

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**бакалавра**

**на тему: «Діагностування технічного стану підшипників  
кочення на основі аналізу сигналів акустичної емісії»**

Спеціальність: 131 Прикладна механіка  
ОПП: Комп'ютерний інжиніринг в механіці  
Виконав: студент групи КМ-71  
Сенюк О.В.  
Керівник: доц. Савченко Є.М.  
Рецензент: зав. кафедри Загорулько А.В.

Суми 2021

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 66 с., 40 рис., 1 табл., 15 дж.

Об'єкт дослідження – зміна технічного стану вузлів машини.

Мета роботи - дослідити можливість отримання діагностичної інформації про стан вузлів машини (стосовно підшипників кочення), аналізуючи сигнали акустичної емісії.

Метод дослідження - для отримання характеристик розвитку дефектів в підшипниках кочення використано метод аналізу сигналів акустичної емісії.

В роботі розглянуті умови виникнення сигналів акустичної емісії, наведені приклади прояву акустичної емісії при механічних випробуваннях на статичний розрив, циклічну втому, і показано зв'язок акустичної емісії з властивостями матеріалів, проведено аналіз фізичної і математичної моделей процесу акустичної емісії, показана сутність акустичних хвиль.

Результати досліджень акустичних хвиль, пов'язаних з деформацією матеріалів, показують, що на основі цього явища можна створити ефективні методи неруйнівного діагностичного контролю стану матеріалів для оцінки небезпеки ситуації, що виникла, і близькості моменту відмови (руйнування). Випромінювання акустичної емісії, обумовлене недосконалістю або дефектом контактуючих поверхонь, ефективно діагностується, що дозволяє давати об'єктивний висновок про технічний стан деталей і вузлів машини. Застосування акустичної емісії показує, що сигнал має достатню інформативність і його можна використовувати для діагностування різних дефектів підшипників кочення.

**ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ДІАГНОСТУВАННЯ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗУВАННЯ, АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ, ДЕФЕКТ, ТРІЩИНА, ПІДШИПНИК КОЧЕННЯ.**

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
1 Явище акустичної емісії.....	8
1.1 Акустико-емісійний метод.....	8
1.2 Умови виникнення акустичної емісії .....	13
1.3 Основні джерела акустичної емісії.....	15
1.4 Параметри акустичної емісії.....	18
1.5 Висновки.....	18
2 Залежність сигналів акустичної емісії від параметрів джерел .....	20
2.1 Загальне формулювання задачі.....	20
2.2 Деякі емпіричні залежності.....	24
2.3 Наближена модель тріщини нормального відриву як випромінювача акустичної емісії .....	27
2.4. Визначення координат джерел акустичної емісії .....	32
2.5 Висновки .....	37
3 Розробка методу діагностування технічного стану підшипників кочення на основі аналізу сигналів акустичної емісії .....	38
3.1 Прилади й обладнання для аналізу імпульсів акустичної емісії в підшипниках кочення .....	38
3.2 Особливості та опис аналізатора імпульсів акустичної емісії 4429 ...	39
3.3 Результати дослідження сигналів акустичної емісії в підшипниках кочення .....	46
3.4 Висновки .....	63
Висновки.....	64
Перелік джерел посилань.....	65

## ВСТУП

Останнім часом спостерігається тенденція неухильного зростання вимог, як до конструкційних матеріалів, так і до методів оцінки їх надійності та якості. Особлива увага приділяється розробці нових, фізично обґрунтованих критеріїв конструктивної міцності матеріалів, заснованих на всебічному вивченні явищ, що лежать в основі процесів деформації і руйнування. Такий підхід передбачає розширення наших уявлень про природу міцності і механізми руйнування матеріалів на різних масштабних рівнях. Це можливо тільки при використанні в процесі вивчення даних явищ комплексу сучасних фізичних методів дослідження.

Як показує дійсність, вирішення поставленого завдання комплексного підходу до проблеми несучої здатності матеріалів і конструкцій можливо на стику матеріалознавства, фізики та механіки руйнування, тобто в рамках нових напрямків: мікромеханіки руйнування і фізичної мезомеханіки. Не виключені методи класичного матеріалознавства. Широкі перспективи передбачаються на нових підходах, що поєднують принципи синергетики і теорії фракталів.

Метод акустичної емісії (АЕ), заснований на реєстрації і обробці хвиль напружень, що виникають в результаті формування, зміни та руйнування структур різних матеріалів, є в даний час ефективним для вивчення процесів і стадій розвитку дефектної структури і створення систем безперервного моніторингу відповідальних об'єктів промисловості.

Перші роботи з вивчення явища АЕ з'явилися в кінці 40-х років 20 століття в США і на початку 50-х років у ФРН. Розвиток електроніки та створення спеціальних аналогових приладів АЕ дозволили з кінця 60-х років використовувати метод АЕ для виявлення росту тріщин в процесі різних механічних випробувань. Нове відродження методу АЕ відноситься до 90-х років і пов'язане з активною появою і використанням персональних ЕОМ.

Цифрова техніка з великим об'ємом пам'яті і швидкістю обробки інформації дозволила накопичувати і зберігати АЕ інформацію, а також при необхідності обробляти і аналізувати цю інформацію за різними параметрами.

Аналіз сучасного стану робіт показує, що вся проблема, пов'язана з методом АЕ, може бути представлена наступними науковими напрямками:

- теорія і методи діагностики і прогнозу несучої здатності конструкцій, що включають питання теоретичних і експериментальних досліджень руйнування;

- інформаційно-вимірювальні системи, призначені для аналізу АЕ інформації, необхідної для прийняття рішень про стан конструкцій;

- математичне забезпечення вимірювальної апаратури, що включає робочі програми організації обробки вхідної інформації та підпрограми, пов'язані зі стисненням інформації, підвищенням достовірності результатів вимірювання на основі теорії розпізнавання образів, математичної статистики та теорії ймовірностей;

- теорія прогнозування і прийняття рішень.

**Мета роботи** – дослідити можливість отримання діагностичної інформації про стан вузлів машини (стосовно підшипників кочення), аналізуючи сигнали акустичної емісії.

Для досягнення даної мети поставлено наступні **завдання**:

- розглянути сутність методу акустичної емісії;
- проаналізувати підходи до діагностування вузлів промислового обладнання методом акустичної емісії;
- оцінити результати акустико-емісійного контролю технічного стану підшипників кочення.

Об'єкт дослідження – зміна технічного стану вузлів машини.

Предмет дослідження - підшипники кочення.

Методи дослідження - для отримання характеристик розвитку тріщин був використаний метод аналізу сигналів акустичної емісії.

З метою виявлення взаємозв'язку між параметрами акустичних сигналів, що виникають в діагностованих зразках під впливом ударної, монотонно зростаючого механічного, термічного або іншого навантаження, і граничною їх міцністю, слід накопичити більше теоретичних і практичних основ і знань, щоб ефективно застосовувати метод акустичної емісії в діагностуванні того чи іншого промислового устаткування.

СЛУМД

# 1 ЯВИЩЕ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

## 1.1 Акустико-емісійний метод

Акустико-емісійний метод - один з пасивних методів акустичного контролю. Акустична емісія (АЕ) полягає в генерації пружних хвиль напруги в твердих тілах в результаті локальної динамічної перебудови їх структури. Метод заснований на аналізі параметрів цих хвиль.

Головні джерела АЕ - процеси пластичної деформації, пов'язані з появою, рухом і зникненням дефектів кристалічної решітки: поява і розвиток мікро- і макротріщин; тертя (в тому числі поверхонь розривів одна об одну); фазові (наприклад, алотропні) перетворення в твердому тілі. АЕ проявляється у вигляді окремих акустичних імпульсів [1].

Форма імпульсів АЕ, що виникають в результаті перебудови структури, залежить від природи процесу і матеріалу виробу. Процес стрибкоподібного зняття локальних напружень шляхом руйнування викликає імпульс з крутим фронтом, як більшість імпульсів на рис. 1.1, а.

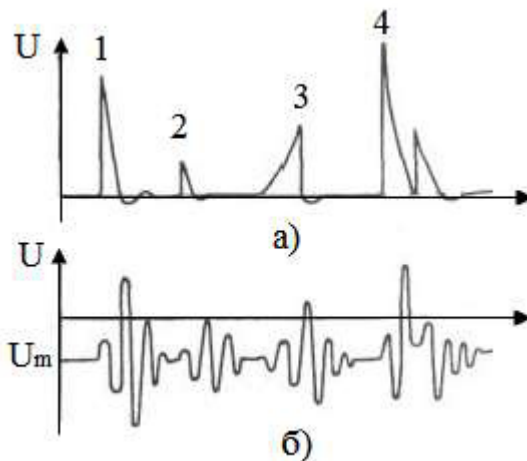


Рисунок 1.1 – Форма імпульсів АЕ (а) і відповідних сигналів після приймального тракту (б)

Спад імпульсу відповідає відновленню внутрішньої напруги. Іноді вони не відновлюються або відновлюються не в повному обсязі. Повернення до

напруженого стану відбувається повільніше, ніж розрив, може супроводжуватися швидко затухаючими коливаннями, як показано для першого імпульсу. Імпульси розглянутого типу називають релаксаційним. Вони характерні для процесів виникнення і руху дислокації і їх груп, виникнення і розвитку тріщин.

Третій з показаних на рис. 1.1, а імпульсів відповідає процесу акселераційного типу. Коли дислокації протилежного знаку зближуються і анігілюють або дислокація виходить на поверхню кристала і зникає, їх енергія перетворюється в пружну. Процеси зближення або виходу на поверхню дислокації відбуваються з прискоренням, звідси назва імпульсу цього типу [2].

Енергія процесу анігіляції дислокації - порядку  $10^{-18}$  -  $10^{-16}$  Дж, тривалість імпульсу - до  $10^{-11}$ с, ширина спектру - сотні МГц. Інші дислокаційні джерела мають більшу енергію і тривалість.

Точкове віддалене від поверхні джерело АЕ випромінює сферичні (подовжню і поперечну) хвилі. Загасання хвиль в матеріалі викликає сильне ослаблення високочастотної складової сигналу, так як коефіцієнт загасання швидко зростає з частотою. При падінні на поверхні виробу хвилі відбиваються і трансформуються. В результаті з'являються поверхневі хвилі, амплітуда яких зменшується з відстанню значно повільніше, ніж для сферичної хвилі, тому вони переважно реєструються приймачем. Все це призводить до значного спотворення початкового сигналу АЕ в зоні прийому.

В результаті проходження імпульсів через приймальний перетворювач і підсилювальний тракт з обмеженою пропускну здатністю відбувається подальше спотворення імпульсів. Вони набувають біполярний коливальний характер, тривалість їх збільшується, швидко наступаючі один за одним імпульси зливаються (рис. 1.1, б).

АЕ називають дискретною, коли тривалість реєстрованих імпульсів менше інтервалу між ними. В іншому випадку говорять про безперервну АЕ. Поява імпульсів АЕ в значному обсязі матеріалу - процес у часі статистичний,



тому можна говорити лише про середню тривалість імпульсів і інтервалів між ними. Крім того, дискретність або неперервність залежать від роздільної здатності реєструє апаратури.

Основні параметри АЕ - це число імпульсів за час спостереження і активність АЕ, рівна кількості імпульсів в деякому інтервалі часу спостереження (зазвичай 0,1 або 1 с). Фактично реєструються не всі імпульси АЕ, а лише ті, що перевищують певний поріг (рис.1.1, б). Тоді параметри емісії позначають: сумарний рахунок  $N$  і швидкість рахунку  $N$ .

Для характеристики процесу АЕ важливо не тільки кількість імпульсів, але і їх амплітуда. Параметром, що враховує обидві величини, є ефективне значення акустичної емісії  $V$ , пропорційне добутку активності (або швидкості рахунку) АЕ на середнє значення амплітуди сигналів АЕ за одиницю часу. Її зазвичай вимірюють у вольтгах (точніше - в мкВ).

Акустичну емісію при деформації матеріалів спостерігають в процесі механічних випробувань гладких зразків. Кожному типу діаграми напруження - деформація, одержуваної при випробуванні на розтяг різних матеріалів, відповідає своєрідна зміна процесу АЕ (рис. 1.2). З кривих видно, що навіть в області пружності (від 0 до  $\sigma_T$ ) спостерігається АЕ. Вона виникає від того, що матеріал неоднорідний, навантажений нерівномірно і в окремих областях відбувається пластична деформація, хоча в цілому процес пружний.

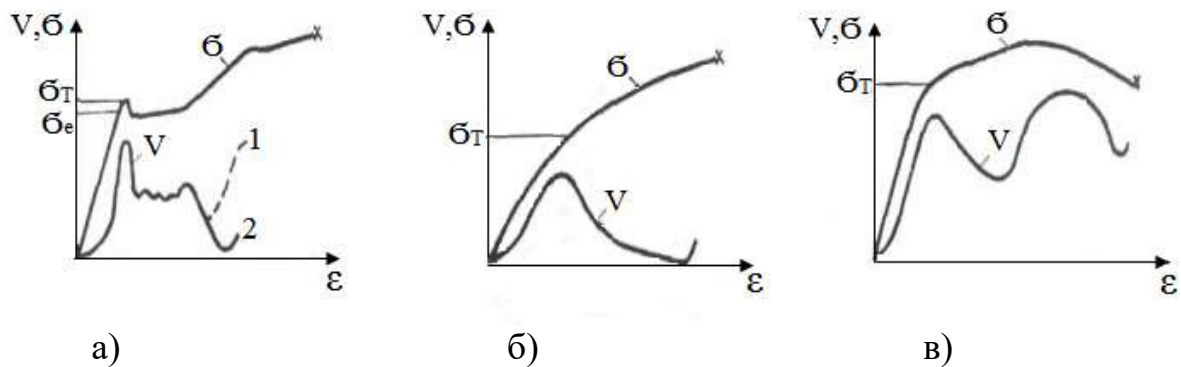


Рисунок 1.2 – Типові криві зміни ефективності АЕ в зіставленні з діаграмами напруження-деформація для заліза (а, крива 1), сталі (а, крива 2),

металів з гранецентрованою кубічною граткою (б), старіючих алюмінієвих і титанових сплавів (в)

При переході до пластичної деформації АЕ різко зростає у великому обсязі зразка. Ця деформація пов'язана з масовим утворенням і переміщенням дефектів кристалічної решітки. Відбувається утворення, рух дислокації і їх груп, двійникування. Всі ці процеси пов'язані з появою сигналів АЕ.

Максимум ефективного значення і активності АЕ досягається поблизу межі текучості  $\sigma_T$ , коли пластична деформація становить близько 0,2% довжини зразка. Потім значення  $V$  і  $N$  зменшуються через те, що рух новоутворених дислокацій обмежується вже існуючими. В результаті сигнали АЕ з достатньою для реєстрації амплітудою з'являються все рідше.

Додаткові максимуми АЕ для деяких матеріалів спостерігаються в кінці майданчика плинності або поблизу максимуму напруги. Вони пов'язані з руйнуванням цементитових пластинок в сталі (рис. 1.2, а, крива 2) і двійникуванням (рис. 1.2, б, в). Перед руйнуванням зразка (відзначено хрестиком) зазвичай спостерігають імпульси великої амплітуди [3].

Важливий параметр АЕ при пластичній деформації - амплітудний розподіл. Метали з гратками типу гранецентрований куб (алюміній, залізо) мають невелику середню енергію імпульсу, сигнали великої амплітуди в них спостерігають рідко. Для цих матеріалів характерна деформація ковзанням. Метали з гратками типу об'ємноцентрований куб (в тому числі залізо) мають трохи більше середнє значення енергії імпульсів. Деформація металів з гексагональними щільноупакованими гратками (наприклад, цинку, титану) викликає імпульси АЕ з амплітудою в тисячі разів більшою, так як вони деформуються двійникуванням.

Відзначають такі чинники, що підвищують амплітуду сигналів АЕ: високу міцність, анізотропію, неоднорідність, крупнозернистість (лита структура), велику загальну товщину матеріалу, велику швидкість деформації, низьку температуру, наявність надрізів.

У зразках з дефектами, як штучними (надрізами), так і природними тріщинами, відбувається концентрація напружень поблизу гострого краю дефекта. У цьому місці утворюється локальна зона пластичної деформації, обсяг якої пропорційний коефіцієнту інтенсивності напружень  $K$  - величині, що характеризує складний напружений стан. Від цієї зони з'являються імпульси АЕ, число яких також пов'язане з  $K$ . Коли локальне напруження перевершує межу міцності, відбувається мікророзрив - стрибкоподібне збільшення дефекту. Він проходить через цю зону, створюючи сигнали АЕ. При подальшому навантаженні процес повторюється. Таким чином, число  $N$  імпульсів АЕ зростає з ростом  $K$ .

АЕ при багаторазовому навантаженні. При повторному навантаженні АЕ різко зменшується і знову починає реєструватися після досягнення максимального навантаження першого циклу. Це явище називають ефектом Кайзера. Він особливо добре проявляється на гладких зразках і гірше - на зразках з надрізом. Останнє свідчить про накопичення пошкоджень при повторних навантаженнях.

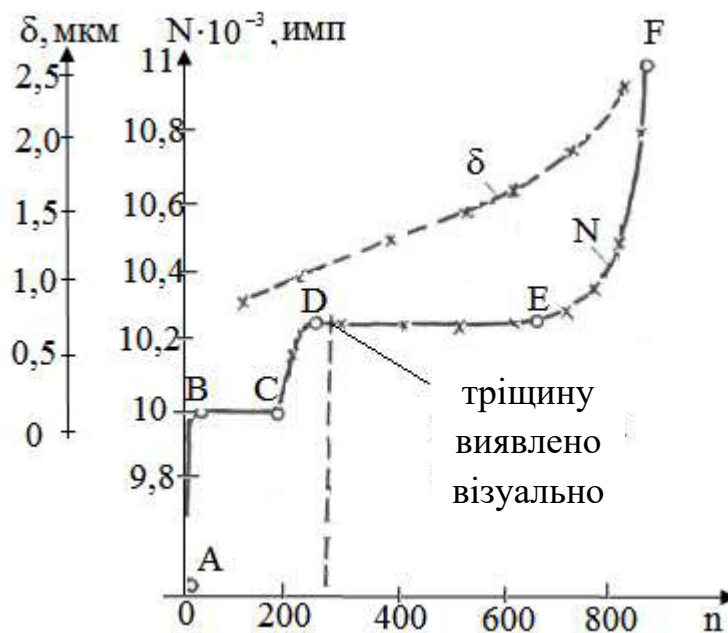


Рисунок 1.3 – Число  $N$  імпульсів АЕ і розкриття тріщини  $\delta$  в залежності від числа  $n$  циклів навантаження при постійній максимальній нарузі

На рис. 1.3 показано зростання числа  $N$  імпульсів АЕ від числа  $i$  циклів навантаження при малоциклових випробуваннях зразка з надрізом. Ділянка АВ відповідає першому циклу, сумарний рахунок імпульсів тут швидко зростає. В околицях точки В зростання сповільнюється в 10-100 разів, а на ділянці ВС сумарний рахунок залишається практично постійним. В цьому проявляється ефект Кайзера. В процесі циклічних навантажень відбувається повільне накопичення пошкоджень в металі зразка, після чого ефект Кайзера перестає діяти і перед моментом появи видимої тріщини відбувається прискорене зростання (ділянка CD), і далі повільне збільшення з ростом тріщини (DE). При певного розміру тріщини відбувається руйнування, що супроводжується зростанням  $N$  (EF). досягненні

Слід зазначити, що зображення на рис. 1.3 дещо умовне. Насправді тріщина зростає стрибками, які на малюнку згладжені.

## **1.2 Умови виникнення акустичної емісії**

Хвилі напружень у твердих тілах можуть бути порушені різними джерелами (тілами або фізичними полями) в процесі їх взаємодії з тілом. Цей процес фізичної взаємодії зводиться в кінцевому підсумку до механічного (силового) впливу, тобто навантаження збуджуваного тіла або його розвантаження. Широко відомі такі джерела і процеси їх взаємодії зі збуджуваним тілом, як зіткнення, тертя твердих тіл; струмені рідини (газу) при обтіканні тіла в режимах турбулентної течії, кипіння, кавітація; електромагнітні, теплові та інші поля при їх впливі на поверхню тіла. Всі вони розташовані поза збуджуваним тілом, і тому їх можна віднести до класу зовнішніх джерел [4].

