]: ОК, що не піддаються заморозці-розморозці; ОК, на які діє 50 таких циклів; ОК, на які діє 100 циклів. Зразки досліджували на можливість розтягу та міцності вигину.

Із рис. 3.1 видно, що схил кумулянтних кривих явно виражений на кількості циклів 75-100, де притаманний швидше виникнення САЕ. Важливо наголосити, що криві на середині проміжку криві починають ще швидше зростати, ніж на його початку.

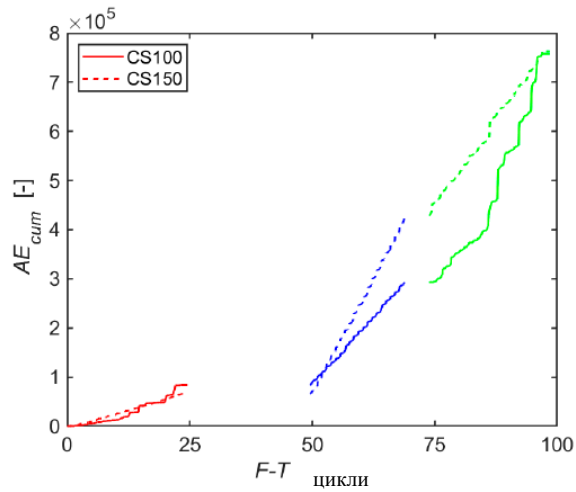


Рис. 3.1. Кумулятивні значення подій АЕ при різних циклах

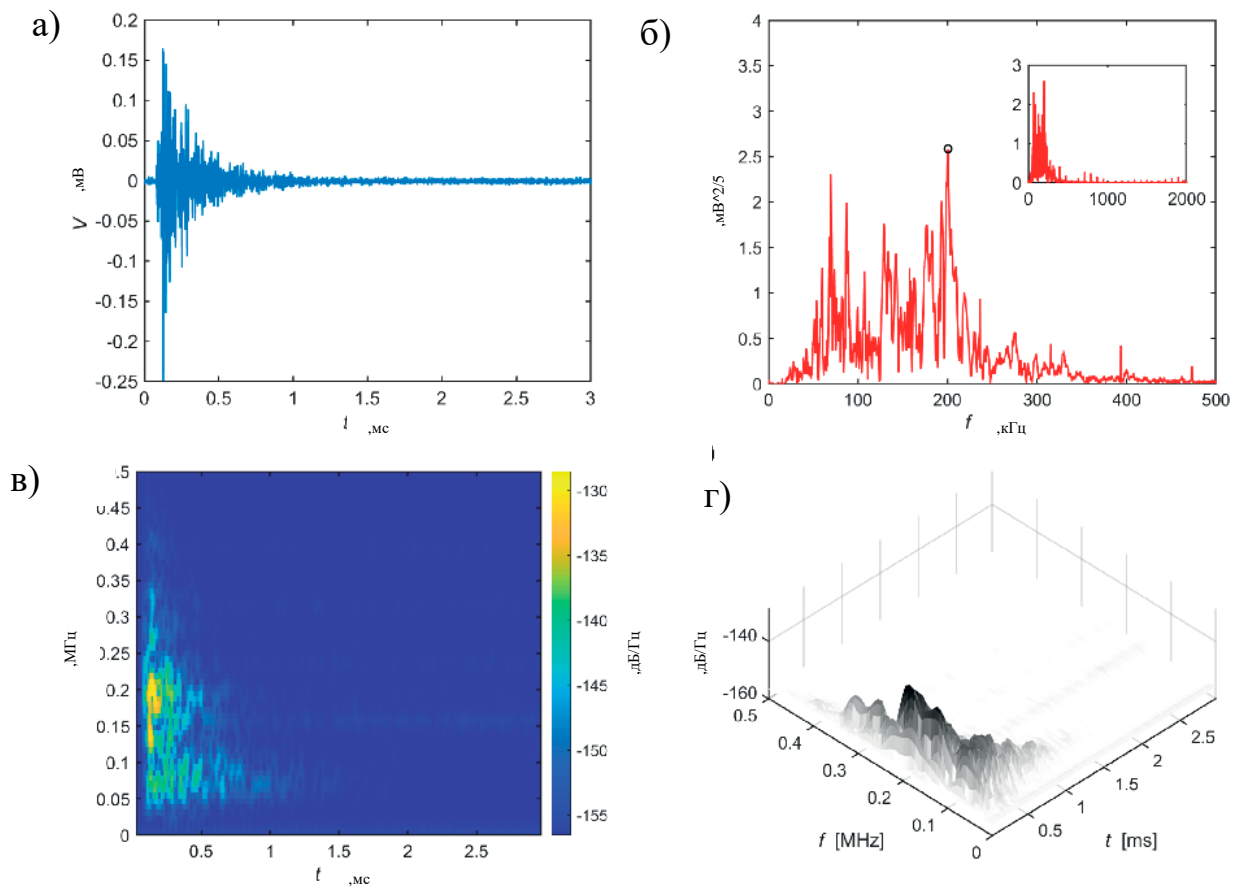


Рис. 3.2. САЕ на проміжку 0-25 циклу F-T (C100)

Рис. 3.2 демонструє вигляд часової діаграми САЕ (а), частотного спектра (б), спектрограми 2D (в) та спектрограми 2D (г) для циклу F-T 0-25. Можна бачити вклад основних частот у сигнал. Присутнє досить швидке затухання найбільших частот 120-230 кГц. Максимум частоти – 210 кГц, другий

максимум – 70 кГц. На спектрограмі також можна побачити, що найдовшою по тривалості є саме ця частота.

Аналогічним чином проаналізовано наступні проміжки циклів для першого зразка.

Для другого зразка наведено характеристики такого самого циклу:

