

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Гультайчук Михайло Мирославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.2.

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Контроль технічного стану резервуарів нафтопродуктів методом акустичної емісії

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

Гультайчук М.М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Боднар Роман Тарасович , к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІВТ

Проф._____ **О. Є. Середюк**

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано-Франківськ – 2024 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут (повне найменування закладу вищої освіти)
інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій ____
Освітній рівень магістр_____
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ ____

О. Є. Середюк

« ____ » _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_ Гультайчук Михайло Мирославович
(ПРИЗВИЩЕ, ІМ'Я, ПО БАТЬКОВІ)

1. Тема роботи Контроль технічного стану резервуарів нафтопродуктів методом акустичної емісії.

Керівник роботи Боднар Роман Тарасович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "02" 12. 2024 року № 787/7

2. Термін подання студентом роботи "16" 12. 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: _Стальні резервуари на спеціальних відкритих ділянках для зберігання нафтопродуктів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз об'єкту контролю, існуючих методів і приладів контролю необхідних параметрів. Теоретичне обґрунтування методу контролю. Розробка методики контролю. Розробка конструкції установки. Метрологічний аналіз розробки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Теорія методу (А1) ; Функціональна структурна схема установки (А1);). Загальна конструкція. Складальне креслення установки (А1); Метрологічне забезпечення установки. (А1)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 01.11.2024 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю	01.11.24-12.11.24	
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю	12.11.24-22.11.24	
3.	Розробка конструкції установки	22.11.24-30.11.24	
4.	Розробка методики контролю	30.11.24-05.12.24	
5.	Метрологічний аналіз	05.12.24-08.12.24	
6.	Оформлення роботи.	08.12.24 – 16.12.24	

Студент _____ . Гультайчук М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Боднар Р. Т. .
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Огляд методів контролю	10
1.1 Візуально-оптичний контроль	11
1.2 Товщинометрія	12
1.3 Вимірювання геометричної форми стінки резервуара.....	13
1.4 Контроль проникаючим випромінюванням	15
1.5 Ультразвуковий контроль	16
1.6 Магнітографія	17
1.7 Акустико-емісійний контроль	18
1.8 Вибір методу та обґрунтування і постановка задачі дипломного проектування	23
2 Розробка системи для контролю стану резервуарів нафтопродуктів	25
2.1 Теоретичне обґрунтування вибраного методу контролю	25
2.1.1 Поширення хвиль акустичної емісії в півпросторі від дії симетричного локального джерела випромінювання	25
2.1.2 Аспекти відбору сигналу акустичної емісії	31
2.1.3 Визначення координат джерел акустичної емісії	35
2.2 Розробка акустико-емісійної системи для контролю стану резервуарів....	42
2.2.1 Розробка структурної схеми акустико-емісійної системи для контролю стану резервуарів	42
2.2.2 Розробка електричної принципової схеми акустико-емісійної системи для контролю стану резервуарів.....	44

2.2.3 Розрахунок і розробка конструкції перетворювача акустичної емісії ..	54
2.2.3.1 Основні вимоги до перетворювачів акустичної емісії	54
2.2.3.2 Характеристика матеріалів, що використовуються для виготовлення перетворювача акустичної емісії	58
2.2.3.3 Розрахунок перетворювача акустичної емісії.....	62
2.2.3.4 Розробка конструкції перетворювача акустичної емісії.....	66
2.2.4 Розробка методики контролю стану резервуара без примусової зміни тиску	67
3 Метрологічний аналіз системи для контролю стану резервуарів нафтопродуктів	73
3.1 Схеми накопичення похибок розробленої системи контролю	73
3.2 Оцінка методичної похибки системи.....	75
3.3 Оцінка інструментальних похибок системи.....	81
3.4 Шляхи підвищення точності системи контролю і вірогідності результатів контролю	81
3.5 Імовірнісна оцінка дефектів конструкції в процесі акустико-емісійного моніторингу	85
Висновки	
Перелік посилань на джерела.....	
Додатки.....	
Бібліографічна довідка.....	

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 87 с., 12 рис., табл., 5 додатків, 15 джерел, 7 аркушів креслень.