Терміном акустичної емісії позначають процеси випромінювання хвиль напружень, викликаних внутрішніми джерелами, розташованими в товщі досліджуваного матеріалу.

Спільність фізичної природи збудження хвиль напружень (незалежно від типу збудливого джерела) дозволяє сформулювати основні умови виникнення акустичної емісії виходячи з аналізу умов збудження таких хвиль від зовнішніх джерел.

Якщо всі точки твердого тіла піддати одночасній однакою механічній дії, вони будуть відчувати в просторі і часі однакові зміни руху; тіло буде рухатися як єдине ціле, і хвильові процеси в ньому не виникнуть. При локальному впливі, внаслідок кінцевої швидкості розповсюдження збурень, спостерігається хвильовий процес. Саме локальність впливу джерела є необхідною умовою виникнення акустичної емісії.

Тому умови виявлення акустичної емісії можна аналізувати виходячи з умов виявлення коливань тіла. З цією метою розглянемо останні умови на прикладі взаємодії твердих тіл при зіткненні.

Відношення енергії коливань до загальної енергії для випадку зіткнення двох сфер

$$\alpha = \frac{1}{50} g_0 \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (1.1)$$

де  $g_0$  - швидкість зіткнення;

$\rho$  - щільність матеріалу сфер;

$E$  - модуль пружності;

а тривалість контакту (тривалість зіткнення) при центральному ударі

$$\tau = \frac{2,9432}{g^{1/5}} \left( \frac{5}{4} \frac{1}{\kappa_1 \kappa_2} \right)^{2/5}, \quad (1.2)$$

де  $\kappa_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}$ ;

$m_1, m_2$  - маси тіл, що стикаються;

$\kappa_2$  - так звана жорсткість контакту.

З наведених співвідношень випливає, що енергія хвильового руху послаблюється зі зменшенням швидкості зіткнення або, при інших рівних умовах, зі збільшенням тривалості контакту. Умови виникнення «помітних» коливань тіл, що стикаються, формулюється у вигляді

$$\tau \leq T, \quad (1.3)$$

де  $T$  - період відповідної форми коливань тіла.

Таким чином, коливання можуть бути виявлені при досить швидкому (імпульсному) впливі джерела.

### 1.3 Основні джерела акустичної емісії

Акустичну емісію можуть викликати такі внутрішні, стосовно даного матеріалу джерела, як піддавані зміні (перебудові) елементи структури матеріалу в разі локальної зміни внутрішньої напруги в матеріалі при досить високій швидкості цієї зміни.

*Ковзання.* Ковзання є одним з основних механізмів необоротної формозміни металів і сплавів і обумовлене рухом дислокації. Наявність локальних полів напружень навколо дислокації при досить високій швидкості її руху створює необхідні умови виникнення акустичної емісії. Коттрелл пояснює процес виникнення механічних хвиль в цьому випадку наступним чином [5]. У структурах з щільною упаковкою атомів порушення правильності їх розташування створюють у центрі дислокації менш щільну упаковку, тобто відбувається збільшення питомого об'єму в цій частині тіла. Розміри і форма цієї зони розширення при русі дислокації зі швидкістю  $v$  змінюється з частотою

$$v = \frac{g}{b}, \quad (1.4)$$

де  $b$  - параметр решітки в напрямку руху дислокації.

В навколишню ґратку від цієї зони поширюються хвилі з частотою  $\nu$ .

*Двійникування.* Двійникування являє собою, як відомо, поворот вузлів решітки однієї частини кристала в положення, симетричне до іншої його частини. Двійникування супроводжується локальною формозміною і відбувається з великою (близькозвуковою) швидкістю, тим самим виконуються основні умови збудження механічних хвиль.

*Фазові перетворення.* Фазові перетворення мартенситного типу являють собою зсувні колективні переміщення атомів і, як правило, супроводжуються зміною форми. При переміщенні утворюються (зникають) частки нової фази за 0,05 - 0,5 мкс.

*Утворення тріщин.* З дислокаційних поглядів утворення і розвиток тріщин обумовлені рухом дислокацій, тому зростаюча тріщина повинна народжувати акустичну емісію. З феноменологічної позиції випромінювання механічних хвиль тріщиною, що швидко розвивається, можна пояснити динамічним розвантаженням частини матеріалу, що примикає до країв тріщини, що утворюється. До цього ж ефекту призводить і стрибкуватість розвитку тріщини, що в цілому повільно розвивається.

В.М. Фінкель зазначає, що причиною випромінювання механічних хвиль тріщиною, що розвивається, є пульсації її швидкості і зміни напрямку, тобто акустичну емісію викликає, зокрема, розгалуження тріщини.

Розвиток тріщини в реальних конструкційних матеріалах пов'язано з пластичною деформацією матеріалу в районі її вершини, тому акустична емісія виникає внаслідок дії таких джерел, як ковзання і двійникування.

*Процеси тертя.* Як відомо, при сухому терті твердих тіл відбуваються пластичні деформації вершин мікронеоднорідностей поверхні, а також «злипання» тіл на ділянках істинного контакту, діють сили молекулярного

зчеплення. При взаємному ковзанні тел відбувається розрив старих і утворення нових ділянок контакту. Сухе тертя може супроводжуватися утворенням мікротріщин на поверхні, що піддається тертю. Всі ці процеси здатні, очевидно, порушувати механічні хвилі. Подібні процеси можуть виникати і у внутрішніх обсягах матеріалу, тоді викликані ними механічні хвилі слід відносити до акустичної емісії. Кайзер вважав процеси тертя поверхонь розриву, які виникають всередині матеріалу при деформації, одним з основних джерел акустичної емісії. Типовим випадком дії такого механізму є робота матеріалу з втомної тріщиною при циклічному навантаженні. Загальновідомий характер втомного зламу показує, що процес періодичного розкриття і схлопування тріщин супроводжується тертям і притиранням її поверхонь [7].

Перераховані механізми не вичерпують, очевидно, всіх причин виникнення акустичної емісії. Однак всі вони мають загальні ознаки, що дозволяють наступним чином сформулювати поняття акустичної емісії. Акустична емісія - процес випромінювання матеріалом механічних хвиль, викликаних локальної динамічної перебудовою внутрішньої структури матеріалу.

*Процеси тертя.* Як відомо, при сухому терті твердих тіл відбуваються пластичні деформації вершин мікронеоднорідностей поверхні, а також «злипання» тіл на ділянках істинного контакту, діють сили молекулярного зчеплення. При взаємному ковзанні тіл відбувається розрив старих і утворення нових ділянок контакту. Сухе тертя може супроводжуватися утворенням мікротріщин на поверхні, що піддається тертю. Всі ці процеси здатні, очевидно, породжувати механічні хвилі. Подібні процеси можуть виникати і у внутрішніх об'ємах матеріалу, тоді викликані ними механічні хвилі слід відносити до акустичної емісії. Кайзер вважав процеси тертя поверхонь розриву, які виникають всередині матеріалу при деформації, одним з основних джерел акустичної емісії. Типовим випадком дії такого механізму є робота



матеріалу з втомної тріщиною при циклічному навантаженні. Загальновідомий характер втомного зламу показує, що процес періодичного розкриття і схлопування тріщин супроводжується тертям і притиранням її поверхонь [7].

Перераховані механізми не вичерпують, очевидно, всіх причин виникнення акустичної емісії. Однак всі вони мають загальні ознаки, що дозволяють наступним чином сформулювати поняття акустичної емісії. Акустична емісія – це процес випромінювання матеріалом механічних хвиль, викликаних локальною динамічною перебудовою внутрішньої структури матеріалу.

#### 1.4 Параметри акустичної емісії

Для з'ясування характеру сигналів акустичної емісії (АЕ) розглянемо найпростішу схему її вимірів (рис. 1.4). Механічні хвилі в досліджуваному тілі 2, викликані джерелом 1, перетворюються в електричні сигнали первинним перетворювачем 3. Електричні сигнали піддаються підсиленню, обробці і реєстрації електронною апаратурою 4.

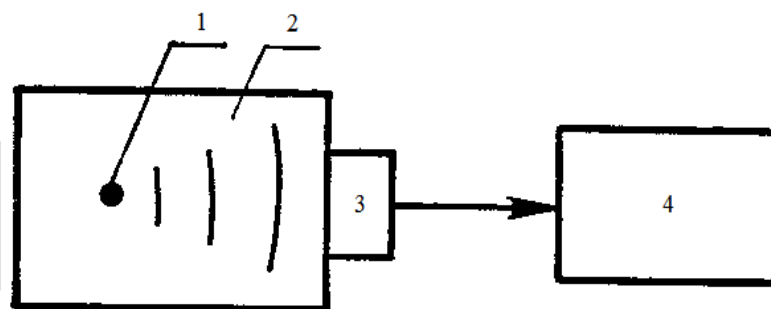


Рисунок 1.4 – Схема вимірювань параметрів АЕ

Дисперсія хвильового руху в твердому тілі призводить до спотворення форми вихідного механічного імпульсу, що надходить від джерела емісії. Приймемо, наприклад, що дія джерела характеризується в часі прямокутним імпульсом зміщення (рис. 1.5, а).

Обмеженість розмірів досліджуваного тіла призводить до відбивання хвиль від його поверхонь, трансформації типів хвиль і інших явищ. В результаті переміщення точки поверхні в найпростішому випадку буде носити характер згасаючих коливань (рис. 1.5, б)

### 1.5 Висновки

Результати фізичних досліджень акустичних хвиль, пов'язаних з деформацією матеріалів, показують, що на основі цього явища можна створити ефективні методи неруйнівного діагностичного контролю стану матеріалів для оцінки небезпеки ситуації, що виникла і близькості моменту відмови (руйнування). Подібні передумови вже знайшли конкретне втілення в апаратурі і методах діагностики матеріалів конструкцій.

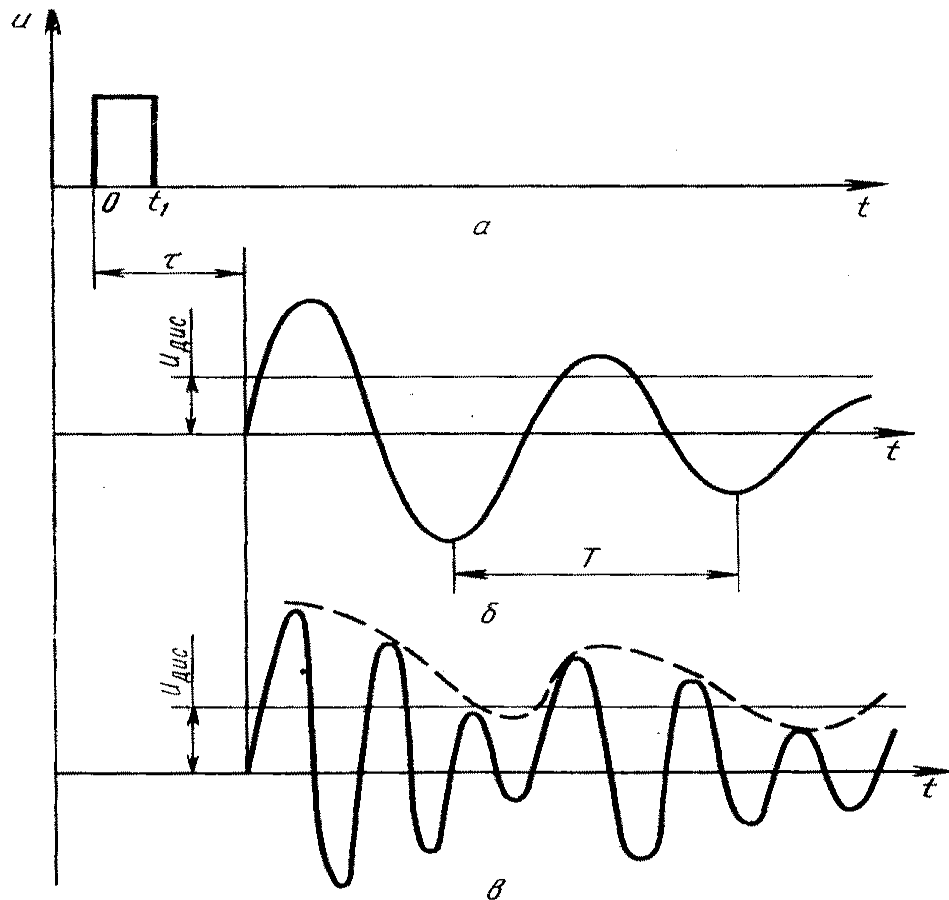


Рисунок 1.5 – Характер імпульсу АЕ, що надходить від джерела у вигляді: а) прямокутника; б) згасаючих коливань; в) радіоімпульса

СММД

## 2 ЗАЛЕЖНІСТЬ СИГНАЛОВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

### ВІД ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ

#### 2.1 Загальне формулювання задачі

Наявність зв'язків між параметрами джерел АЕ і характеристиками породжуваних ними сигналів є основою для використання АЕ при неруйнівних випробуваннях матеріалів і виробів. Встановити ці зв'язки можна чисто експериментальним шляхом. Однак такий підхід має істотні недоліки. Не маючи апріорних даних про характер і параметри сигналів, важко відповісти на питання про принципи побудови вимірювальної апаратури і необхідної її чутливості, про вид та число вимірюваних параметрів, раціональну методику вимірювань і т. ін. [7].

Тому паралельно з експериментальними дослідженнями певна увага постійно приділяється розробці теоретичних основ явища і встановленню теоретичних залежностей між параметрами джерел АЕ (параметрами дефектів структури матеріалу) і народжуваних ними хвиль напружень. Висвітливо загальний підхід до даної задачі. Середовище, в якому відбувається випромінювання, можна розглядати як пружне, так як при неруйнівних випробуваннях часто мова йде про виявлення й оцінку параметрів локальних дефектів, коли інша частина матеріалу працює в умовах пружних деформацій. Ці умови зберігаються і при випромінюванні АЕ внаслідок малих амплітуд сигналів. Крім того, АЕ зазвичай являє собою хвилі розвантаження, які відбувається в основному пружно навіть в пластично працюючому матеріалі. Далі, більшості машинобудівних конструкційних матеріалів можна приписати властивості лінійності і ізотропності [8, 9]. При цих припущеннях, з урахуванням малості деформацій, що виникають при АЕ, поширення хвиль напружень в конструкції описується відомими рівняннями лінійної теорії пружності. Система основних рівнянь в декартових координатах має вигляд:

а) рівняння руху (без урахування масових сил)

$$\sigma_{ik,k} = g\ddot{U}_i, \quad (2.1)$$

при цьому на поверхні мають місце співвідношення (умови на поверхні)

$$\sigma_{i\nu} = \sigma_{ik}\sigma_{k\nu}; \quad (2.2)$$

б) зв'язок деформацій і переміщень (рівняння Коші)

$$\varepsilon_{ik} = 0,5(u_{i,k} + u_{k,i}) \quad (2.3)$$

в) зв'язок напружень і деформацій (закон Гука)

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_{ik} + \frac{\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{pp} \delta_i^k \right), \quad (2.4)$$

де  $\sigma_{ik}$  - компоненти тензора напружень;

$u_i$  - компоненти вектора переміщень точок тіла;

$\varepsilon_{ik}$  - компоненти тензора малих деформацій;

$\sigma_{i\nu}$  - складники зовнішнього навантаження, віднесеної до одиниці (площі) на майданчику з зовнішньою нормаллю  $\nu$ ;

$\sigma_{k\nu}$  - напрямні косинуси цього майданчика;

$\delta_i^k$  - символ Кронекера;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

Для скорочення записів використана тензорна символіка, зокрема, умови підсумовування за «німими» індексами, умовне позначення операції диференціювання по координаті (кома). Індокси приймають значення 1, 2, 3. Точкою позначено диференціювання за часом.

Позаяк первинні приймальні перетворювачі АЕ за принципом дії є або віброметрами, або велосиметрами, або акселерометрами, то завдання полягає в знаходженні просторово-часового розподілу переміщень, швидкостей, або прискорень точок тіла, що лежать на його поверхні під перетворювачем, і зводиться, таким чином, до знаходження поля переміщень. У зв'язку з цим рівнянням руху зручно надати форму рівнянь Ляме. Для цього необхідно за допомогою рівнянь (2.3) виразити в рівняннях (2.4) напруги через переміщення, а отримані результати використовувати в рівняннях (2.1).

$$u_{i,kk} + \frac{1}{1-2\mu} u_{p,ip} = \frac{2(1+\mu)}{E} \rho \ddot{u}_i. \quad (2.5)$$

Джерело АЕ фізично становить невелику частину матеріалу, в якій відбувається динамічна перебудова структури. Математична модель джерела являє локальний обсяг (або систему обсягів для сукупності одночасно діючих джерел), на поверхні якого розвиваються деякі переміщення або напруги. Вважаючи цю поверхню внутрішньою поверхнею тіла і вважаючи кінематичні або силові умови на ній відомими, приходимо до прямої динамічної задачі теорії пружності - за заданими на поверхні тіла граничним умовам визначаємо переміщення.

Рівняння (2.5) спільно з умовами на поверхні дозволяють вирішити задачу в переміщеннях. Крім граничних умов слід врахувати також початкові умови, які полягають в заданні проєкцій вектора переміщень  $u_k^0$  і вектора

швидкості точок тіла  $i_k^0$  в деякий момент часу  $t_0$ , з якого починають вивчення задачі. Іншими словами, інтеграли системи (2.5) повинні задовольняти як граничним, так і початковим умовам

В реальних умовах розв'язання задачі ускладнюється через низку причин. По-перше, перехід до математичної моделі передбачає значну ідеалізацію властивостей фізичного джерела АЕ для спрощення з метою можливості вирішити задачу.

Наприклад, для часткового, але важливого практично випадку розвитку тріщини в тонкій пластині поле статичних напружень в околі вершини тріщини визначається залежностями [12]:

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_i f_{ik}(\theta); \quad \sigma_{i3} = 0, \quad (2.6)$$

де  $r, \theta$  - полярні координати;

$f_{ik}(\theta)$  - безрозмірні функції кута;

$\theta; K_i$  - коефіцієнти інтенсивності напружень.

Розвиток (збільшення довжини) тріщини відбувається, коли напруги досягають значень, при яких стають критичними. Так як тріщина, що розвивається, випромінює хвилі напружень, то розподіл напружень в її околиці змінюється в порівнянні зі статичним випадком, описуваним залежністю (2.6).

Звідси випливає, що загальний розв'язок сформульованої задачі сучасними аналітичними методами неможливий через непереборні математичні труднощі. Воно виявляється можливим лише для простих окремих випадків за умови введення додаткових спрощуючих гіпотез.

## 2.2 Деякі емпіричні залежності

Труднощі аналітичного рішення задачі про випромінювання механічних хвиль, що розвиваються дефектом структури матеріалу привели до спроб побудувати різного роду емпіричні і напівемпіричні залежності, що зв'язують параметри АЕ і дефекту. В основу цих залежностей лягли або деякі фізичні міркування, не підкріплені детальним аналізом механізмів народження хвиль, або проста апроксимація отриманих експериментальних залежностей. У деяких випадках на матеріалі експериментів прийняті спрощуючі гіпотези з метою подальшої побудови таких залежностей.

АЕ або сумарна АЕ повинні визначатися щільністю рухливих дислокацій  $N_i$ , швидкістю її зміни  $\partial N_i / \partial t$ , а також швидкістю зміни загальної щільності дислокацій  $\partial N_{\text{общ}} / \partial t$ .