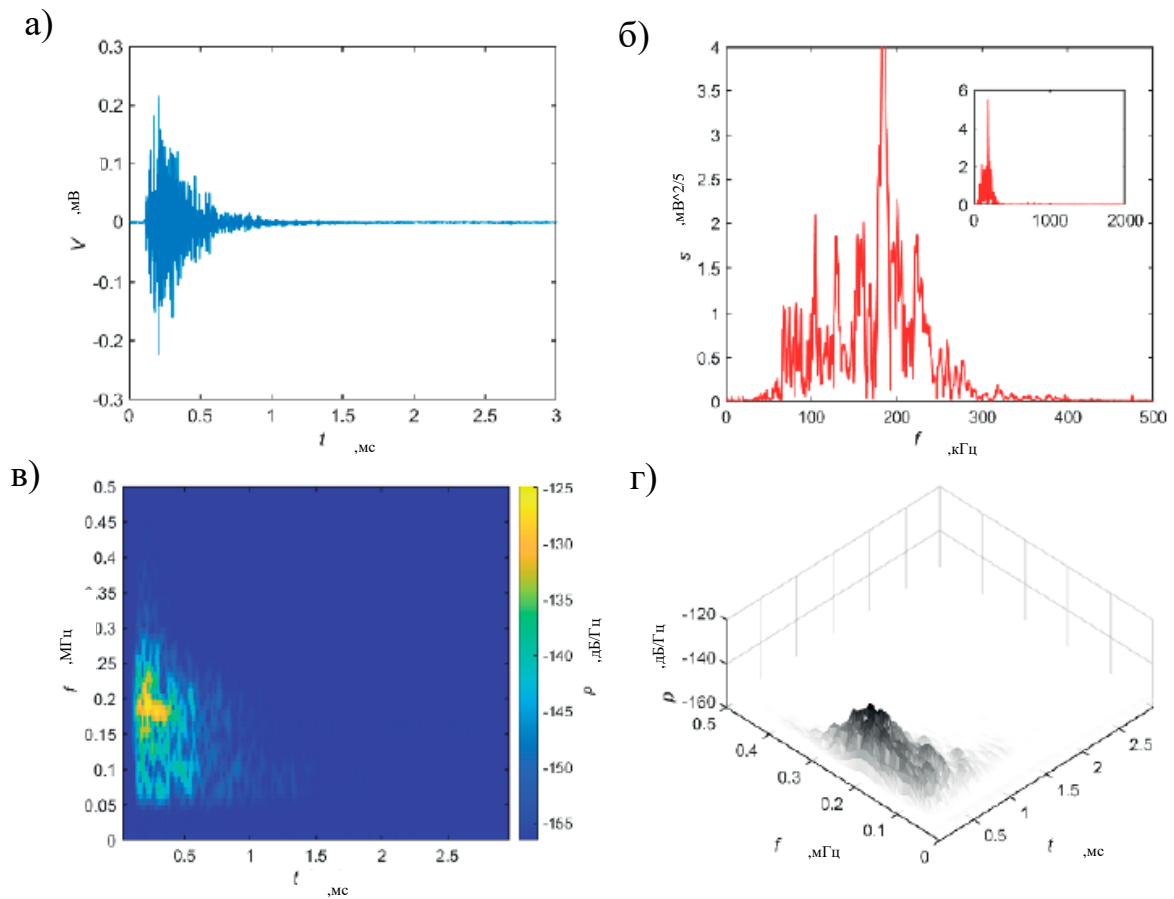


Рис. 3.3. САЕ на проміжку 0-25 циклу F-T (C150)

У даному випадку (рис. 3.3) ситуація вже відрізняється. Із частотного спектра б) видно, що смуга частот є ширшою (50-300 кГц), максимум припадає на проміжок 160-250 кГц. Найбільш швидке загасання частот на спектрограмі видно при 185 кГц.

Варто уточнити, що тут продемонстровано значення для двох різних зразків при однаковому циклі, проте результати для одного й того ж зразка, але циклів 50-75 та 75-100 демонструють відповідно більш повільне загасання

на часовій діаграмі, більші амплітуди протягом часу; на частотному спектрі ширина смуги буде зміщуватися ліворуч.

Висновки першого дослідження: з кожним наступним циклом збільшується середня амплітуда, відбувається здви́г смуги частот до нижчих, параметр загасання спектральної густини є меншим у випадку зразка меншого розміру. Таким чином підтверджено, що саме спектральний аналіз АЕ здатен виявити відмінності між структурою досліджуваного матеріалу при різних циклах F-T.