Здійснено теоретичне обґрунтування методу акустичної емісії, зокрема описано поширення хвиль акустичної емісії в півпросторі від дії симетричного локального джерела випромінювання, аспекти відбору сигналу акустичної емісії та визначення координат джерел;

Розроблено структурну схему системи для контролю стану резервуарів нафтопродуктів, відповідно до якої розроблено складальне креслення блоку обробки сигналів та схему електричну принципову;

Розроблено методику роботи із системою для контролю стану резервуарів нафтопродуктів у режимі експлуатації;

Проведено метрологічний аналіз розробленої системи і оцінку достовірності отримуваних нею результатів;

**АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ, РЕЗЕРВУАР, ДЕФЕКТ, НЕРУЙНІВНИЙ
КОНТРОЛЬ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ, ДЖЕРЕЛО
АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ, АНТЕНА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА, ЛОКАЦІЯ,
ФОНОВИЙ ШУМ ОБ'ЄКТА, ІМПУЛЬС АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ**

ABSTRACT

Master's thesis: 87 p., 12 fig., table., 5 appendices, 15 sources, 7 sheets of drawings.

A theoretical justification of the acoustic emission method has been carried out, in particular, the propagation of acoustic emission waves in a half-space from the action of a symmetric local radiation source, aspects of acoustic emission signal selection and determination of source coordinates have been described;

A structural diagram of a system for monitoring the condition of oil product tanks has been developed, according to which an assembly drawing of the signal processing unit and an electrical schematic diagram have been developed;

A methodology for working with a system for monitoring the condition of oil product tanks in operation has been developed;

A metrological analysis of the developed system and an assessment of the reliability of the results obtained by it have been carried out;

ACOUSTIC EMISSION, TANK, DEFECT, NON-DESTRUCTIVE TESTING, ACOUSTIC EMISSION TRANSDUCER, ACOUSTIC EMISSION SOURCE, ACOUSTIC EMISSION ANTENNA, LOCATION, BACKGROUND NOISE OF THE OBJECT, ACOUSTIC EMISSION PULSE

ВСТУП

Безперервне постачання споживачів нафтопродуктами значною мірою залежить від надійного функціонування основного технологічного обладнання і споруд підприємств із забезпечення нафтопродуктами, в тому числі і резервуарів. Актуальність забезпечення ефективної експлуатації резервуарів значно зростає у зв'язку з нестачею нафти і нафтопродуктів, дефіцитом палива, необхідністю його економії, різкого зменшення втрат при зберіганні. Наслідком підвищення надійності резервуарів є збереження матеріальних ресурсів, зменшення втрат нафтопродуктів внаслідок витоків і аварій, зниження витрат, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища.

Нафта і нафтопродукти мають специфічні властивості, що суттєво впливають на організацію процесу їх зберігання у резервуарах. Основним, що потрібно враховувати при зливо-наливних операціях і зберіганні у резервуарних парках є: токсичність, в'язкість, спроможність до електролізу, вибухонебезпечність, пожежонебезпечність, густина, хімічний склад, випаровуваність нафтопродуктів.

Із всіх об'єктів транспорту і зберігання від 60 до 80% припадає на резервуари. Сталеві резервуари є найбільш розповсюдженим видом сховищ для нафти і нафтопродуктів – у системі нафтопродуктозабезпечення України вони складають майже 92% (решта – підземні сховища та залізобетонні резервуари). За галузями паливно-енергетичного комплексу України вони розподіляються наступним чином: нафтовидобувні підприємства – 0,6; нафтопереробні заводи – 25,1; резервуарні парки підприємств нафтопродуктозабезпечення – 70,7; відомчі склади – 3,6%. Як видно з наведених даних, основний об'єм резервуарних парків (70,7%) сконцентровано в системі нафтопродуктозабезпечення, де 92% складають

сталеві резервуари.

Сталеві резервуари мають широку гаму типорозмірів і об'ємів. У роботі [1] зазначено, що практично в Україні сьогодні експлуатуються циліндричні вертикальні резервуари 12 типорозмірів об'ємом від 100 до 30000 м³, як дослідні зразки розроблені конструкції резервуарів об'ємом 50000 і 100000 м³ з понтоном і плаваючим дахом.

Вони являють собою споруди, елементи яких працюють в напружених експлуатаційних умовах. До таких умов відносяться: температурні режими, підвищення надлишкового тиску, вакуум, вібрації, нерівномірне осідання, корозія, приховані дефекти зварних швів, що швидко розвиваються і сприяють виникненню деформацій окремих конструктивних елементів, що значно знижує надійність конструкції в цілому і призводить до аварійних ситуацій. Окрім того, снігове, вітрове навантаження сприяють виникненню додаткових напружень. Тому до матеріалів металоконструкцій і зварних з'єднань висуваються відповідні вимоги.