Можна припустити, що залежність сумарної автоматичної експозиції повинна мати вигляд деякої функції зазначених параметрів:

$$N = N \left( N_m, \frac{\partial N_m}{\partial t}, \frac{\partial N_{\text{общ}}}{\partial t} \right) \quad (2.7)$$

Однак до сих пір подібної залежності не встановлено. Запропоновано такі окремі випадки, що описують залежність інтенсивності АЕ від параметрів дислокацій [8 - 10]:

$$\dot{N} = c_1 N_m, \quad (2.8)$$

$$\dot{N} = c_2 \frac{dN_{\text{общ}}}{dt}; \quad (2.9)$$

$$\dot{N} = c_3 \frac{dN_m}{dt}, \quad (2.10)$$



де  $c_1, c_2, c_3$  - коефіцієнти пропорційності.

Згідно з іншими поглядами, інтенсивність АЕ повинна бути пропорційна числу діючих джерел дислокацій [10].

Встановленням таких зв'язків займається мікродінамічна теорія пластичності, що розвивається останнім часом [9,10]. На сучасному рівні вона дозволяє зв'язати щільність рухливих дислокацій з пластичною деформацією:

$$N_m = M\varepsilon_p \exp(-\Phi\varepsilon_p) \quad (2.11)$$

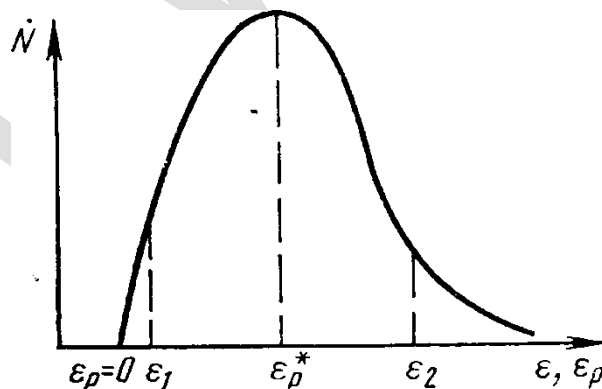
де  $M, \Phi$  - деякі константи матеріалу;

$\varepsilon_p$  - пластична деформація при одноосьовому розтягуванні зразка.

Відповідно до залежності(2.8)

$$\dot{N} = cM\varepsilon_p \exp(-\Phi\varepsilon_p). \quad (2.12)$$

Згідно залежності (2.12) максимум інтенсивності АЕ розвивається при деформації  $\varepsilon_p = \varepsilon_p^* = \frac{1}{\Phi}$ , що й показано на рис. 2.1.



## Рисунок 2.1 – Залежність інтенсивності АЕ від деформації

З урахуванням раніше прийнятої гіпотези

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt} = c \frac{dV_D}{dt}, \quad (2.13)$$

де  $c$  - коефіцієнт пропорційності.

Інтегрування дає для сумарної АЕ

$$N = aK_1^4, \quad (2.14)$$

де  $a = cB$  - константа матеріалу.

Для тонкої пластини, що має тріщину довжиною  $2l$  і розтягується на нескінченності напруженнями  $\sigma_0$  коефіцієнт інтенсивності напружень:

$$K_1 = \sigma_0 \sqrt{\pi l} \quad (2.15)$$

Після підстановки цього значення в формулу (2.14), отримаємо:

$$N = a\sigma_0^4 \pi^2 l^2. \quad (2.16)$$

Таким чином, при заданому  $\sigma_0$  сумарна АЕ пропорційна квадрату довжини тріщини. Аналогічно можна отримати залежності сумарної АЕ від навантаження і довжини тріщини для зразків інших геометричних форм, використовуючи відповідні вирази для коефіцієнта інтенсивності напружень [11].

Експериментальна перевірка виразу (2.14) показує, що воно задовільно апроксимує результати експериментів, однак показник ступеня відрізняється від 4. У зв'язку з цим запропонована емпірична залежність

$$N = aK_1^m, \quad (2.17)$$

де для різних матеріалів  $m$  знаходиться в діапазоні від 4,6 до 11,9.

Герберіц і Хартбауер [12], досліджуючи субкритичний стрибкоподібний розвиток тріщини, знайшли, що результати експериментів добре апроксимуються емпіричною залежністю

$$\Delta F = \frac{cE}{K_1^2} (\sum A)^2, \quad (2.18)$$

де  $\Delta F$  - збільшення поверхні тріщини в процесі її стрибкоподібного розвитку;

$A$  - амплітуда сигналу АЕ при стрибку тріщини (підсумовування виконують по всіх стрибках, що мали місце).

## **2.3 Наближена модель тріщини нормального відриву як випромінювача АЕ**

### **2.3.1 Наближена модель тріщини**

Найбільш дослідженою областю застосування АЕ при випробуваннях конструкцій є виявлення тріщин і оцінка їх параметрів. Пояснюється це, з одного боку, особливою небезпекою тріщин для міцності конструкцій, з

іншого - достатню потужність сигналів АЕ, що випромінюються тріщинами, що дозволяє впевнено виділяти ці сигнали на тлі виробничих перешкод.

У зв'язку з труднощами аналітичного рішення дещо спростимо задачу. З огляду на поширеність тонкостінних конструкцій задачу будемо вирішувати стосовно до плоского напруженого стану. Об'єкт випробувань представимо у вигляді плоскої пластини обмежених розмірів. Вона навантажена однорідною розтягуючою напругою  $\sigma$  вздовж однієї з осей. В деякий момент часу, прийнятий за початковий, в пластині виникає тріщина нормального розриву постійної довжини або ж довжина цього розриву змінюється в часі. Площина розриву нормальна до серединної поверхні пластини. Геометричні умови задачі показані на рис. 2.2. Предметом дослідження є поле виникаючих динамічних переміщень.

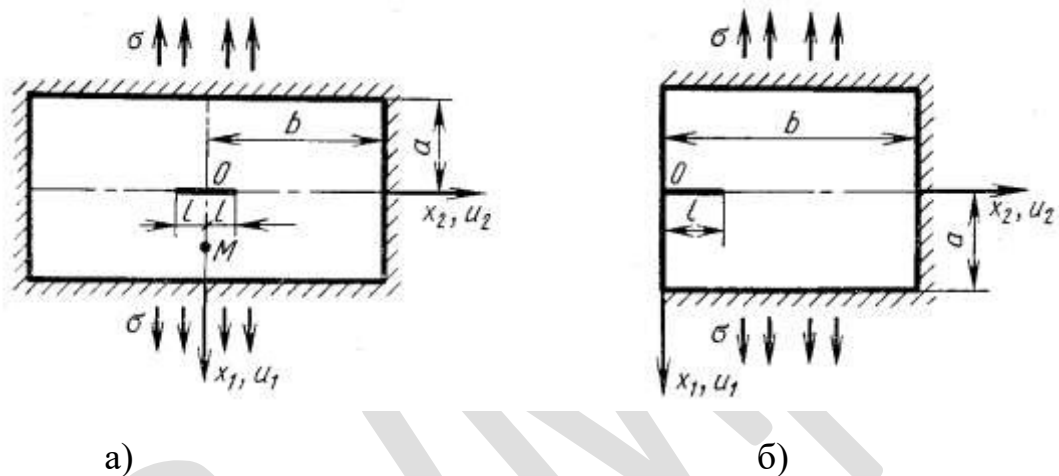


Рисунок 2.2 – Геометричні умови задачі

Утворення розриву пов'язане з миттєвим падінням напруги до нуля на «берегах» тріщини. З огляду на те, що задача розглядається в лінійній постановці, можна використовувати принцип суперпозиції напружено-деформованого стану. Задачу поширення хвиль розвантаження замінимо дзеркально симетричною задачею поширення хвиль навантаження. Рівняння (2.5) можна записати у вигляді

$$\frac{\rho(1-\mu^2)}{E} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1 \partial x_2};$$

(2.19)

$$\frac{\rho(1-\mu^2)}{E} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_2}.$$

Граничні і початкові умови:

а) для центральної тріщини (рис. 7, а)

$$u_1 = u_2 = \dot{u}_1 = \dot{u}_2 = 0 \text{ при } t = 0;$$

$$u_1 = 0 \text{ при } x_1 = 0, |x_2| \geq l(t);$$

$$\sigma_{11} = \sigma \text{ при } x_1 = 0, |x_2| \geq l(t);$$

(2.20)

$$\sigma_{12} = \sigma \text{ при } x_1 = 0, |x_2| \leq b;$$

б) для крайової тріщини (рис. 7, б)

$$u_1 = u_2 = \dot{u}_1 = \dot{u}_2 = 0 \text{ при } t = 0;$$

$$u_1 = 0 \text{ при } x_1 = 0, l(t) \leq x_2 \leq b;$$

$$\sigma_{11} = \sigma \text{ при } x_1 = 0, 0 \leq x_2 \leq l(t);$$

(2.21)

$$\sigma_{12} = \sigma \text{ при } x_1 = 0, 0 \leq x_2 \leq b,$$

де  $l(t)$  - довжина (напівдовжина) тріщини.

Крім того, на контурі пластини повинні виконуватися кінематичні і силові умови, відповідні схемі закріплення і навантаження пластини. В результаті рішення необхідно визначити три функції  $u_i(x_1, x_2, t)$  і швидкість руху вершини розриву  $\dot{l}(t)$ . При цьому переміщення  $u_3$  пов'язані з  $u_1$  і  $u_2$  співвідношенням

$$u_3(x_1, x_2, t) = -\frac{\mu h}{2(1-\mu)} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right), \quad (2.22)$$

що впливає з гіпотези плоского напруженого стану (в даному випадку розраховуємо нульову симетричну моду хвилі Лемба).

Для визначення функцій  $i(I)$  необхідно, як вже зазначено, ввести додаткові співвідношення, що характеризують умови розвитку тріщини. Ці умови виражаються критеріями руйнування матеріалу [12]. Зокрема, можна використовувати критерій руйнування, введений Ірвіном,

$$K_I \geq K_{Ic}, \quad (2.23)$$

де  $K_I$  - коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини;

$K_{Ic}$  - його критичне значення.

### 2.3.2 Миттєвий розрив постійної довжини (центральна тріщина)

Розрахунки показують, що початковий етап розкриття тріщини добре описується лінійним співвідношенням

$$\sigma = \rho c_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} = \rho c_1 S, \quad (2.24)$$

де  $S$  - крутизна переднього фронту (швидкість розкриття).

Потім поверхня тріщини починає здійснювати коливання зі спадаючою в часі амплітудою біля рівноважного положення, що відповідає статичному навантаженню.

Чисельне рішення ускладнює дослідження зв'язку параметрів хвильового поля з параметрами вихідного збурення. Однак аналіз чисельного рішення дозволяє, ґрунтуючись на довгохвильовому наближенні,

запропонувати кінематичну модель тріщини як випромінювача пружних коливань.

Співвідношення (2.24) дозволяє в такий спосіб сформулювати граничні умови задачі (початкові умови - нульові):

$$u_1 = u_1^0 \text{ при } |x_2| \leq l, x_1 = 0; \quad (2.25)$$

$$u_2 = 0 \text{ при } |x_2| > l, x_1 = 0;$$

і в силу симетрії (якщо вважати пластину досить протяжною):

$$\sigma_{12} = 0 \text{ при } |x_2| < \infty, x_1 = 0; \quad (2.26)$$

### 2.3.3 Центральна тріщина, що розвивається

Форма розкриття тріщини, що рухається, як показують результати чисельного рішення, близька до еліптичної. При цьому швидкість розкриття визначається швидкістю руху вершини таким чином, що в кожен момент часу розкриття близьке до статичного, який визначається миттєвою довжиною тріщини.

Реальний розвиток тріщини відбувається переривчасто шляхом окремих одиничних стрибків. Для цілей оцінок можна характеризувати окремий стрибок тріщини тривалістю  $T$  і середньою (постійною) швидкістю  $\mathcal{G}$ . Тоді поточне розкриття

$$u_1^0(t) = \frac{2\sigma}{\rho c_1^2} \sqrt{l^2(t) - x_2^2} \text{ при } 0 \leq t \leq T; \quad (2.27)$$

$$u_1^0(t) = \frac{2\sigma}{\rho c_1^2} \sqrt{l^2(T) - x_2^2} \text{ при } t > T.$$

Для постійної (середньої) швидкості стрибка тріщини  $l = \frac{gT}{2}$ .

Залежність (2.27) добре виконується при малій (в порівнянні з граничною) швидкості руху тріщини або при скачках малої довжини.

## 2.4 Визначення координат джерел АЕ

### 2.4.1 Методи визначення координат

Знання координат джерел АЕ має велике практичне значення, оскільки джерелами є дефекти структури матеріалу. Зазвичай вважають, що поняття «координати джерела АЕ» і «координати дефекту еквівалентні. Однак дефекти можуть мати певну просторову конфігурацію і характеризуватися деяким геометричним місцем точок. Тому поняття «координати дефекту» не має сенсу без вказівки того, яка характерна точка дефекту при цьому розглядається. Розрахунок координат джерела АЕ за допомогою описаних далі прийомів теоретично (без урахування похибок вимірювання і прийнятих спрощень) дає точку в матеріалі конструкції, в малій околиці якої в даний момент розвивається дефект. Приймавши ці координати за координати дефекту, можна говорити про еквівалентність цих двох понять. В подальшому викладі поняття «координат дефекту» використано саме в даному сенсі. Наприклад, під координатами тріщини розуміють координати її вершини, що випромінює імпульси АЕ при розвитку тріщини.

Визначення координат дефектів за допомогою АЕ засноване на принципах пасивної радіолокації (звукоізоляції). Дефект, що розвивається випромінює в навколишній матеріал імпульси АЕ, вимірювання параметрів



яких за допомогою декількох рознесених перетворювачів дозволяє визначити місце розташування джерела. Інформація про це міститься в амплітуді прийнятих сигналів (чим ближче дефект до перетворювача, тим більше амплітуда сигналу) і час їх прийому. Амплітудна локація об'єктів поки мало розроблена. Однак інформацію про амплітуди все частіше використовують, але для вирішення допоміжних питань (селекції сигналів, грубої оцінки зони дефекту і ін.). Найбільше застосування знайшли тимчасові методи локації, в яких використовують залежність часу приходу сигналу на рознесені приймачі від координат джерела.

Так як в переважній більшості конструкцій товщина використовуваних матеріалів значно менше їх інших лінійних розмірів, а абсолютні похибки визначення координат дефектів за допомогою АЕ порівнянні зі значеннями товщини, то зазвичай завдання локації ставлять як двовимірну, тобто цікавляться координатами проекції джерела АЕ на серединну або зовнішню поверхню стінки конструкції.

#### 2.4.2. Деякі методичні похибки визначення координат

Можливість визначити координати дефектів за допомогою обмеженого числа перетворювачів, стаціонарно розташованих на великогабаритних об'єктах, є одним з основних переваг методів неруйнівних випробувань на основі АЕ. У зв'язку з цим більш докладно проаналізуємо деякі питання, пов'язані з раціональною методикою вимірювань.

Перш за все, розглянемо деякі методичні похибки визначення координат. Їх можна розділити на наступні основні групи:

- пов'язані з непрямим характером визначення координат;
- пов'язані з особливостями використовуваного фізичного явища (АЕ) і обробки сигналів апаратурою;
- пов'язані з відмінністю реального об'єкта випробувань від прийнятої його схеми (відмінністю реальних шляхів поширення сигналів АЕ від

теоретично прийнятих внаслідок кривизни елементів конструкції, відбивання сигналів і т. п., відмінністю прийнятої швидкості поширення сигналів від фактичної та ін.).

Зупинимося на першій групі похибок.

Проаналізувати похибки вимірювання координат дефектів і вплив на їх числове значення місць розміщення перетворювачів за отриманими раніше рівняннях важко через їх складності.

Друга група методичних похибок обумовлена особливостями сигналів АЕ, викликаних реальними дефектами, і принципами побудови вимірювальної апаратури. У розглянутих методах визначення координат передбачається, що сигнали АЕ представляють собою серію послідовних, помітних в часі імпульсів. Але такими в основному є тільки імпульси дискретної АЕ (АЕ безперервного типу може бути сприйнята як серія окремих імпульсів тільки в окремих випадках і при спеціально підібраному рівні дискретизації).

Причиною отримання помилкових координат може з'явитися фіксація в різних каналах сигналів, що породжуються різними типами хвиль. Реальні джерела АЕ випромінюють, як правило, хвилі декількох типів, до яких чутливі перетворювачі, що застосовуються. Різні швидкості поширення цих хвиль можуть призвести до того, що в оброблюваній серії виявляться сигнали від хвиль різних типів.

Ще одним джерелом отримання помилкових координат може бути затухання сигналів АЕ. При роботі на більш високих частотах затухання значне, тому можлива ситуація, коли сигнали буде реєструвати найближчий до джерела перетворювач, і не будуть реєструвати один або два віддалених. В цьому випадку апаратура також обробляє сигнали, що надходять від різних джерел.

Помилкові координати отримують і при обробці в локаційній серії крім корисних сигналів і сигнали, викликані сторонніми шумами (перешкодами)

при неоднаковому рівні дискретизації сигналів по каналах і неоднаковій чутливості каналів.

Отримання помилкових координат призводить до грубих похибок вимірювань. Априорний аналіз ймовірності таких помилок складний через складний характер АЕ і залежність його від великого числа факторів. Наприклад, ймовірність отримати помилкові координати через пропуски початку серії і тимчасового накладення серій визначається інтенсивністю АЕ і збільшується зі зростанням останньої. Інтенсивність же залежить від типу матеріалу, його термообробки, характеру і закону навантаження, прийнятого рівня дискретизації сигналів і багатьох інших факторів. Разом з тим велика кількість причин отримання помилкових координат дозволяє припустити його високу ймовірність [11].

Шляхи селекції хибних сигналів пов'язані з відповідними причинами їх появи - застосовують перетворювачі, чутливі тільки до одного типу хвиль, встановлюють однакову чутливість каналів, раціональним вибором частотного діапазону виключають сигнали від сторонніх шумів і т. п. В реальних умовах часто ефективно допомагає виключити сигнали, породжувані сторонніми шумами, застосування часової селекції. При досить поширеному на практиці циклічному навантаженні частина сторонніх механічних шумів групується всередині кожного циклу навантаження на ділянці, де корисні сигнали АЕ або взагалі відсутні, або число їх дуже мале. В цьому випадку потрапляння вказаних шумів в апаратуру можна виключити простим замиканням вхідних каналів на відповідних ділянках циклів навантаження (тимчасове стробування).

Певною ознакою помилкових джерел є хаотичність їх розташування. Оскільки дефекти, які становлять небезпеку для міцності конструкції, розвиваються, як правило, значний час, кожен дефект характеризується сукупністю істинних джерел, що локалізуються в зоні його розвитку. Ця

ознака також можна використовувати для селекції джерел. При візуальному спостереженні результатів триангуляційних розрахунків найімовірнішим розташуванням дефектів відповідають місця скупчення джерел. При апаратурній селекції за цим принципом в розрахунках беруть до уваги тільки імпульси, що дають приблизно однакову сукупність часових затримок.

Необхідність забезпечення певного рівня дискретизації сигналів (боротьба з власними шумами апаратури, сторонніми шумами і т. п.) призводить до появи абсолютної похибки вимірювання часу приходу сигналу. Якщо  $t_1$  - справжній час приходу сигналу АЕ до першого перетворювача, то визначений апаратурою час приходу в цьому каналі складе  $t_1 + \frac{u_{disc}}{s_1}$ , де  $u_{disc}$  - встановлений рівень дискретизації;  $s_1$  - крутизна переднього фронту сигналу. У другому каналі аналогічний час складе  $t_2 + \frac{u_{disc}}{s_2}$  (в припущенні однакового рівня дискретизації). Тоді похибка визначення тимчасової затримки

$$\Delta\tau_1 = u_{disc} \left( \frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} \right). \quad (2.28)$$

При  $s_1 = s_2$ , похибка  $\Delta\tau_1 = 0$ . Однак, використовувані високочастотні складові сигналів АЕ піддаються істотному ослабленню і дисперсії. У зв'язку з цим крутизна переднього фронту буде зменшуватися в міру віддалення перетворювача, так що  $s_1 \neq s_2$  і  $\Delta\tau_1 \neq 0$ . Очевидно, що  $\Delta\tau_1$  залежить від ступеня спотворення крутизни фронту і самої крутизни [13].