3.2. Дослідження руйнувань за енергетичними рівнями корунду, натрій-кальцій-силікатне скло та сталь 38ХНЗМФА

Таблиця 3.2

ОК другого дослідження

Об'єкт дослідження	Циліндричний сталевий зразок	Зразки зі скла	Циліндричний зразок із корунду
	$d = 4$ мм $l = 44$ мм	GRB плитка	$d = 13.5$ мм $l = 80$ мм
Початкові параметри системи	СВР-5, SKOP-8. Швидкість індикатора $4 \cdot 10^{-7}$ м/с, тривалість 0.5 мкс, частота нижнього зрізу 600 Гц, частота верхнього зрізу 200 кГц, поріг дискримінації – у межах 30%		

Таблиця 3.3

Класифікація руйнувань за значеннями локальних максимумів НВП

В'язке	В'язко-крихке	Крихке
$\kappa < 0.1$	$0.1 \leq \kappa < 0.2$	$\kappa \geq 0.2$
$E_{WT} < 0.01$	$0.01 \leq E_{WT} < 0.1$	$E_{WT} \geq 0.1$

Експеримент [10] проводився при таких видах навантаження: циліндричний сталевий зразок (розтяг), зразки із скла (стиск), циліндричні зразки з корунду (треточковий згин).