Третя із зазначених на початку розділу група методичних похибок визначення координат може бути проаналізована тільки стосовно до конкретного об'єкта випробувань.

Теоретичний розгляд зв'язків параметрів АЕ і дефектів, що розвиваються, дозволяє ефективно вирішувати багато практично важливих питань неруйнівних випробувань матеріалів і виробів на основі явища АЕ. Однак до теперішнього часу досягнуті в цьому напрямку результати незначні, що пояснюється складністю процесів зародження і розвитку дефектів, а також поширення хвиль напружень в конструкційних матеріалах і виробках. Побудова математичних моделей джерел АЕ, виявлення особливостей хвильових процесів в тілах кінцевих розмірів є актуальним завданням [14].

## **2.5 Висновки**

Труднощі аналітичного вирішення задачі про випромінювання механічних хвиль дефектом структури матеріалу, що розвивається, привели до спроб побудувати різного роду емпіричних і напівемпіричних залежностей, що зв'язують параметри АЕ і дефекту. В основу цих залежностей лягли або деякі фізичні міркування, не підкріплені детальним аналізом механізмів народження хвиль, або проста апроксимація отриманих експериментальних залежностей. У деяких випадках на матеріалі експериментів прийняті спрощуючі гіпотези з метою подальшої побудови таких залежностей.

СММД

### 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

#### 3.1 Прилади й обладнання для аналізу імпульсів акустичної емісії в підшипниках кочення

Дослідження проводилися в лабораторії кафедри комп'ютерної механіки ім. В. Марцинковського на обладнанні і апаратурі, що є в наявності.



Рисунок 3.1 – Обладнання, на якому проводилися дослідження

1. Осцилограф.
2. Аналізатор сигналів акустичної емісії.
3. Підсилювачі.

4. Стенд для діагностування підшипників кочення.
5. Датчики віброприскорення і акустичної емісії.
6. Підшипники кочення з різними дефектами.

### **3.2 Особливості та опис аналізатора імпульсів акустичної емісії 4429**

#### **3.2.1 Особливості аналізатора 4429**

Аналізатор 4429 має:

- три режими роботи;
- режим, який базується на застосуванні вагової функції, забезпечує пропорційне енергії імпульсів акустичної емісії показання цифрових індикаторів;
- режим локалізації джерел акустичної емісії в одно-, дво- і тривимірному просторі;
- режим багатоканальної системи з чотирма незалежними один від одного каналами;
- електронні лічильники і цифрові індикатори в окремих каналах;
- загальний цифровий індикатор, який показує кумулятивні сумарні значення;
- індикацію частоти повторення імпульсів акустичної емісії;
- дискретно-налаштовуваний (в межах 0.1 - 10000 с) часовий інтервал при визначенні частоти повторення імпульсів акустичної емісії.

Застосування аналізатора 4429:

- аналіз і реєстрація акустичної емісії в лабораторних і виробничих умовах;
- визначення і локалізація джерел акустичної емісії;
- автоматичний контроль акустичної емісії.



Аналізатор імпульсів акустичної емісії 4429 є універсальним приладом, в якому поєднуються ряд властивостей і можливостей, які відповідають вимогам широкої області вимірювання, аналізу та реєстрації сигналів акустичної емісії.

Акустична емісія зустрічається у більшості матеріалів, що піддаються механічним зусиллям, тобто там, де відбувається деформація і порушення молекулярної будови матеріалу. Короткочасні імпульсні хвилі, які генеруються в місці порушення матеріалу, поширюються в конструкцію, яку піддають механічним навантаженням, і на її поверхні можуть виявлятися відповідною апаратурою.

Інтенсивність акустичної емісії швидко зростає саме в ранній стадії руйнування матеріалів. Отже, дефектоскопія, яка ґрунтується на акустичній емісії є цінним діагностичним і дефектоскопічним методом, який знаходить все більш широке застосування в промисловості. Цей метод, що не потребує руйнування випробовуваних об'єктів, ефективно розширює область промислової дефектоскопії і випробувань без руйнування і доповнює методи рентгенодефектоскопії і ультразвукової дефектоскопії.

Імпульсного характеру акустичної емісії відповідає занадто широкий частотний спектр відповідних сигналів. Однак, практичним при вимірюванні, аналізі та реєстрації акустичної емісії вважається частотний діапазон від 100 кГц до 1 МГц. Амплітуди імпульсів акустичної емісії занадто малі, так що напруга сигналів з датчиків знаходиться в діапазоні від 10 мкВ до 1 мВ.

Аналізатор 4429, який базується на унікальному методі аналізу і оцінки акустичної емісії, забезпечує високий ступінь пропорційності між сигналами акустичної емісії, що сприймаються на поверхні об'єктів, і показанням цифрових індикаторів. Високий ступінь пропорційності і його забезпечення є

основними вимогами до апаратури, результати з якої використовуються при вирішенні практичних завдань і проблем.

Аналізатор 4429 розрахований на спільну роботу з максимально чотирма датчиками, що сполучаються з його чотирма каналами. Окремі канали приладу 4429 можуть працювати в різних режимах, і їх дія визначається режимом роботи аналізатора.

Всі три режими роботи аналізатора 4429 ґрунтуються на вимірі ідентичного параметра, тобто часу перевищення амплітудою сигналів акустичної емісії певних попередньо заданих меж. Для налаштування амплітуди сигналів з датчиків, що надходять на прилад 4429, з урахуванням згаданих вище меж і власного шуму системи передбачений широкосмуговий підсилювач-формував сигналу 2638, коефіцієнт підсилення якого дискретно налаштовується на 1 дБ в діапазоні шириною 60 дБ.

### 3.2.2 Режим «зважування»

У режимі, що ґрунтується на застосуванні вагової функції, всі чотири канали приладу 4429, що використовуються для аналізу, віддаваного одним датчиком сигналу акустичної емісії. Виміру і реєстрації підлягає час перевищення амплітудою аналізованого сигналу чотирьох певних опорних рівнів з відношенням 1, 2, 4 і 8. Цей процес рівносильний множенню (застосування вагової функції) часових інтервалів на різницю між певними опорними рівнями. Результатом описаного вище процесу є значення, пропорційне площі під кривою часового розвитку аналізованого сигналу акустичної емісії. Процес множення амплітуд і часу здійснюють електронні пристрої.

Компаратори налаштовані так, що вони відкривають відповідні вентильні схеми протягом інтервалів часу, протягом яких амплітуда сигналу

акустичної емісії перевищує відповідно 0,25, 0,5, 1 і 2 В. Відкриті вентиляні схеми пропускають на передбачені в окремих каналах приладу 4429 лічильники серії імпульсів з частотами 1, 2, 3 і 4 МГц.

Віддавані з лічильників окремих каналів приладу 4429 результати підрахунку імпульсів показують чотири семизначні цифрових індикатори. Для відображення загального числа імпульсів, тобто суми чисел імпульсів, що відносяться до окремих каналів, передбачений шестизначний цифровий індикатор. Відзначимо, що показання цього індикатора пропорційні сумарній площі під кривою часового розвитку сигналу акустичної емісії.

Діапазон, в якому покази приладу 4429 пропорційні площі під кривою часового розвитку аналізованого сигналу акустичної емісії, на практиці перекриває 20-30 дБ (мал. 3.2).

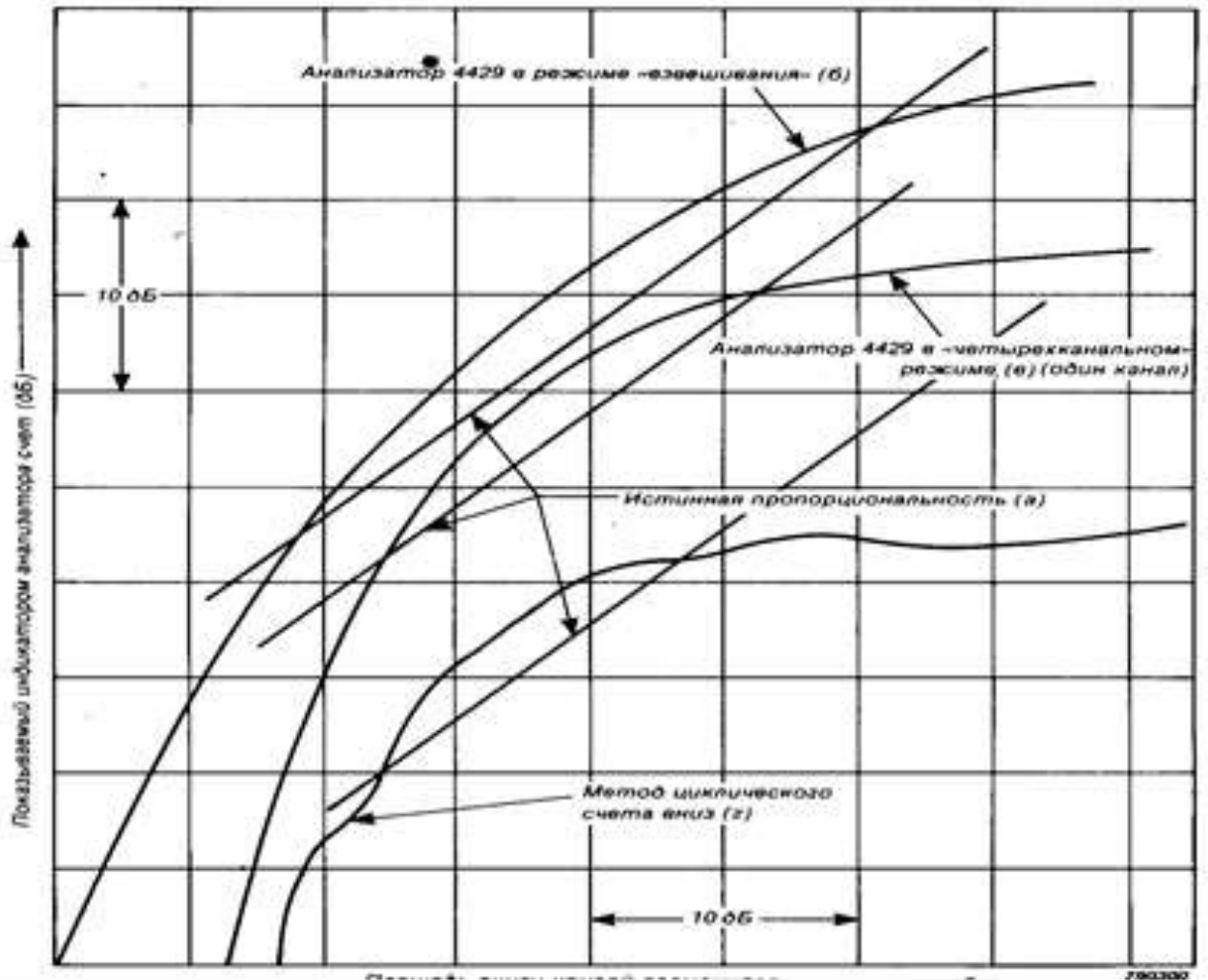


Рисунок 3.2 – Криві, побудовані на підставі типового сигналу акустичної емісії

Прямі (а) на рис. 3.2 є графічним представленням закону прямої пропорційності. Крива (б) побудована на підставі підсумовування імпульсів, що підлягають рахунку в режимі «зважування». Крива (г) відповідає результату, що отримується при застосуванні методу «циклічного рахунку вниз», тобто методу, використовуваного досі в якості основного методу оцінки акустичної емісії. Крива (в) відноситься до отримуваних в окремих каналах результатів, тобто до режиму, в якому прилад 4429 працює в якості чотириканальної системи. Рисунок 3.2 і наведені на ньому криві показують,

що найширший лінійний діапазон виходить при застосуванні аналізатора 4429 в режимі «зважування».

Прилад 4429 дає можливість реєстрації і індикації часової залежності змін амплітуди досліджуваних сигналів акустичної емісії. Передбаченими на передній панелі приладу 4429 кнопками можна визначити інтервал часу, протягом якого відбувається процес рахунку імпульсів і в завершенні якого відповідний цифровий індикатор показує загальне закумульоване число імпульсів. Згаданий інтервал часу може приймати значення 0,1, 1, 10, 100, 1000 і 10000 С. Рахунок, видача результату і повернення в початковий стан є безперервним автоматичним процесом.

### 3.2.3 «Чотириканальний» режим

Аналізатор 4429, що працює в режимі чотирьохканальної системи, зчитує імпульси акустичної емісії, причому метод рахунку аналогічний широко поширеному методу «циклічного рахунку вниз». Метод «циклічного рахунку вниз» ґрунтується на реєстрації одиниці при кожному перевищенні певного порогового рівня, а працюючий в «чотирьохканальному» режимі аналізатор 4429 реєструє час (в мкс), на протязі якого амплітуда сигналу акустичної емісії перевищує визначений для його чотирьох каналів опорний рівень. Хоча ступінь пропорційності між параметрами акустичної емісії і показом цифрових індикаторів приладу 4429 в «чотириканальному» режимі не така висока, як в режимі «зважування», лінійний діапазон все ж ширше діапазону, одержуваного при застосуванні методу «циклічного рахунку вниз». Це ілюструють наведені на рис. 3.2 криві, зокрема крива (в).

Так як в «чотириканальному» режимі використовується лише один загальний опорний рівень, аналізатор 4429 дає можливість одночасного застосування до чотирьох вимірювальних каналів. Відповідні датчики можуть

бути закріплені або в різних точках одного досліджуваного або випробовуваного об'єкта, або на різних об'єктах, які підлягають дослідженню чи випробуванню. Загальний цифровий індикатор, що працює в режимі чотиріканальної системи аналізатора 4429 показує або загальне сумарне значення показань, що належать окремим каналам індикаторів, чи визначену протягом певного інтервалу часу частоту повторення імпульсів акустичної емісії як в режимі «зважування».

#### 3.2.4 Режим «локалізації»

Аналізатор 4429, що працює в режимі «локалізації», дає можливість виявлення і локалізації джерел акустичної емісії. В процесі локалізації визначається обмежена площа, яка містить джерело акустичної емісії. Докладне дослідження і аналіз цієї площі методами ультразвукової та рентгенівської дефектоскопії допомагає при визначенні причини, характеру і ступеня розвитку дефекту.

Закріплені на поверхні досліджуваного або випробовуваного об'єкта чотири датчики з відповідними попередніми підсилювачами і підсилювачами з'єднуються з передбаченими на вході окремих каналів аналізатора 4429 гніздами. Сприйнятий після повернення системи в початковий стан будь-яким з чотирьох датчиком імпульс акустичної емісії сприяє подачі серії імпульсів з частотою повторення 1 МГц на лічильники в інших трьох каналах приладу 4429. Робота згаданих лічильників припиняється в момент сприйняття імпульсу акустичної емісії відповідними датчиками. Отже, відповідні цифрові індикатори приладу 4429 безпосередньо показують відносний час сприйняття (в мкс) імпульсу акустичної емісії окремими датчиками, тобто часові інтервали, що відносяться до трьох датчиків по відношенню до моменту сприйняття імпульсу четвертим датчиком. Взаємні співвідношення часових

інтервалів, що показуються цифровими індикаторами приладу 4429, визначають положення джерела акустичної емісії на поверхні, досліджуваного або випробуваного об'єкта. Відзначимо, що при локалізації джерел акустичної емісії в одновимірному просторі, наприклад, на трубопроводах і т. ін., потрібні лише два датчики.

Електронний блокуючий пристрій запобігає запуск системи затухаючими коливаннями, викликаними попереднім імпульсом акустичної емісії. Це особливо важливо в керованих комп'ютером автоматичних системах, в яких здійснюваний аналізатором 4429 цикл локалізації та повернення в початковий стан зазвичай займає всього кілька мс. Повторний запуск системи після її повернення в початковий стан можливий за умови, що амплітуда сигналу одночасно знаходиться нижче певного опорного рівня в усіх каналах.

Можливість одночасної експлуатації будь-якого числа аналізаторів 4429 в паралельному з'єднанні сприяє створенню комплексних систем для локалізації джерел акустичної емісії в дво- і тривимірному просторі. У таких системах використовується обчислювальний пристрій в якості приймача видаваної приладами 4429 інформації.

### **3.3 Результати дослідження сигналів АЕ в підшипниках кочення**

#### **3.3.1 Опис випробовуваних підшипників**

Дослідженню піддавалися підшипники кочення одного типу чотирьох станів: бездефектний підшипник, з дефектом зовнішньої обойми, з дефектом внутрішньої обойми і з дефектом тіла кочення.

Дослідження проводилися на стенді, що забезпечує режим роботи з частотою обертання  $n = 1480$  об / хв .

Випромінювання імпульсів акустичної емісії, обумовлене недосконалістю поверхні підшипника або дефектом, реєструвалися датчиком акустичної емісії і вібродатчиком, встановленими на зовнішній поверхні випробувальної головки стенду. Часова реалізація сигналу записувалася на ЕОМ через аналого-цифровий перетворювач за допомогою програмного комплексу «WAVE». Ця інформація піддавалася аналізу з метою виявлення характерних діагностичних ознак, притаманних оскільки конкретному дефекту, за допомогою програмного комплексу «MathCAD».

### 3.3.2 Результати досліджень

За допомогою програмного комплексу «MathCAD» були побудовані спектри вібраційного сигналу і сигналу акустичної емісії.

Результати досліджень наведені нижче на рисунках 3.2 – 3.33.

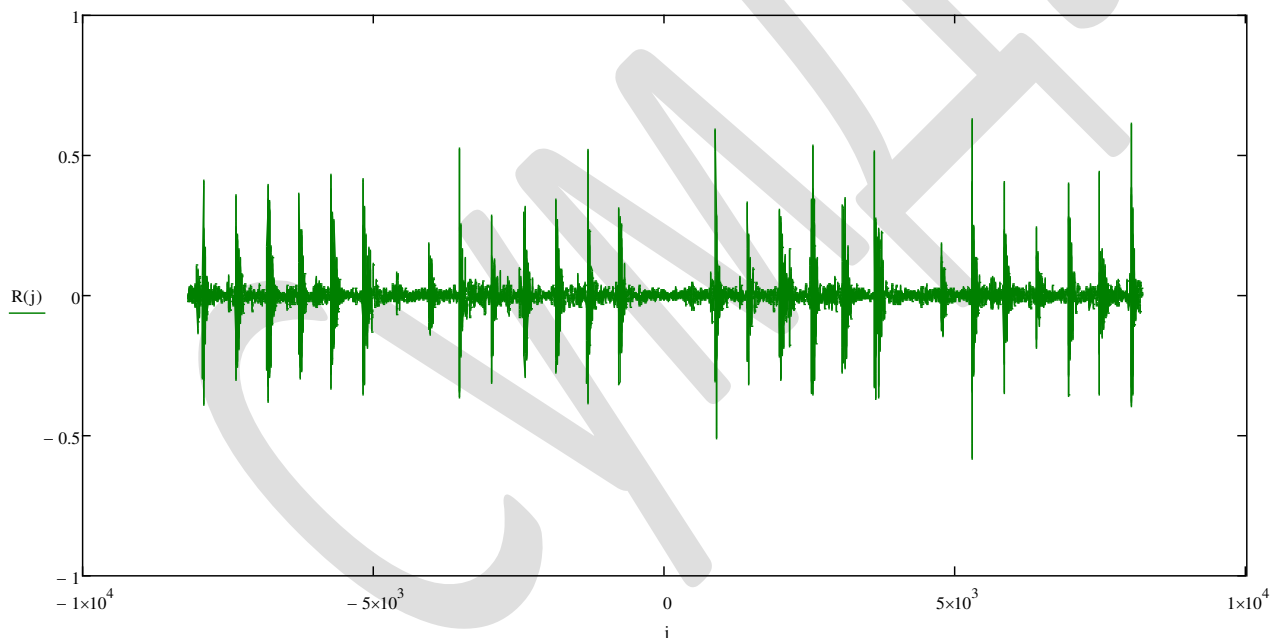


Рисунок 3.2 – Часова форма вібро-сигналу для бездефектного підшипника без наявності дисбалансу



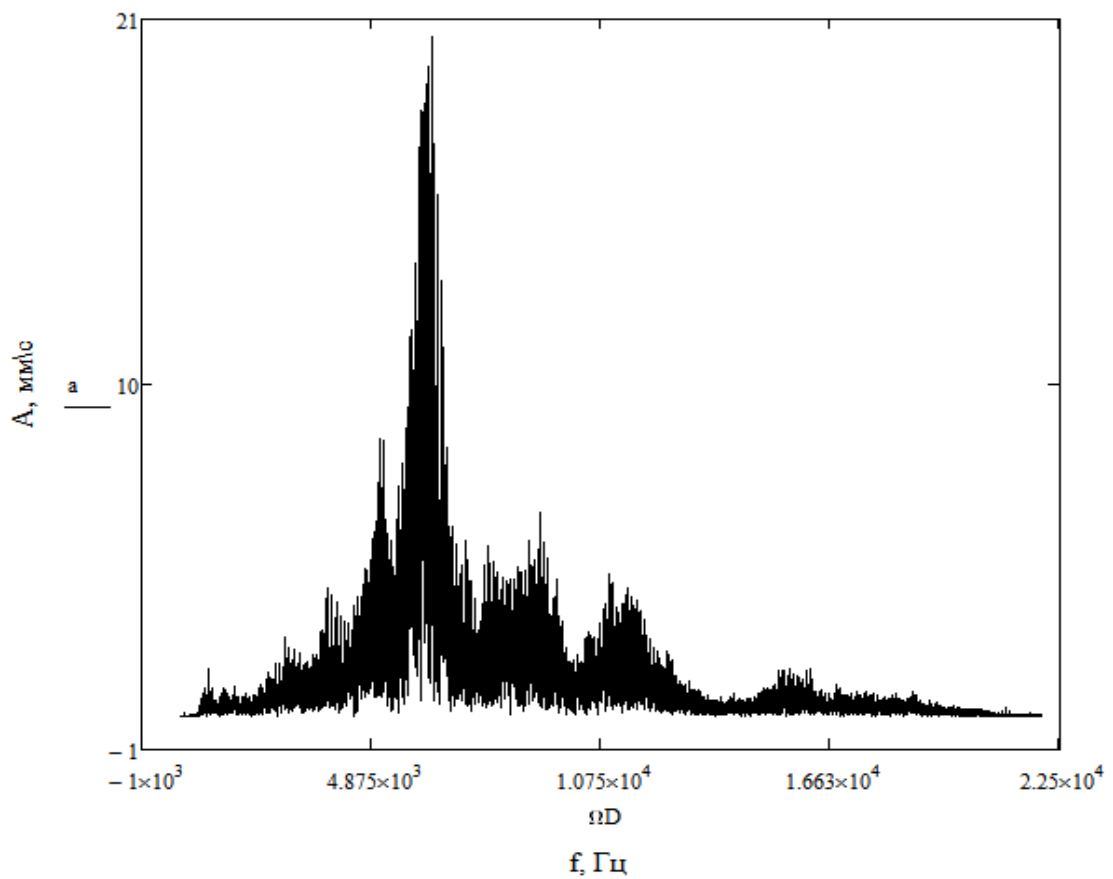


Рисунок 3.3 – Спектр вібрації для бездефектного підшипника без наявності дисбалансу

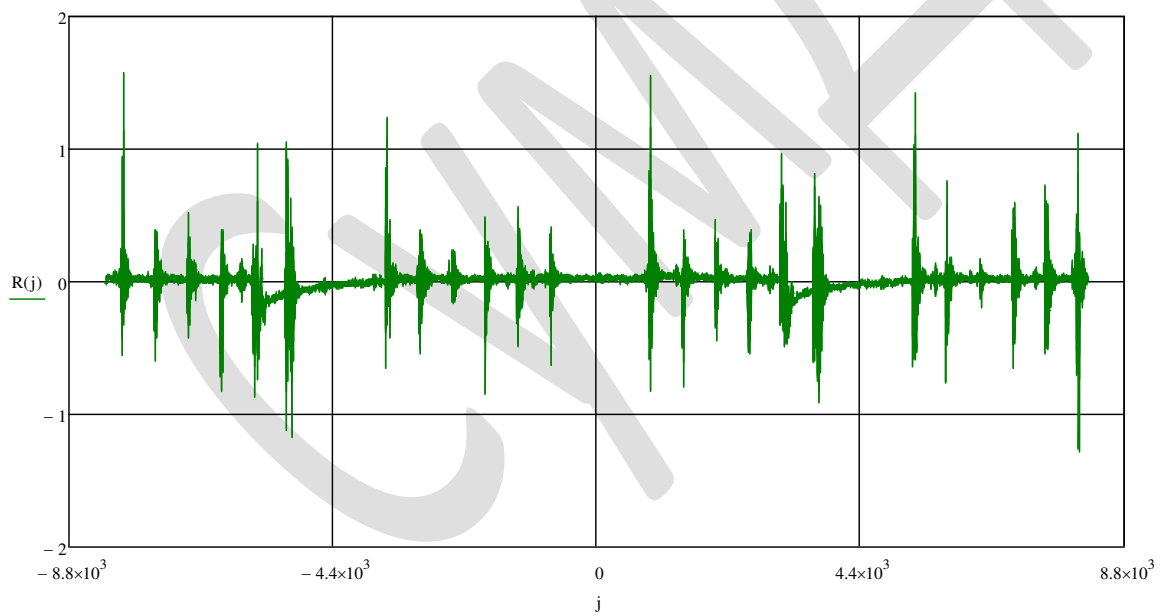


Рисунок 3.4 – Часова форма сигналу акустичної емісії для бездефектного підшипника без наявності дисбалансу

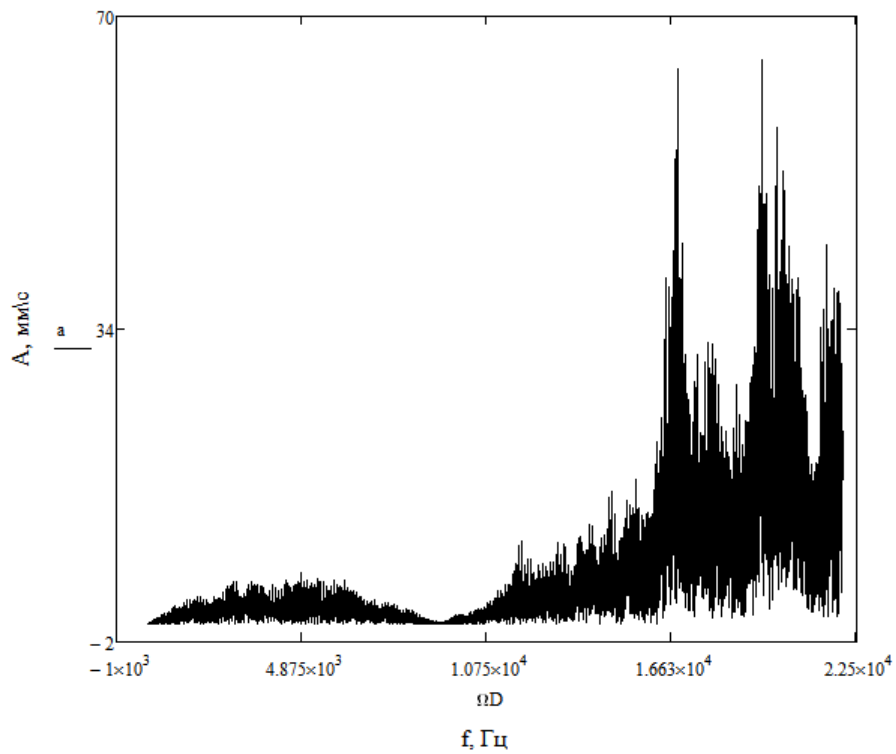


Рисунок 3.5 – Спектр сигналу акустичної емісії  
для бездефектного підшипника без наявності дисбалансу

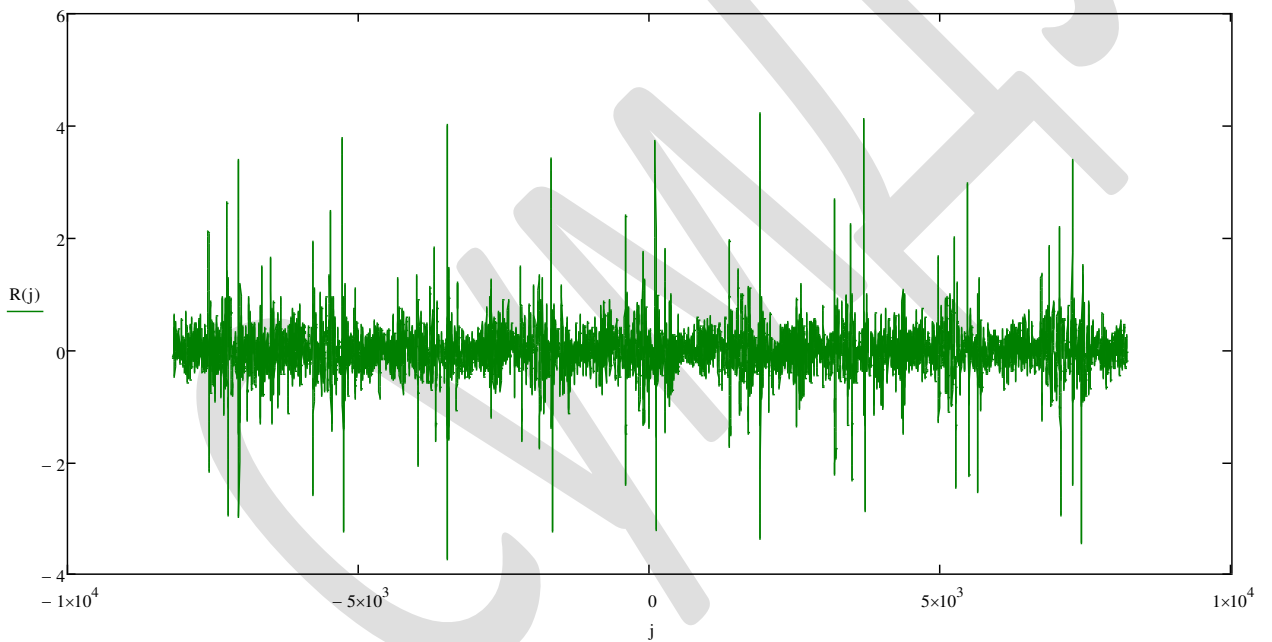


Рисунок 3.6 – Часова форма вібрації для бездефектного підшипника  
з наявністю дисбалансу

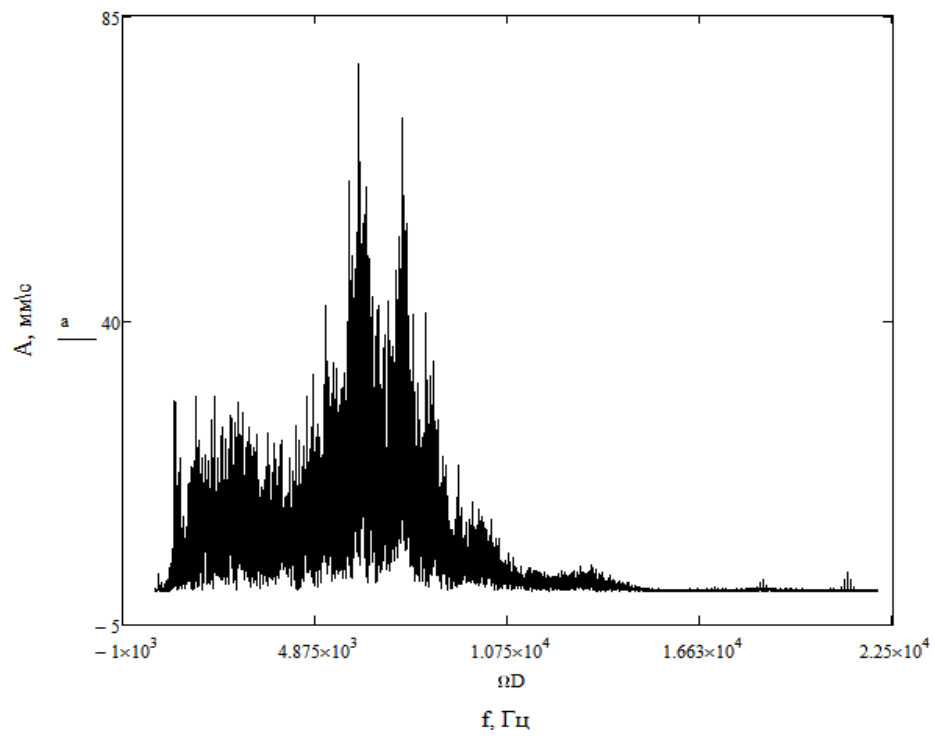


Рисунок 3.7– Спектр вібрації для бездефектного підшипника з наявністю дисбалансу

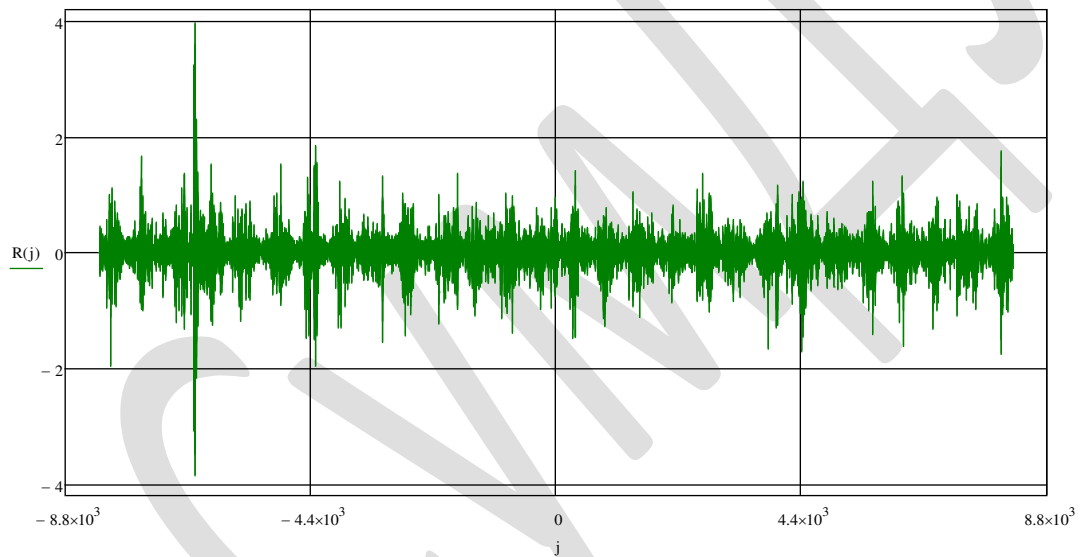


Рисунок 3.8 – Часова форма сигналу акустичної емісії для бездефектного підшипника з наявністю дисбалансу

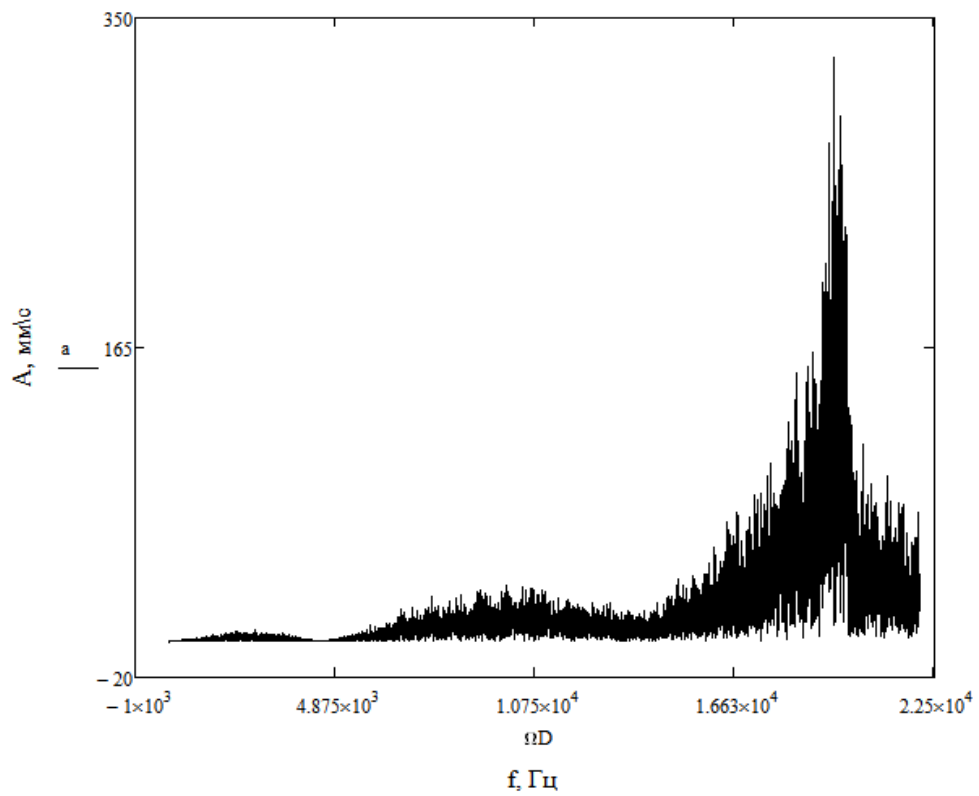


Рисунок 3.9 – Спектр сигналу акустичної емісії для бездефектного підшипника з наявністю дисбалансу

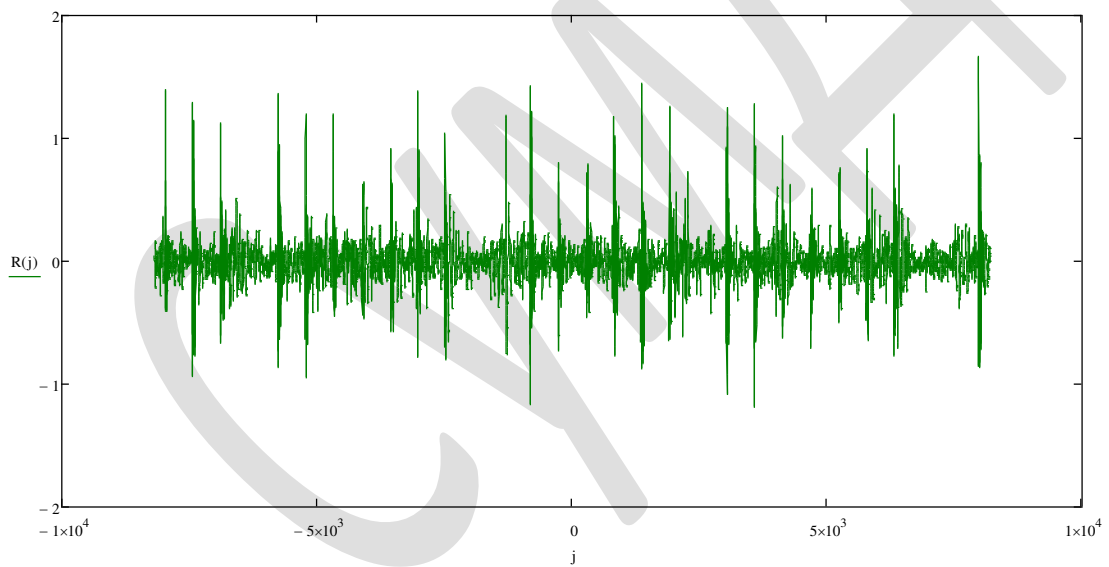


Рисунок 3.10 – Часова форма вібрації для підшипника з дефектом зовнішньої обойми без наявності дисбалансу