На рис. 3.4 зображено розподіл під час руйнування скла та корунду. Бачимо, що згідно з Таблицею 3.3 розподіл притаманні в'язко-крихке та крихке руйнування. Іншими словами, поступово буде утворюватися макро-тріщина.

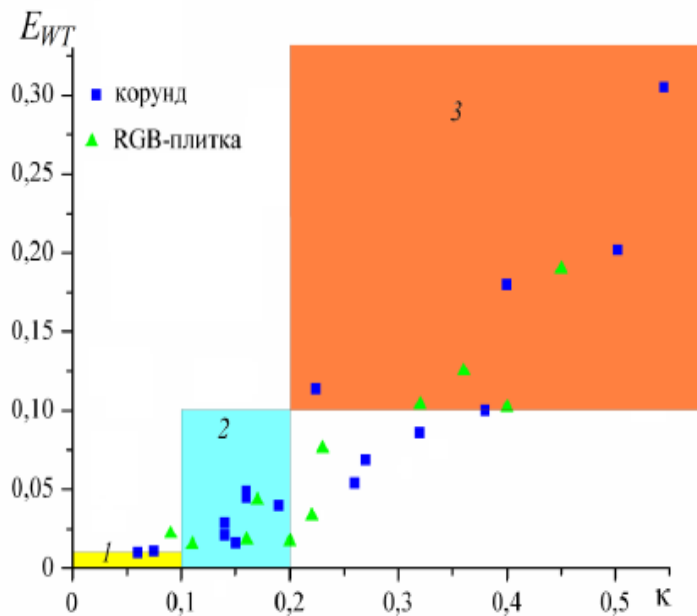


Рис. 3.4. Розподіл САЕ при руйнуванні корунду та RGB-плитки

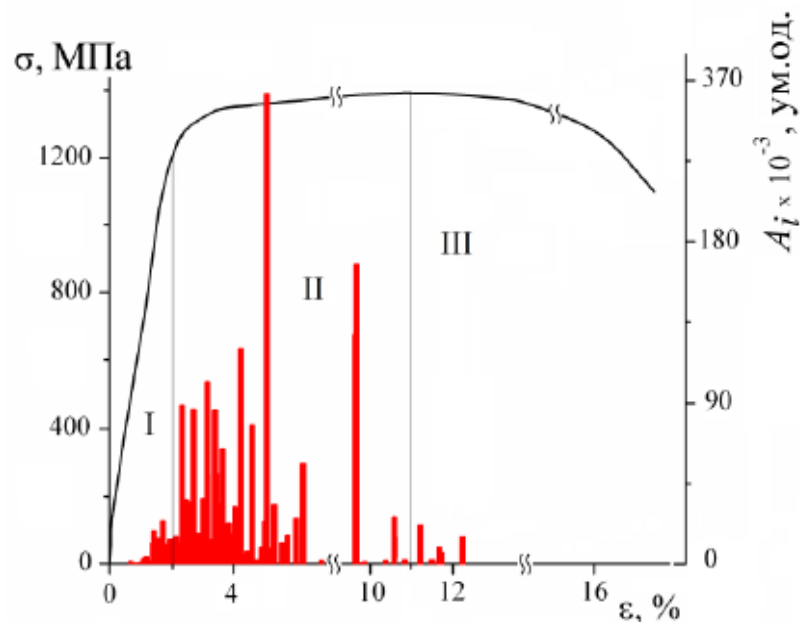


Рис. 3.5. Діаграма розтягу та розподіл амплітуд САЕ за вибірками

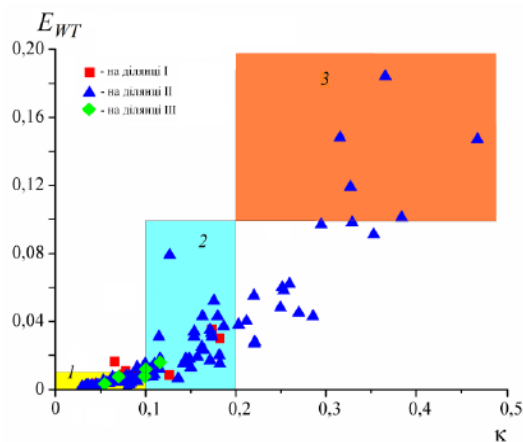


Рис. 3.6. Двопараметричний розподіл для різного навантаження

На рис. 3.5 бачимо діаграму розтягу та результат руйнування сталі 38ХНЗМФА. На ділянці *II* відбувається пластична деформація структури матеріалу. Наявність різких стрибків на діаграмі може свідчити про інтенсивне руйнування. Ділянка *III* демонструє, що стан матеріалу до цього здатний перейти через критичне значення, зони деформації будуть максимально навантажені, після чого зразок буде руйнуватися.

Висновки другого дослідження: із рис. 3.6 можна вважати, що для даного зразка руйнування є в'язко-крихким.

3.3. Дослідження руйнувань конструкційної сталі 38ХН3МФА через вейвлет-перетворення

Таблиця 3.3

ОК третього дослідження

Об'єкт дослідження	Циліндричний зразок сталі 38ХН3МФА
	$d = 4 \text{ мм}$ $l = 44 \text{ мм}$
Початкові параметри системи	Система SKOP-8. Проводився розтяг зразка. Використане програмне забезпечення AGU-Vallen Wavelet

Алгоритм дослідження [2] наступний: оцінити за часовою діаграмою максимальну амплітуду сигналу та час настання АЕ події; до обраних параметрів застосувати відповідний вейвлет; отримати проекцію $WT_{max} - f$.

Таблиця 3.4

Результати третього дослідження

Проміжок часу t , мкс	A_{max} , мкВ	Δf , МГц	WT_{max}	k
0...200	150...200	0.2...0.3	0.3...0.08 (<0.1)	0.03...0.15
200..210	400...600	0.12...0.19	0.11...0.15 (>0.1)	0.2...0.5

На рис. 3.7 зображені результати для першої ділянки на діаграмі розтягу (див. рис. 3.5). Значення параметрів занасено до Таблиці 3.4.