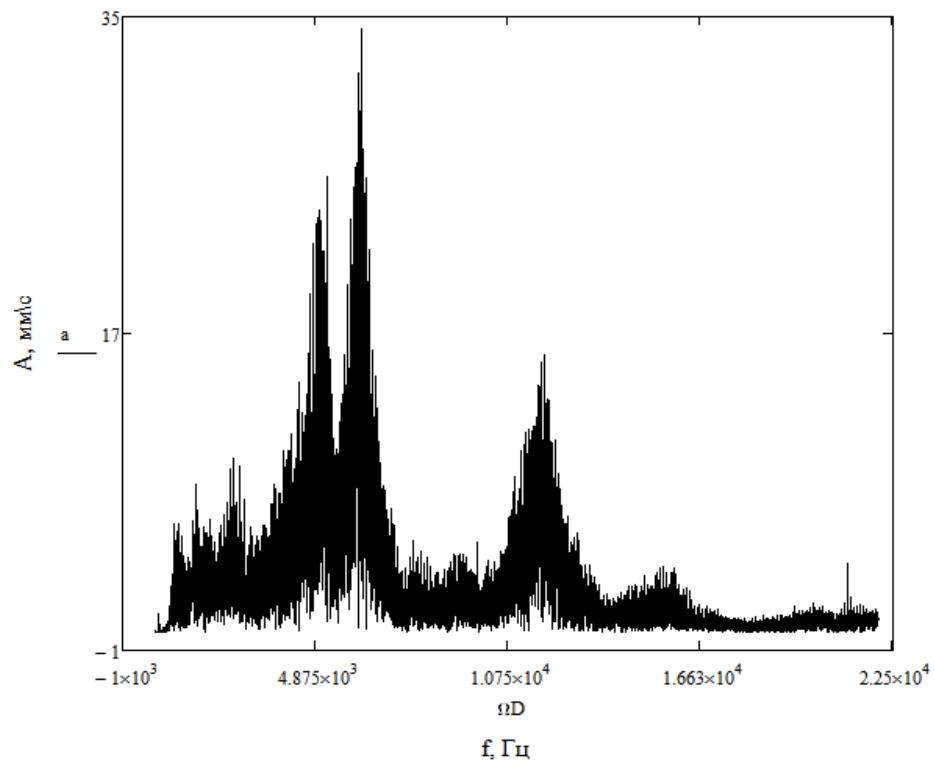


Рисунок 3.11 – Спектр вібрації для підшипника з дефектом зовнішньої обойми без наявності дисбалансу

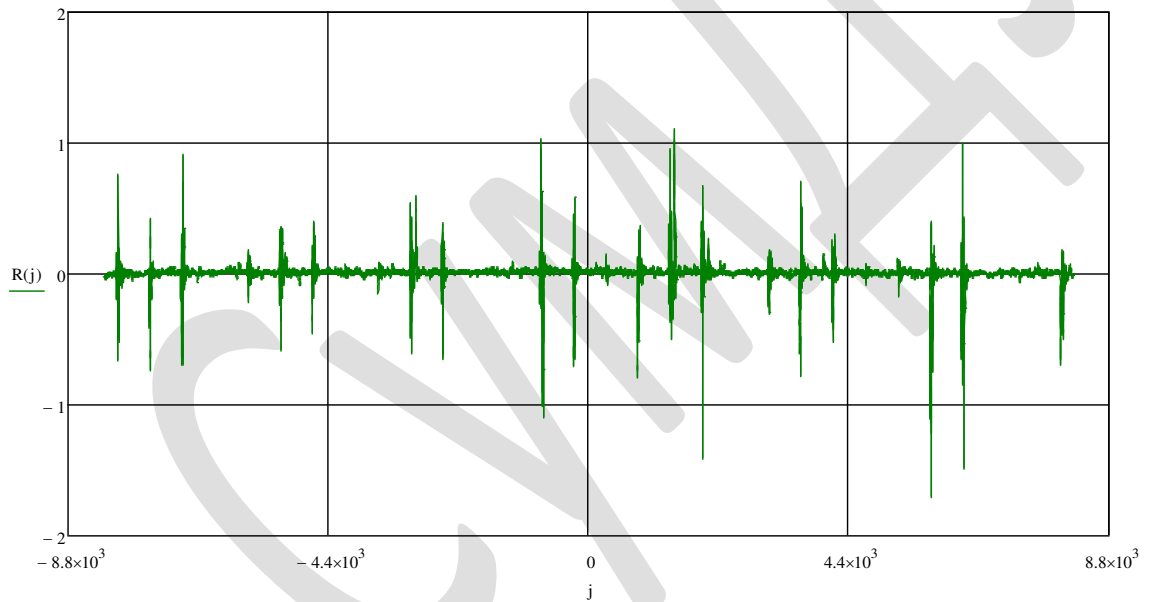


Рисунок 3.12 – Часова форма сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом зовнішньої обойми без наявності дисбалансу

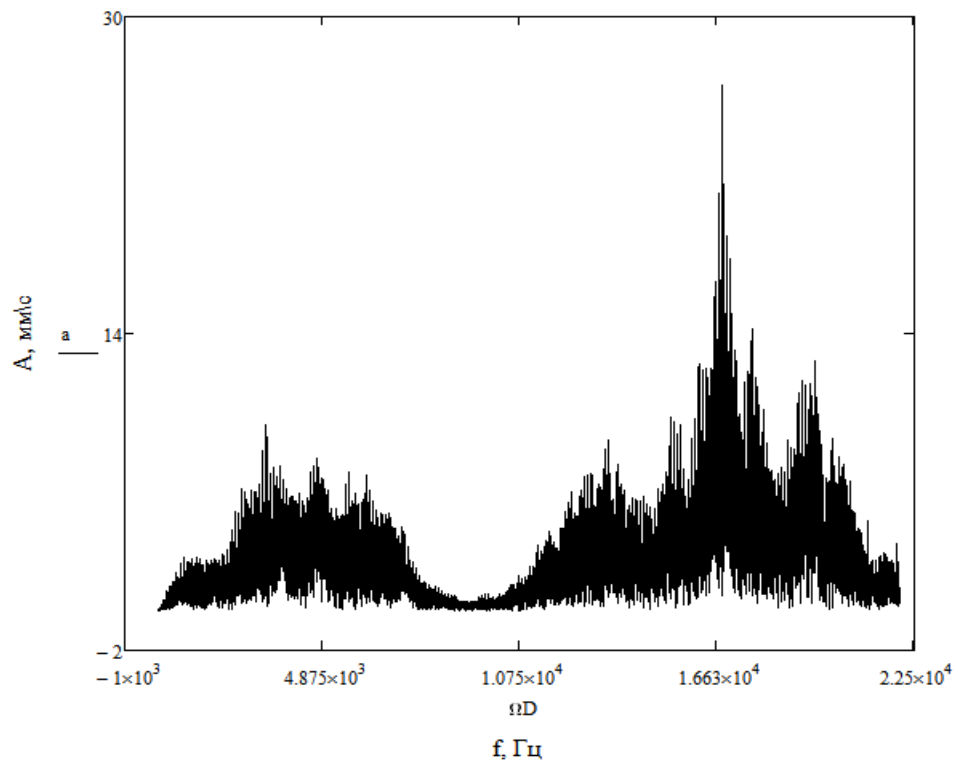


Рисунок 3.13 – Спектр сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом зовнішньої обойми без наявності дисбалансу

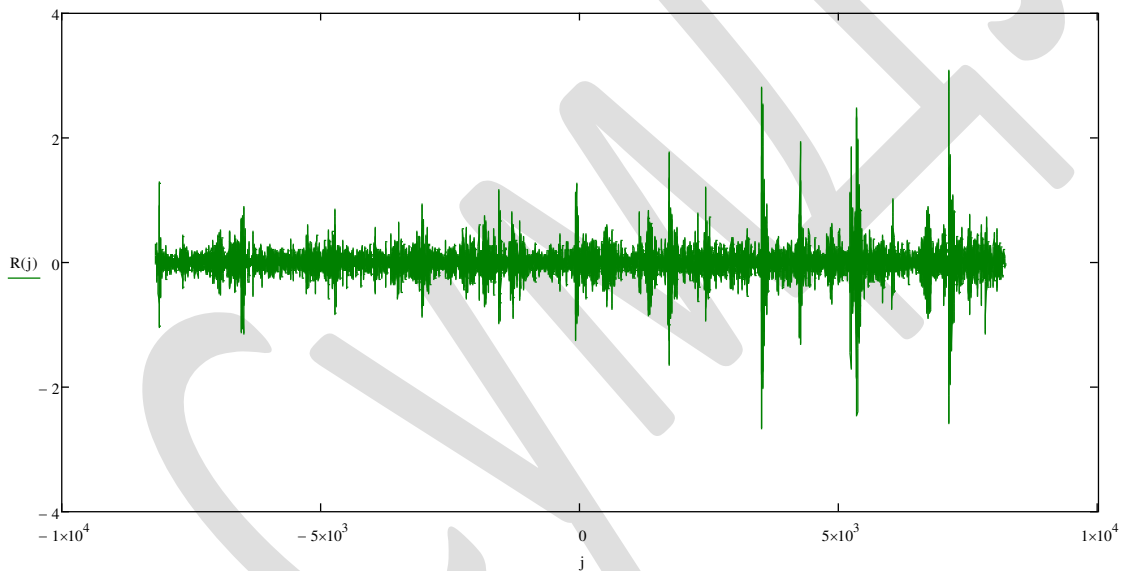


Рисунок 3.14 – Часова форма вібрації для підшипника з дефектом зовнішньої обойми з наявністю дисбалансу

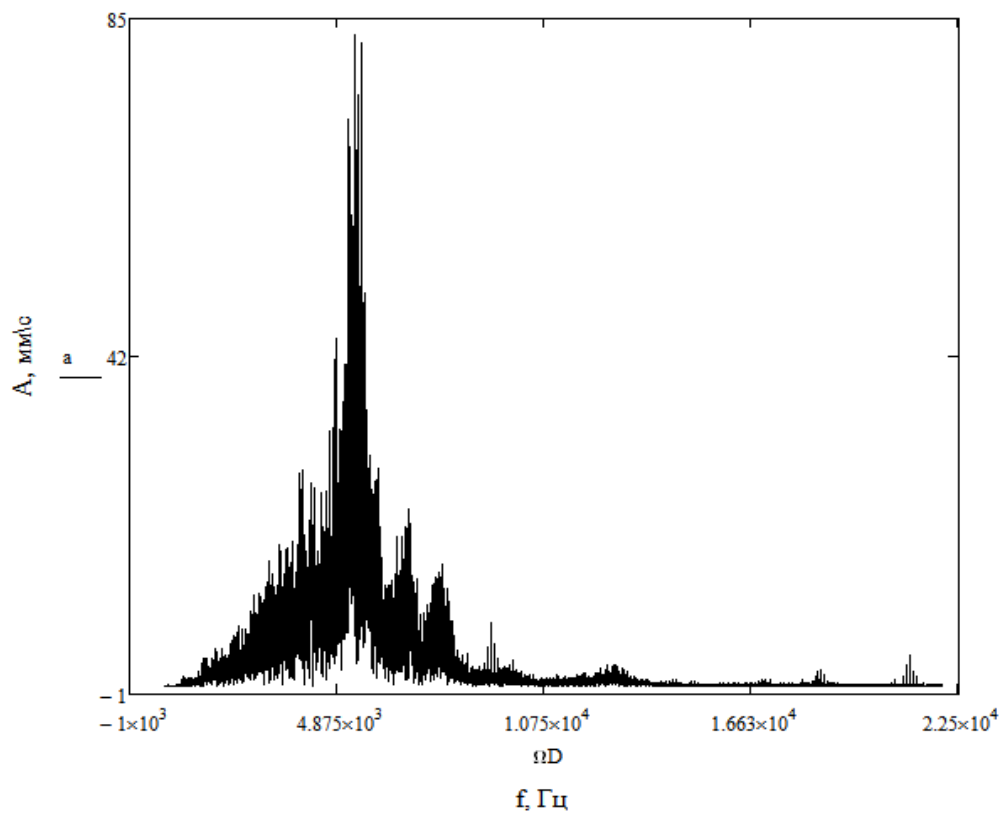


Рисунок 3.15 – Спектр вібрації для підшипника з дефектом зовнішньої обойми з наявністю дисбалансу

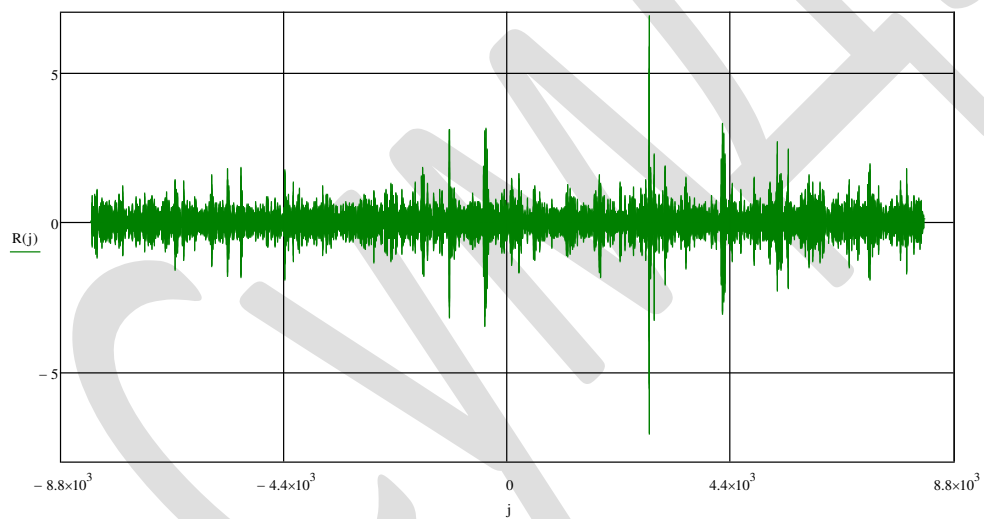


Рисунок 3.16 – Часова форма сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом зовнішньої обойми з наявністю дисбалансу

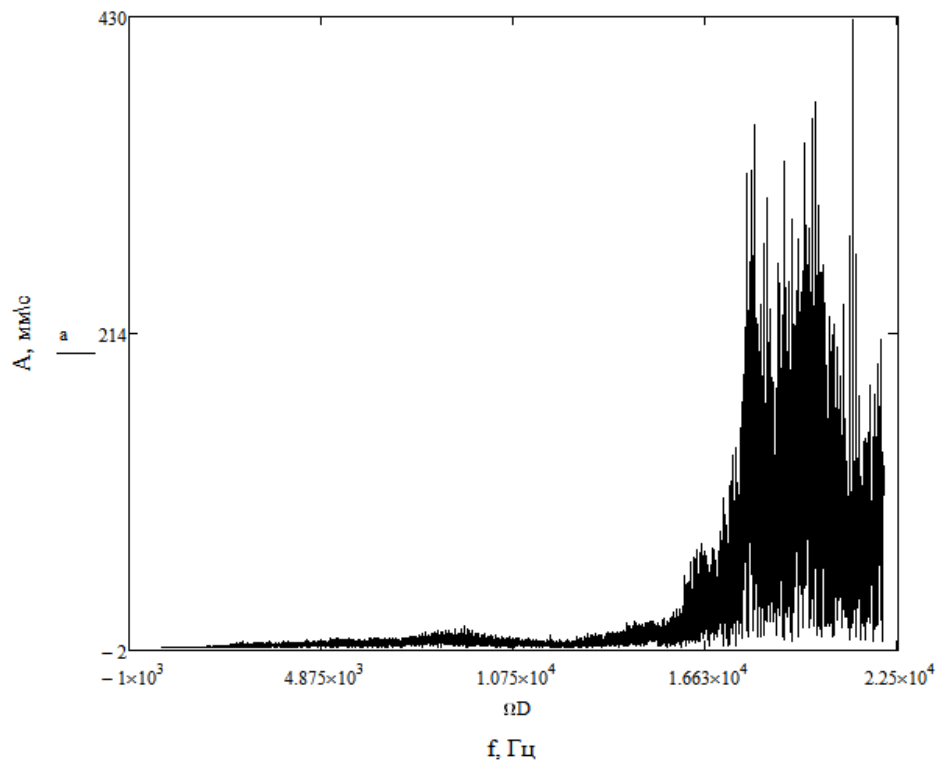


Рисунок 3.17 – Спектр сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом зовнішньої обойми з наявністю дисбалансу

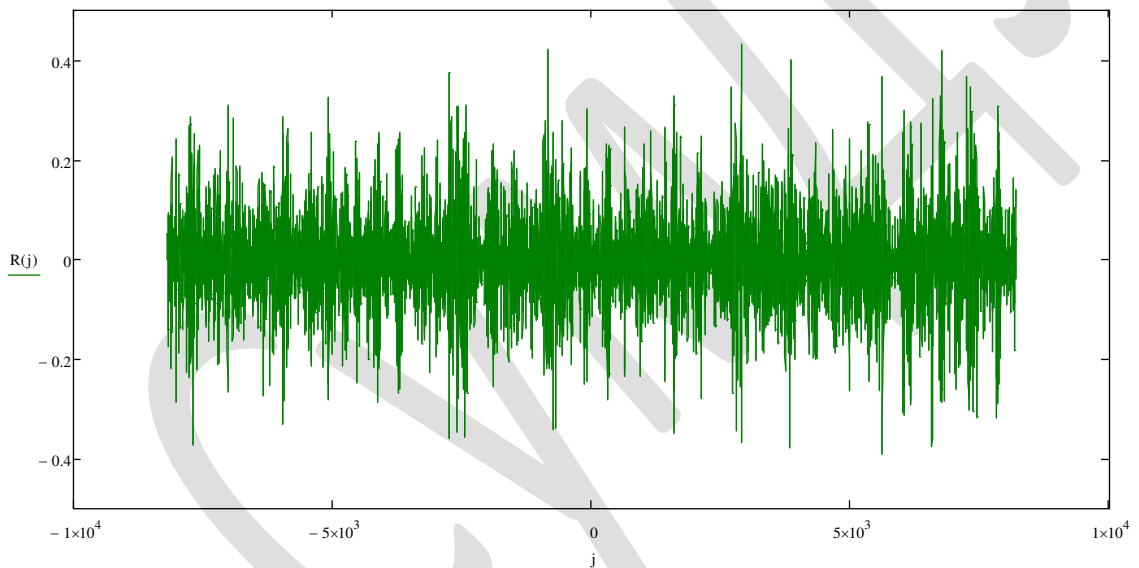


Рисунок 3.18 – Часова форма вібрації для підшипника з дефектом внутрішньої обойми без наявності дисбалансу



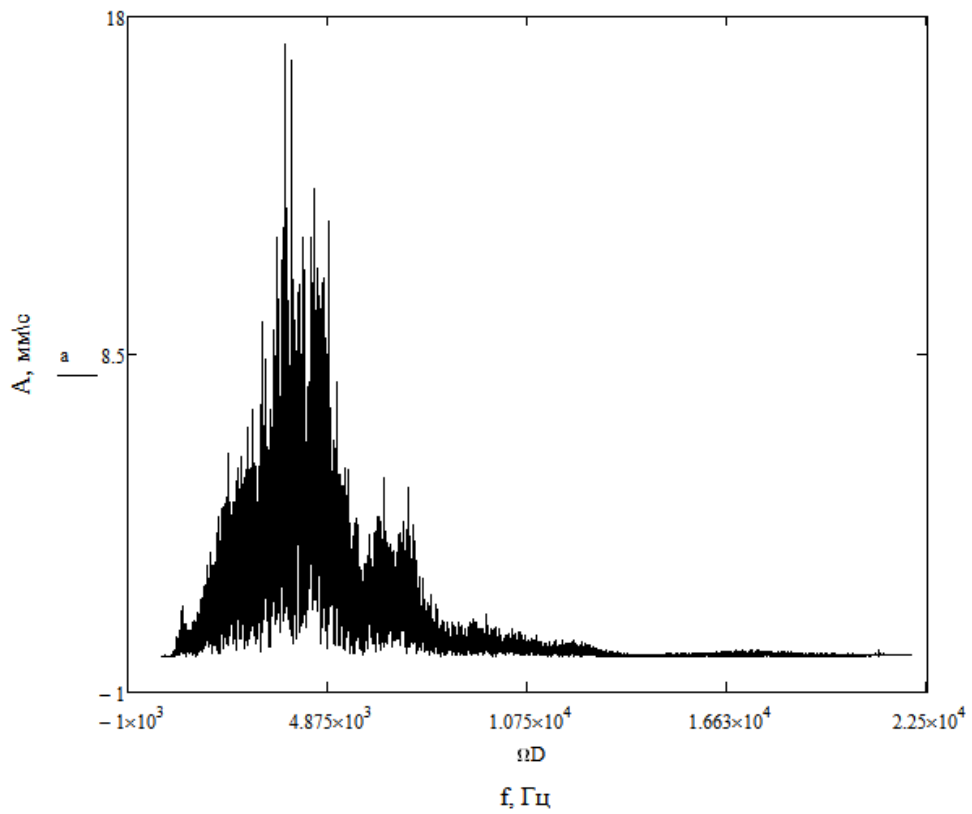


Рисунок 3.19 – Спектр вібрації для підшипника з дефектом внутрішньої обойми без наявності дисбалансу