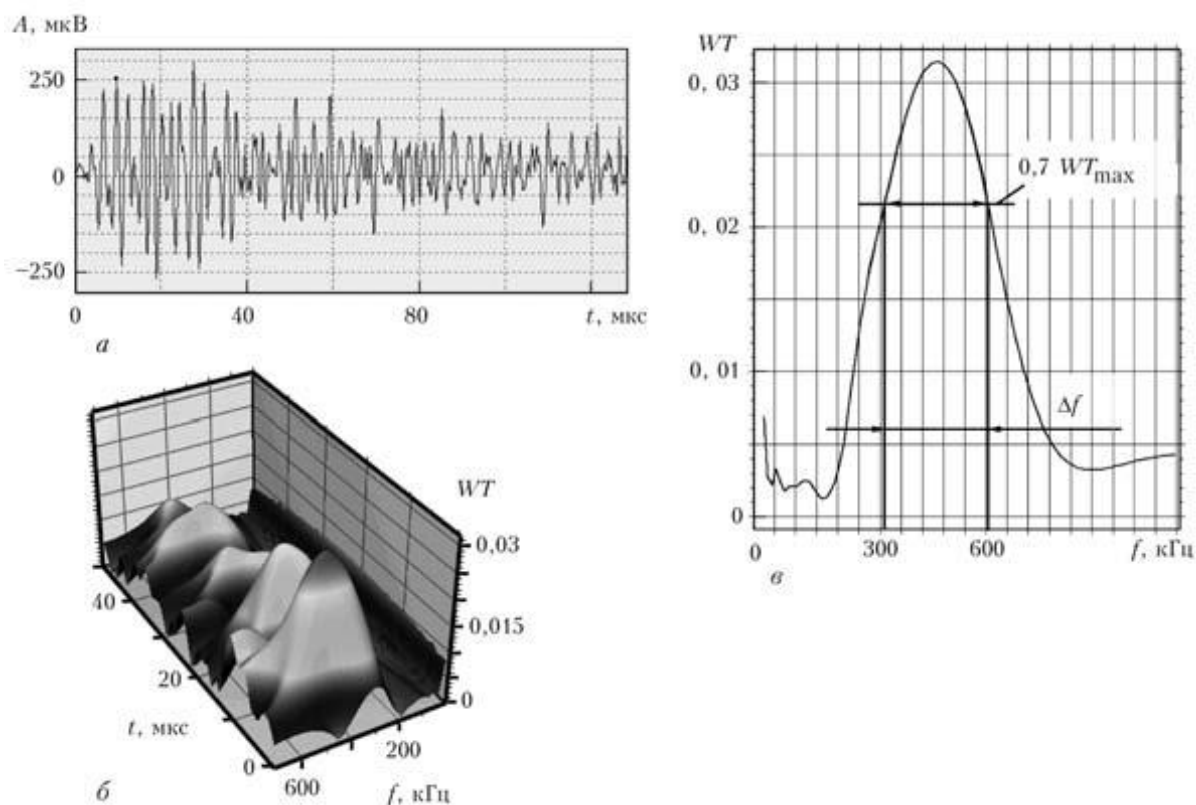


Рис. 3.7. Сигнал АЕ для ділянки в'язкого руйнування; а) часова діаграма, б) НПВ САЕ; в) проекція на площину критеріальних коефіцієнтів

Сигнали у даному випадку є сигналами першого типу.

На рис. 3.8 зображені результати для другої ділянки на діаграмі розтягу (див. рис. 3.5). Значення параметрів занасено до Таблиці 3.4.

Ці САЕ є сигналами другого типу, оскільки вони мають більші амплітуди і вужчу смугу частот, відповідно набагато більші вейвлет-коефіцієнти.

Таким чином підтверджено, що значення у першому випадку є правдивими для в'язкого руйнування, яке поступово переходить у в'язко крихке. При цьому автор зазначає, для сталі характерне чергування в'язкого та крихкого руйнувань через принципи механіки про стадії руйнування.

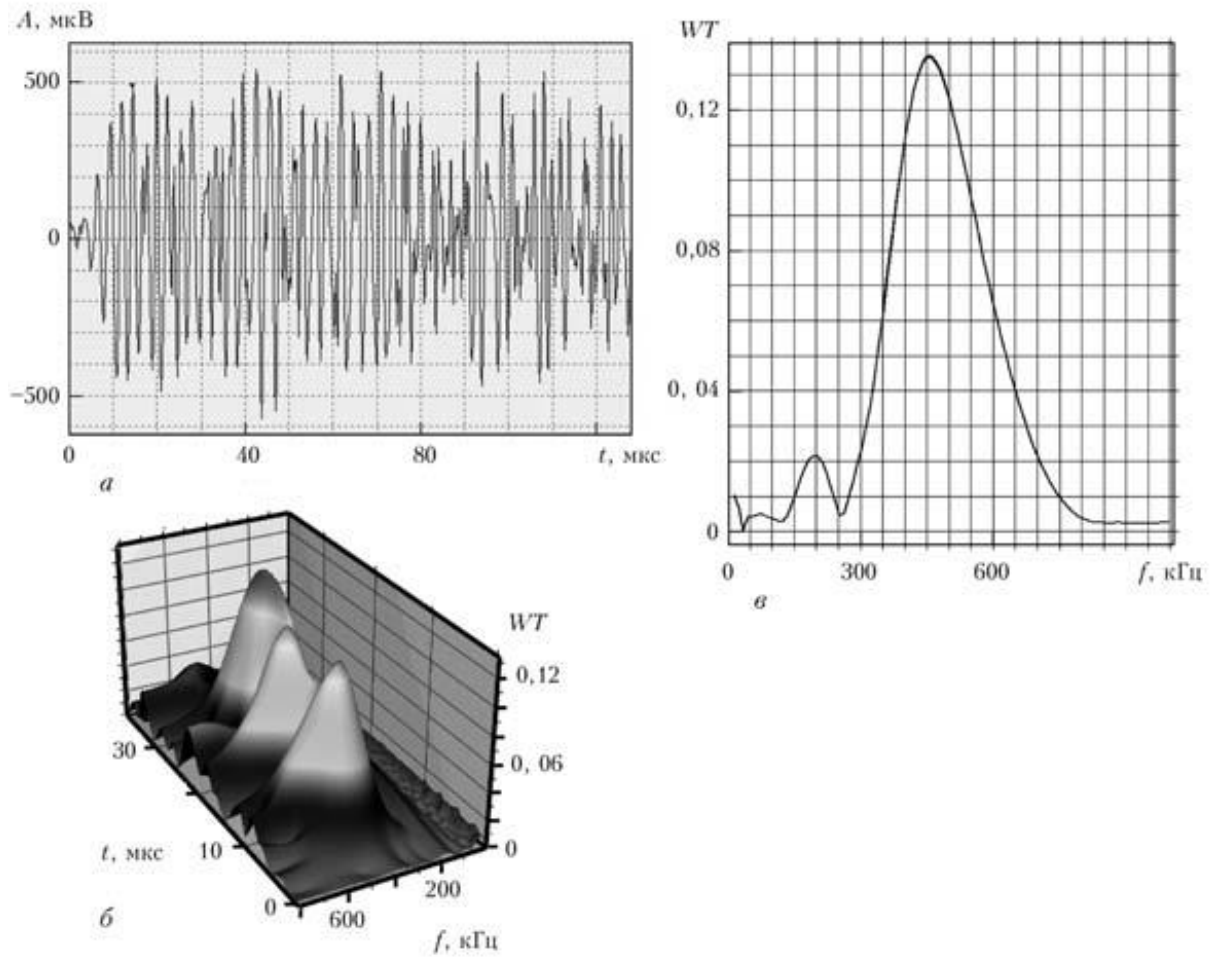


Рис. 3.8. Сигнал АЕ для ділянки в'язко-крихкого руйнування; а) часова діаграма, б) НПВ САЕ; в) проекція на площину критеріальних коефіцієнтів

Висновки третього дослідження: значення критеріального коефіцієнта на ранніх стадіях руйнування буде низьким. Це буде означати в'язке руйнування. У той же час при збільшенні навантаження природа руйнувань змінюється на в'язко-крихку, а коефіцієнт стає більшим.

Висновки до Розділу 3

У даному розділі розглянуто три експерименти, що доводять інформативність спектральних характеристик. За їх допомогою можна визначати природу руйнувань; будувати частотно-часові залежності, де наочно видно тривалість певних частот (ВП). На частотному спектрі бачити, які частоти приносять основний вклад у САЕ.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота розглядає питання дослідження САЕ методом спектрального аналізу. Для цього необхідно було висвітлити актуальність методу АЕ як такого, так і застосування спектральних характеристик при трактуванні результату.

У Розділі 1 висвітлено наявність різних методів НК; показано, чому саме метод АЕ має особливі можливості для дослідження різного роду ОК. Актуальність підкріплена прикладами.

У Розділі 2 детально описані як методи аналізу САЕ, так і окремі характеристики чи перетворення. Наведено математичну модель як прийняту модель АЕ. Продемонстровані основні математичні особливості дискретного та неперервного процесів. Для кожного виду аналізу наведено поширені характеристики та діапазони САЕ.