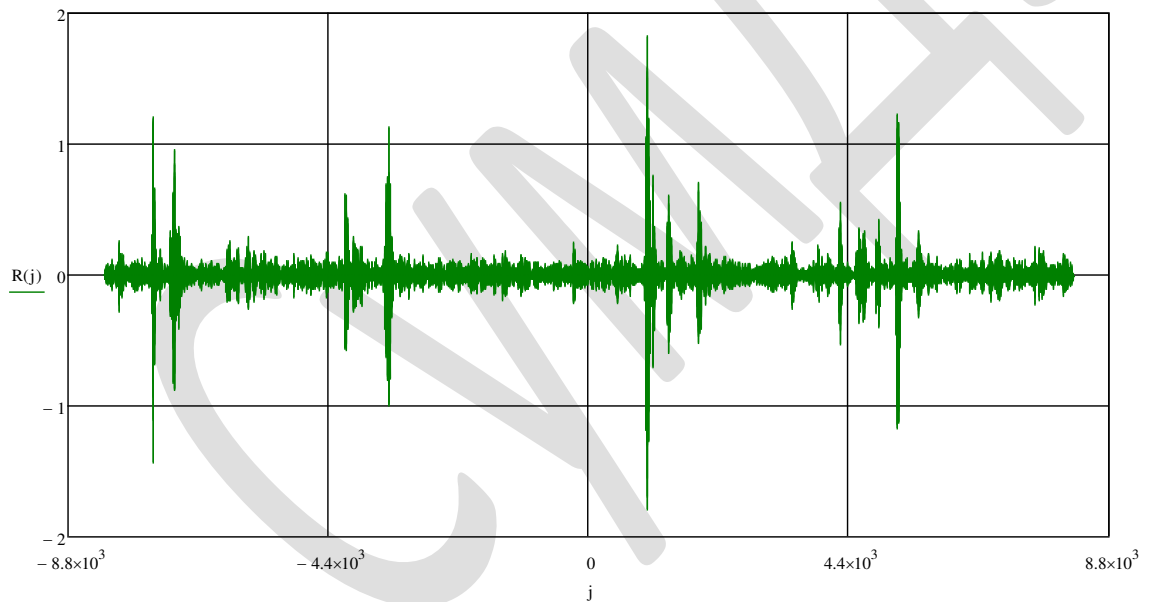


Рисунок 3.20 – Часова форма сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом внутрішньої обойми без наявності дисбалансу

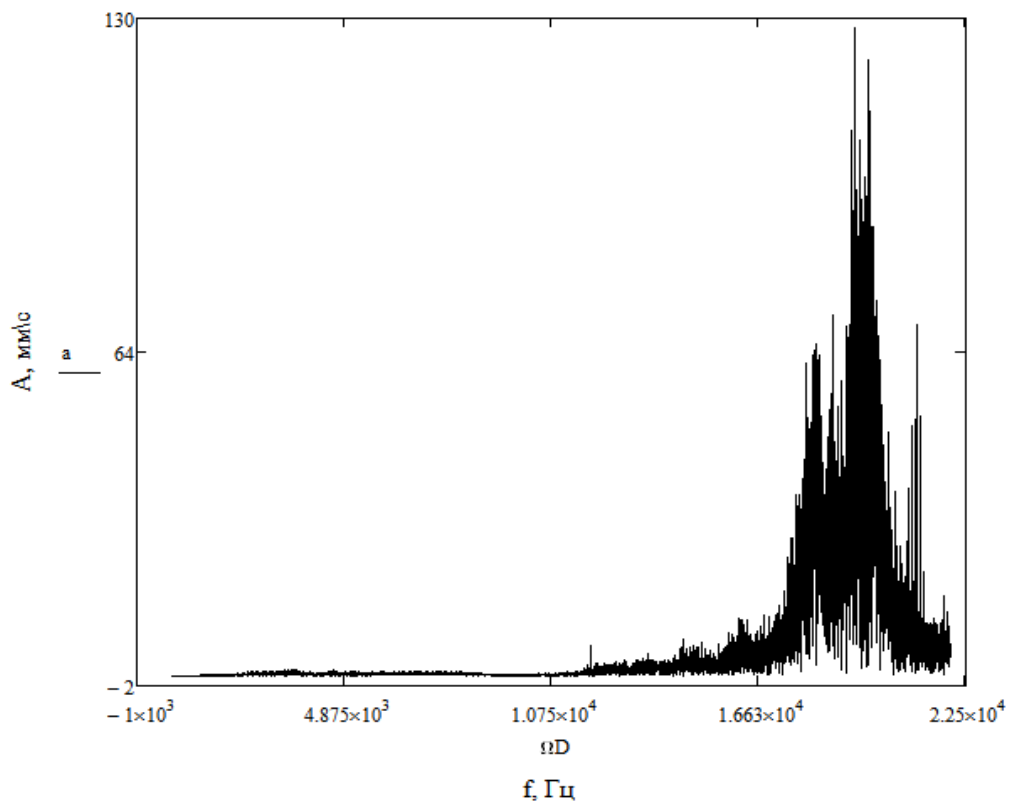


Рисунок 3.21 – Спектр сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом внутрішньої обойми без наявності дисбалансу

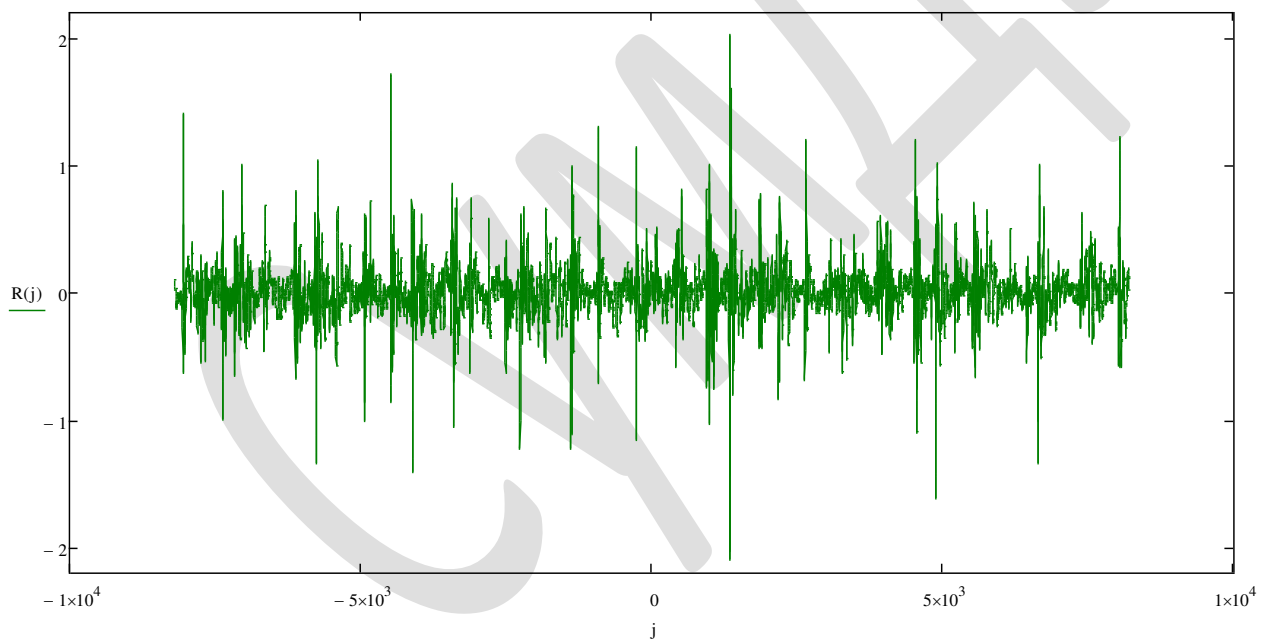


Рисунок 3.22 – Часова форма вібрації для підшипника з дефектом внутрішньої обойми з наявністю дисбалансу

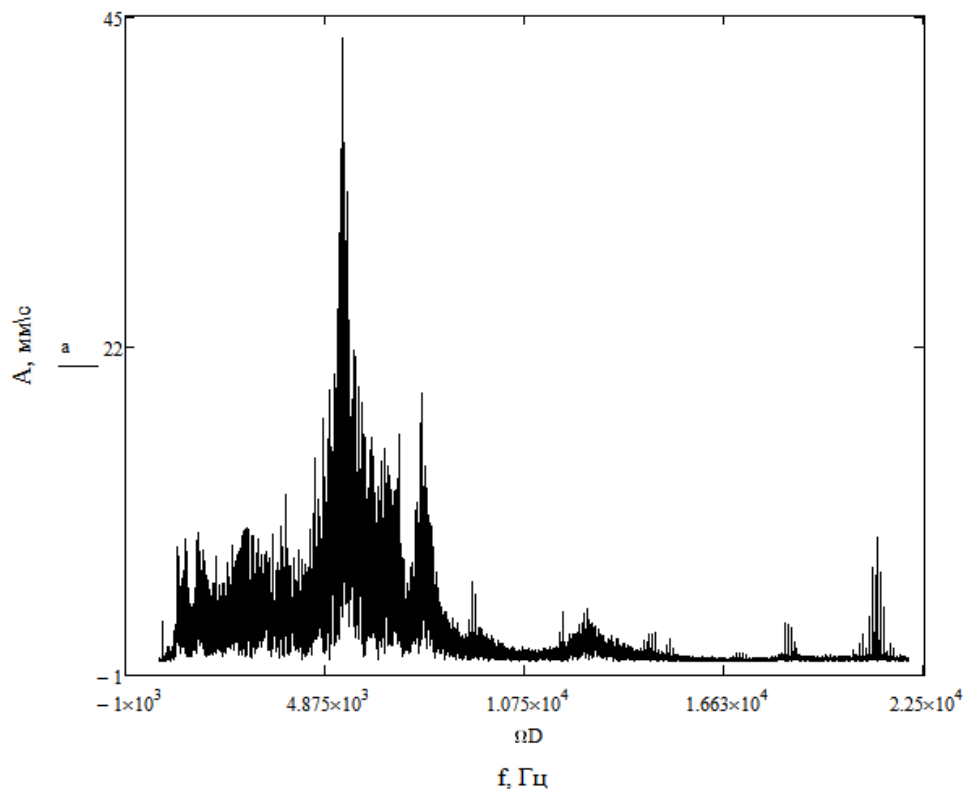


Рисунок 3.23 – Спектр вібрації для підшипника з дефектом внутрішньої обойми з наявністю дисбалансу

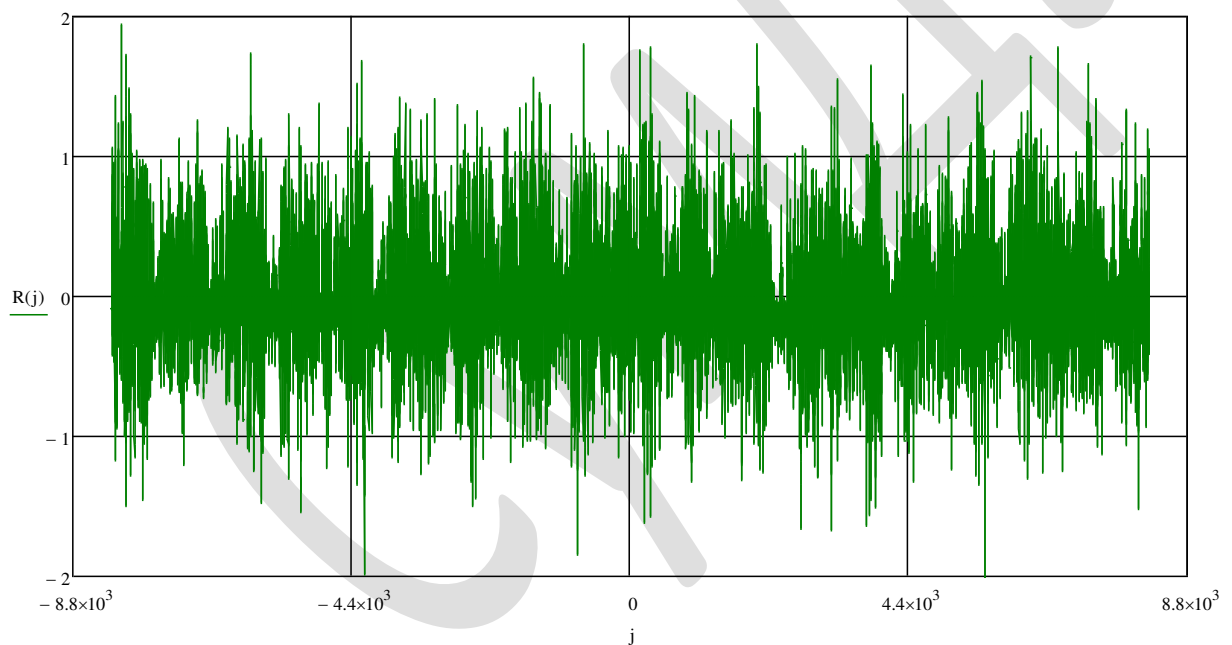


Рисунок 3.24 – Часова форма сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом внутрішньої обойми з наявністю дисбалансу

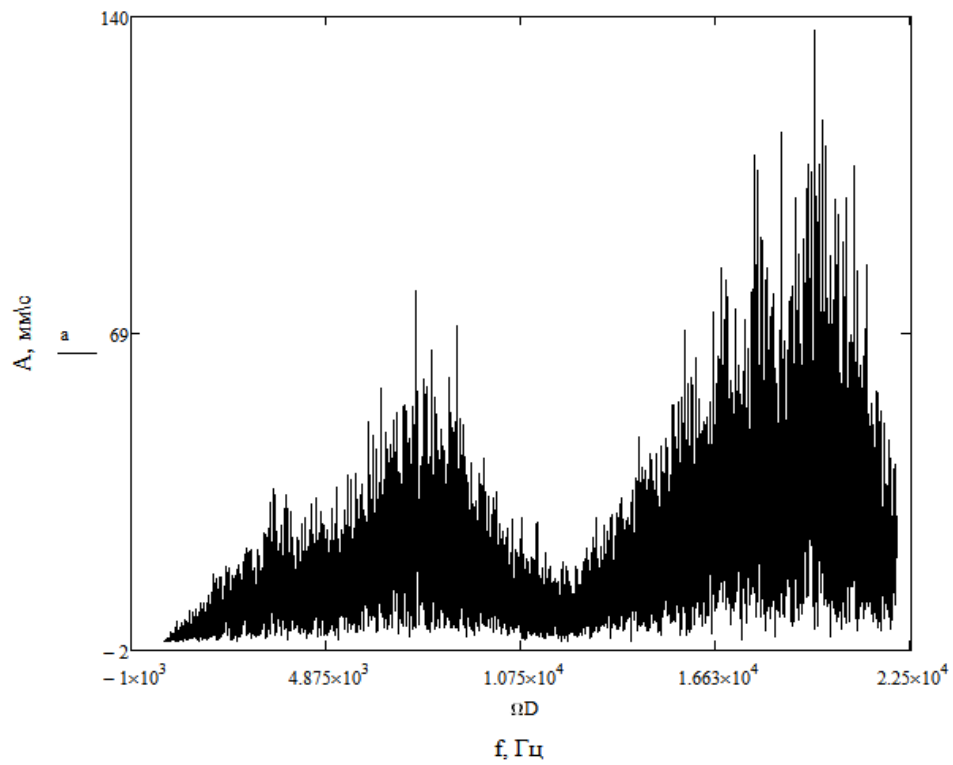


Рисунок 3.25 – Спектр сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом внутрішньої обойми з наявністю дисбалансу

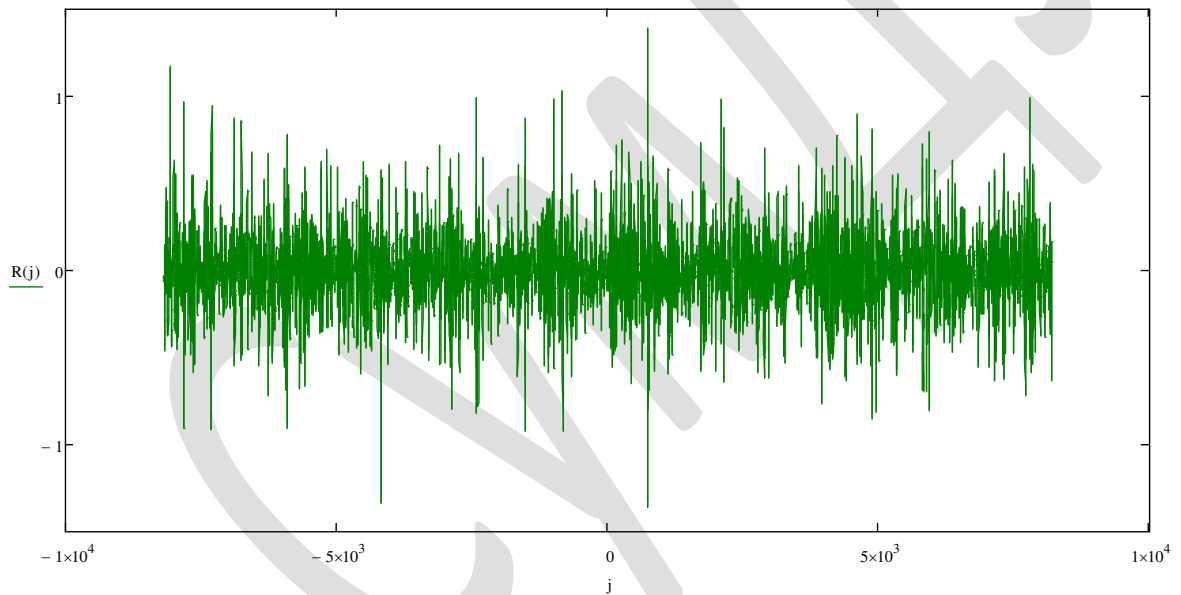


Рисунок 3.26 – Часова форма вібрації для підшипника з дефектом тіла кочення без наявності дисбалансу