У Розділі 3 наведено реальні приклади із дослідження АЕ, де застосовують саме спектральні характеристики. Доведено, що вони несуть найбільшу інформаційність, є гнучкими до різних поставлених завдань та здатні комплексно як оцінити стан конкретної проблеми, так і скласти розуміння про ймовірні АЕ події у подібних ОК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю : КПП ім. Ігоря Сікорського, Електронні текстові данні. – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с
2. Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / Скальський В.Р., Ботвіна Л.Р., Станкевич О.М., Дубицький О.С., Матвіїв Ю.Я. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2011. — № 3. — С. 12-17. — Бібліогр.: 20 назв. — укр
3. Застосування методу акустичної емісії для діагностування корпусів ядерних реакторів (огляд) / Повідомлення П. Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів АЕС. Частина 1/ Неклюдов І. М., Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Добровольська Л. Н. /Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ. Львів, 2014
4. Ковалевский С. В., Ковалевська О. С. Диагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу): монографія. Краматорськ : ДДМА, 2017. – 110 с.
5. Космач О. П. Спектральний аналіз модельних сигналів акустичної емісії під час зміни навантаження пари тертя із композиційних матеріалів / Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2014. - № 1. - С. 70-79.
6. Марасанов В. В., Шарко О. В., Шарко А. О. Статистична обробка сигналів акустичної емісії та їх параметрів – 2016
7. Назарчук З.Т., Скальський, В.Р., Почапський Є.П. Технології відбору та опрацювання низько енергетичних діагностичних сигналів : монографії. Київ : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка : Наук. думка, 2014. - 304с
8. Скальський В. Р., Станкевич О. М., Кузь І. С, Застосування вейвлет-перетворення для аналізу сигналів акустичної емісії під час руйнування матеріалів (Огляд)

9. Скальський В. Р., Сулим Г. Т. Основи акустичних методів неруйнівного контролю : навч. посіб. - Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. - 386 с.

10. Станкевич О. М. Дослідження особливостей руйнування конструкційних матеріалів за енергетичними характеристиками сигналів акустичної емісії / IV міжнародна науково-технічна конференція „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“ — Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. — С. 74-77

11. Сусліков Л. М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.

12. Троицкий В.А., Попов. В.Ю. Ультразвуковой контроль сварных соединений — К.: Феникс, 2010. — 224 с.

13. Harmash, O. V. (2016). Модель та імовірнісні характеристики сигналів акустичної емісії. Електроніка та Зв'язок, 21(5), 77–82.

14. Jose M. Machorro-Lopes and others. Analysis of Acoustic Emission Signals Processed with Wavelet Transform for Structural Damage Detection in Concrete Beams – 2023

15. Kliuiev S., PhD / Experimental study of the method of locomotive wheelrail angle of attack control using acoustic emission / Department of logistics management and traffic safety in transport / Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. - 2018

16. Marasanov Volodymyr, Sharko Artem. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with the Parameters of Acoustic Emission Signals / Department of Informatics and Computer Science, Faculty of Cybernetics, Kherson National Technical University. – 2016

17. Nesvijski E., Marasteanu M. Wavelet Transform and Its Applications to Acoustic Emission Analysis of Asphalt Cold Cracking Department of Civil Engineering, University of Minnesota

18. Sikorski Wojciech / Acoustic Emission. Research and Applications / Poznan University of Technology - Publisher: InTech / ISBN: 978-953-51-1015-6
19. Terchi A. and Y H J Au Acoustic Emission Signal Processing - 2001
20. Topolář L., Kocáb D., Pazdera L. and Vymazal T. Analysis of Acoustic Emission Signals Recorded during Freeze-Thaw Cycling of Concrete // Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology
21. Xuebin Xie, Shaoqian Li, Jiang Guo. Study on Multiple Fractal Analysis and Response Characteristics of Acoustic Emission Signals from Goaf Rock Bodies. School of Resources and Safety Engineering / Central South University / Changsha, China – 2022
22. URL: <https://theconstructor.org/practical-guide/importance-acoustic-emission-test-construction/155456/>
23. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/acoustic-emission-testing>