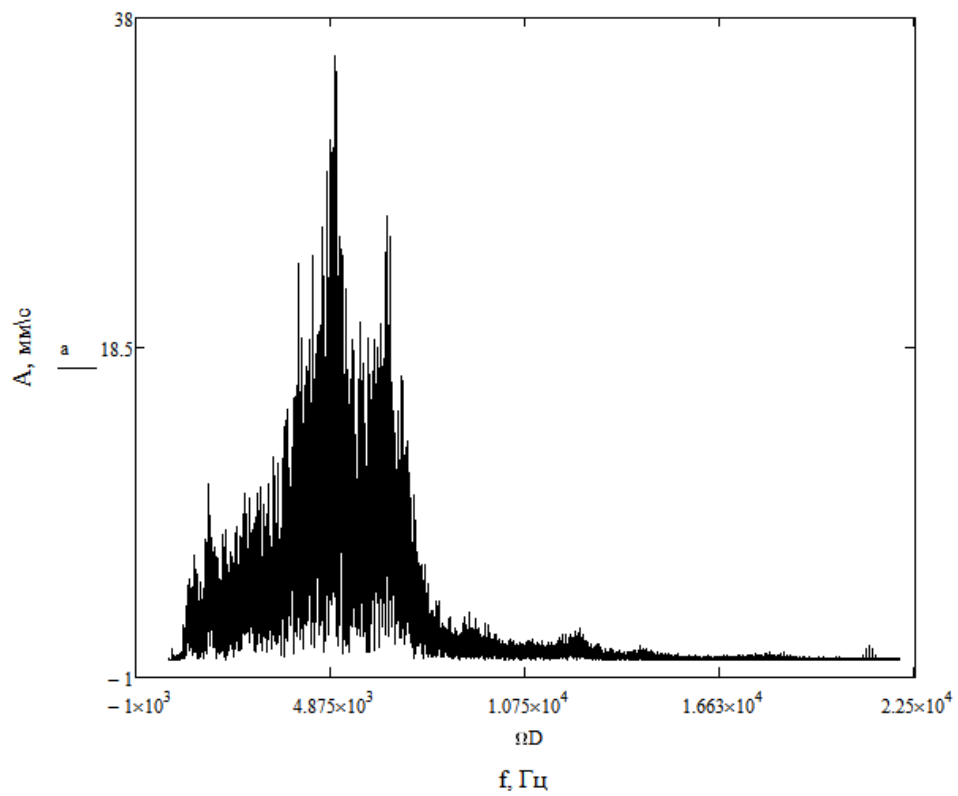


Рисунок 3.27 – Спектр вібрації для підшипника з дефектом тіла кочення без наявності дисбалансу

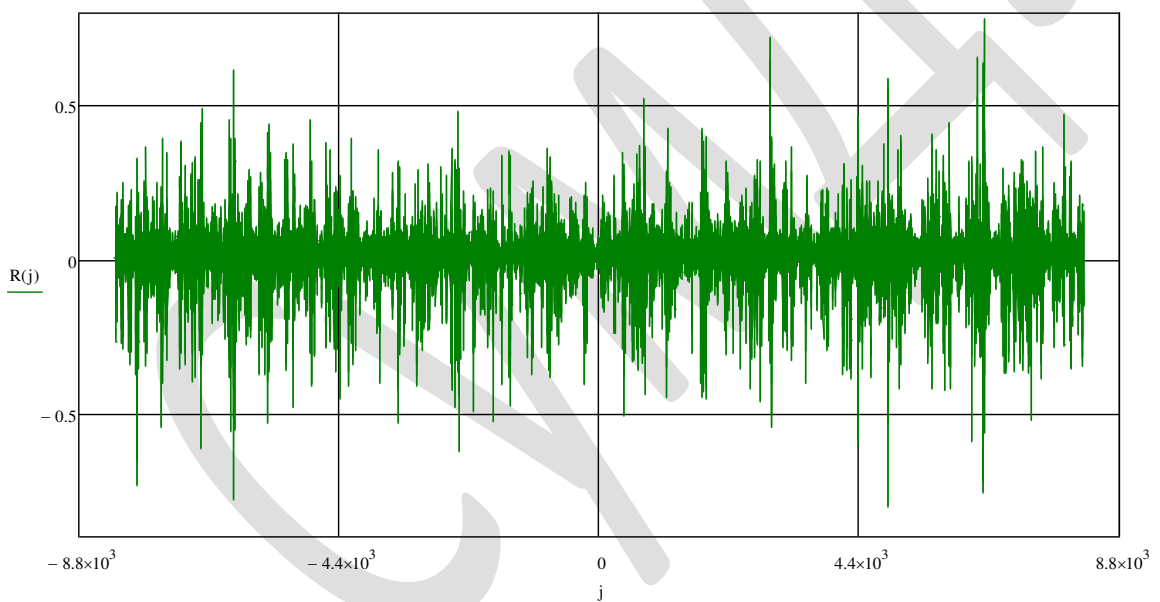


Рисунок 3.28 – Часова форма сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом тіла кочення без наявності дисбалансу

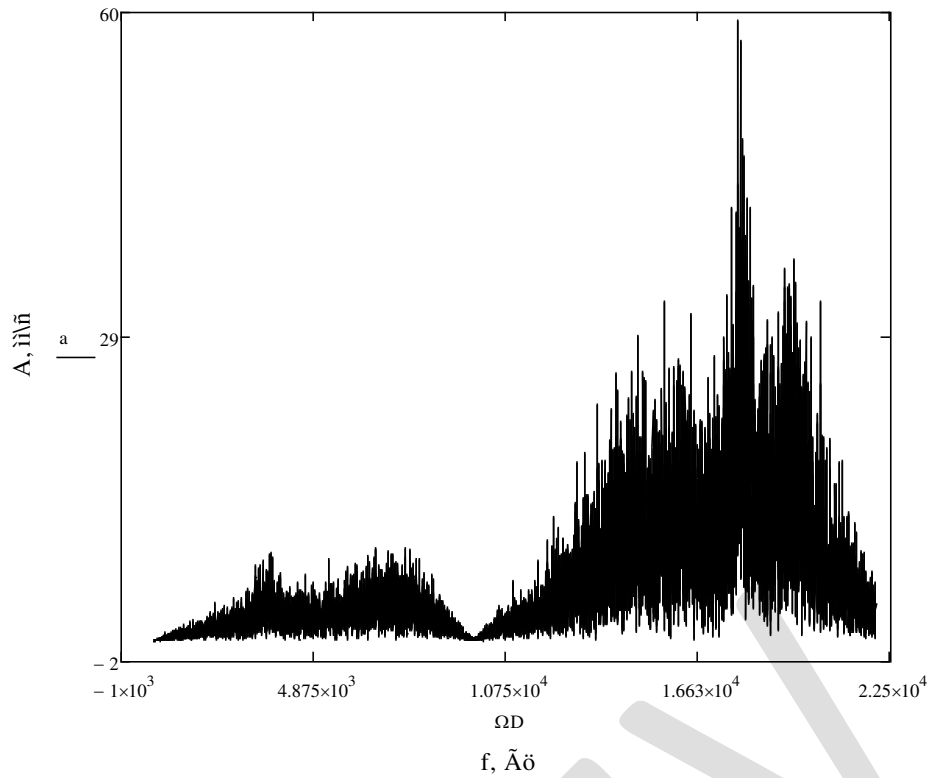


Рисунок 3.29 – Спектр сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом тіла кочення без наявності дисбалансу

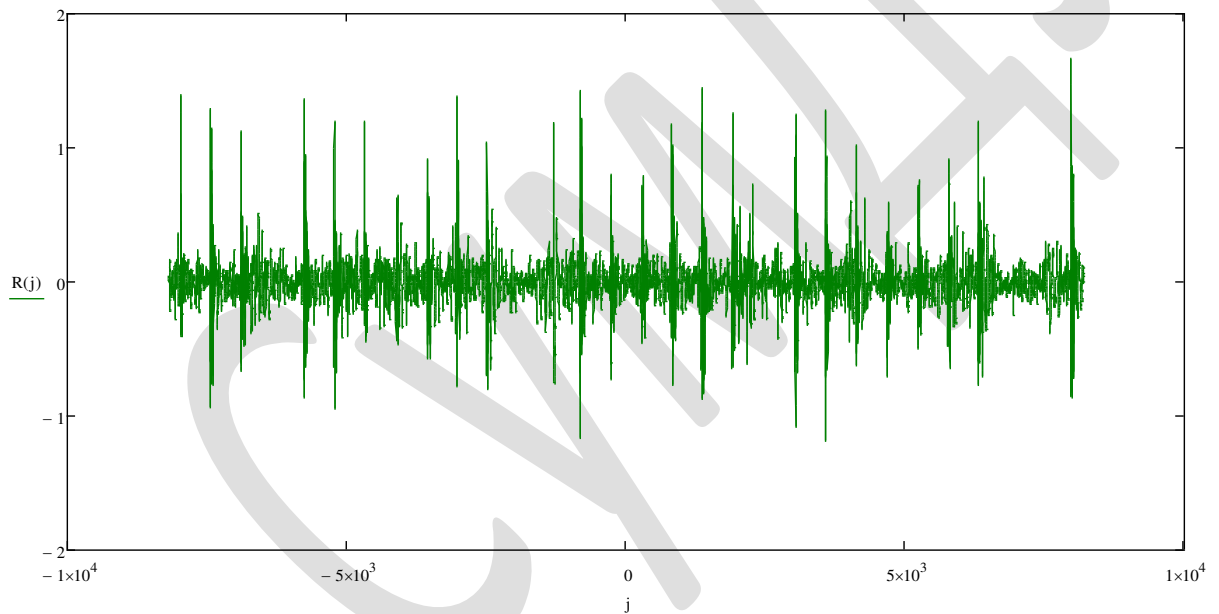


Рисунок 3.30 – Часова форма вібрації для підшипника з дефектом тіла кочення з наявністю дисбалансу

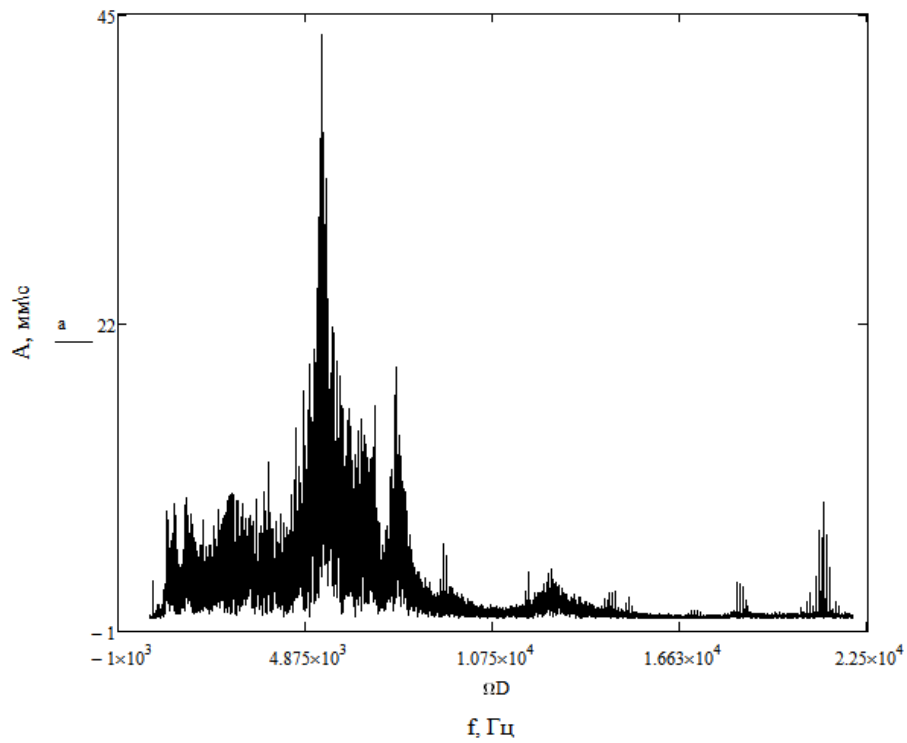


Рисунок. 3.31 – Спектр вібрації для підшипника з дефектом тіла кочення з наявністю дисбалансу

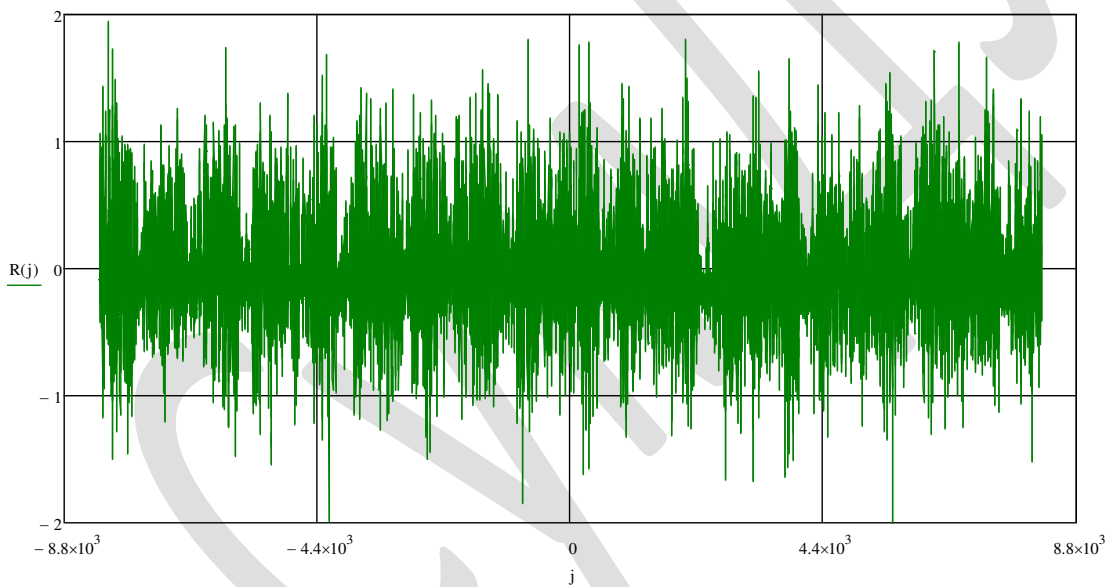


Рисунок 3.32 – Часова форма сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом тіла кочення з наявністю дисбалансу

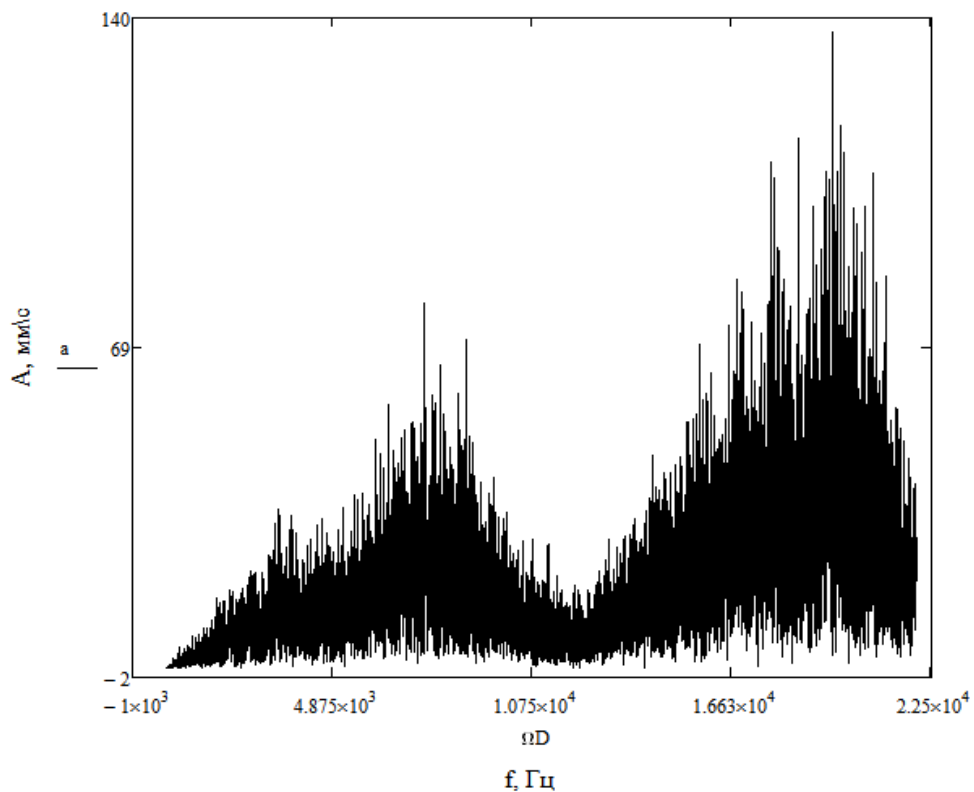


Рисунок 3.33 – Спектр сигналу акустичної емісії для підшипника з дефектом тіла кочення з наявністю дисбалансу

Зокрема, як видно з малюнків 3.3, 3.5, 3.7 і 3.9, при введенні в систему дисбалансу, амплітуда сигналу різко зростає, що свідчить про присутність дефекту (дисбалансу).

Повністю діагностичні ознаки стану підшипників наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Діагностичні ознаки дефектів підшипників

Стан підшипника (вид дефекту)	Часова реалізація (вібросигнал)	Часова реалізація (сигнал АЕ)
Початковей (бездефектне)	Незначний за рівнем і кількістю сплесків (імпульсів) фоновий сигнал	Незначний за рівнем і кількістю сплесків (імпульсів) фоновий сигнал
Зовнішня обойма з дефектом	Рівень сигналу зростає, з'являється складова, яка свідчить про даний дефект	Рівень сигналу зростає, з'являються додаткові на рівні фону імпульси



Внутрішня обойма з дефектом	Очищається від високочастотних імпульсів, з'являється складова, яка свідчить про даний дефект	Очищається від високочастотних імпульсів, інтервал між рештою імпульсами відповідає частотам дискретних складових спектру
Дефект тіла кочення	Збільшується часовий інтервал, який відповідає періоду низькочастотного спектрального піка	Збільшується часовий інтервал, який відповідає періоду низькочастотного спектрального піка і порушується рівномірність амплітуд

### 3.4 Висновки

Випромінювання акустичної емісії, обумовлене недосконалістю або дефектом контактуючих поверхонь, ефективно діагностується, що дозволяє давати об'єктивний висновок про технічний стан деталей і вузлів машини. Застосування акустичної емісії показує, що сигнал має достатню інформативність і його можна використовувати для діагностування різних дефектів підшипників кочення.

### ВИСНОВКИ

Результати фізичних досліджень акустичних хвиль, пов'язаних з деформацією матеріалів (акустичної емісії) показують, що на основі цього явища можна створити ефективні методи неруйнівного діагностичного контролю стану матеріалів для оцінки небезпеки ситуації, що виникла і близькості моменту відмови (руйнування). Подібні передумови вже знайшли конкретне втілення в апаратурі і методах діагностики матеріалів конструкцій.

Труднощі аналітичного вирішення задачі про випромінювання механічних хвиль дефектом структури матеріалу, що розвивається, привели до спроб побудувати різного роду емпіричні і напівемпіричні залежності, що

зв'язують параметри АЕ і дефекту. В основу цих залежностей лягли або деякі фізичні міркування, не підкріплені детальним аналізом механізмів народження хвиль, або проста апроксимація отриманих експериментальних залежностей. У деяких випадках на матеріалі експериментів прийняті спрощуючі гіпотези з метою подальшої побудови таких залежностей.

Випромінювання акустичної емісії, обумовлене недосконалістю або дефектом контактуючих поверхонь, ефективно діагностується, що дозволяє давати об'єктивний висновок про технічний стан деталей і вузлів машини. Застосування акустичної емісії показує, що сигнал має достатню інформативність і його можна використовувати для діагностування різних дефектів, зокрема підшипників кочення.

### **ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Технические средства диагностирования / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989, 672 с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 томах. Т.9. Техническая диагностика / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1987, 352 с.
3. Пархоменко П.П., Согомоян Е.С. Основы технической диагностики. – М.: Энергия, 1981, 320 с.

4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. 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. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.: ил.
5. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Рекомендации для пользователей систем диагностики. Издательство СПбГМТУ, Санкт-Петербург, 2000.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. - М.: Мир, 1983, 312с.
7. 2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. - М.: Мир, 1989. - 448 с.
8. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. - М.: Наука, 1979. -296с.
9. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасёв. — М.: Машиностроение, 1987. — 208с.
10. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 336с.
11. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. - М.: Машиностроение, 1987. - 288с.
12. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов /Ф.Я.Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. - М.: Наука, 1984. - 119с.
13. Папуша А.Н., Прыгунов А. И. Собственные колебания одно- и многослойных цилиндрических втулок ДВС // Двигателестроение. - 1990. -№9. - С. 9-12.
14. Прыгунов А. И., Папуша А. Н. Нелинейные резонансы механических систем как диагностические признаки // Сб. материалов 9-ой Межвузовской школы-семинара “Методы и средства технической

диагностики”, книга 2. - Ивано-Франковск, Облполиграфиздат, 1990. - С. 43-49.

15. Отчет о НИР (промежуточный.) / Сумский филиал ХПИ; № ГР 01860045605. – Сумы, 1987. – 110 с.

СУМЬ