Виходячи з умов експлуатації, сталі для виготовлення резервуарів повинні мати певні властивості. Основними з них є висока міцність при достатньо високій пластичності і в'язкості, мінімальна схильність до крихкого руйнування (холодноламкість) і старіння, низька чутливість до надрізів. Метал повинен добре зварюватись, забезпечуючи повну герметичність резервуара. Окрім того, він повинен мати достатню корозійну стійкість в умовах атмосфери і дії продуктів, що зберігаються. Тому для резервуарів застосовують сталь розкислену з низьким вмістом вуглецю, достатньо чисту за вмістом сірки, фосфору, кисню, азоту, водню, з однорідним розподіленням і низькою кількістю неметалевих включень.

Технічний стан резервуарних парків значною мірою визначає ефективність функціонування підприємств щодо забезпечення нафтопродуктами нафтопереробних заводів, нафтопромислів,

нафтотранспортних підприємств. В умовах значного корозійного зносу, тривалості експлуатації при обмежених об'ємах капітального будівництва принципового значення набувають питання підвищення надійності і довговічності резервуарів (строків їх експлуатації). Ці проблеми тісно пов'язані зі своєчасним технічним обстеженням і дефектоскопією резервуарних конструкцій.

Об'єктом дослідження є процес поширення хвиль акустичної емісії (АЕ) в півпросторі від дії симетричного локального джерела випромінювання, аспекти відбору сигналу АЕ та визначення координат джерел.

Предметом дослідження є способи контролю якості досліджуваних резервуарів.

Наукова новизна магістерської роботи полягає у використанні теоретичного обґрунтування акустичної емісії з метою оцінки якості досліджуваних резервуарів.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ

Однією з основних вимог до сталевих резервуарів є їх надійність. Для забезпечення високої експлуатаційної надійності резервуарів необхідне комплексне вирішення проблеми, яка включає знання діючих навантажень на конструкцію, умов працездатності корпусу, покриття, плаваючих дахів, понтонів і ущільнювальних затворів. Окрім того, велике значення має вивчення кінетики розвитку пошкоджень та їх вплив на надійність конструкції.

Для вжиття своєчасних і ефективних заходів щодо попередження можливості руйнування і виходу з ладу резервуарів надзвичайно важливо виявити причини аварій.

На основі аналізу руйнувань резервуарів, які мали місце на протязі останніх 30 років, а також багаточисельних випадків місцевих пошкоджень і часткової втрати стійкості окремих елементів конструкцій резервуарів як у процесі монтажу, так і в процесі гідравлічних випробувань та в період експлуатації існує класифікація основних причин аварій [дод. А].

Головними причинами є:

- вплив низьких температур на фізико-механічні властивості резервуарних сталей, особливо киплячих;
- порушення правил технічної експлуатації резервуарів, які, в основному, зводяться до випорожнення або заповнення резервуара нафтопродуктами з швидкістю, що перевищує максимальну пропускну спроможність дихальних клапанів, переповнення резервуарів, порушення періодичності обстеження резервуара, очищення днища від відкладень;
- корозійний знос корпусу резервуара;
- наявність дефектів, допущених при зварювально-монтажних роботах;

–нерівномірне осідання резервуара по нижньому контуру і під днищем;

–явище втомленості (поступове підростання тріщиноподібних дефектів).

В умовах несприятливих екологічних обставин, дефіциту енергетичних і матеріальних ресурсів важливим є продовження строку служби резервуарних парків нафтобаз, нафтопереробних заводів, нафтопромислів, їх реконструкція, підвищення надійності, своєчасний ремонт. Ці питання тісно пов'язані з технічним обстеженням і дефектоскопією сталевих резервуарів.

Мета технічного обстеження і дефектоскопії – виявлення зносу елементів конструкції резервуарів (стінки, покрівлі, днища, несучих елементів); встановлення механічних характеристик матеріалів конструкцій і геометричної форми, контроль підвалини, зварних з'єднань.

Сталевий резервуар являє собою складну систему, яка має високу функціональну залежність для забезпечення зберігання нафтопродуктів. При експлуатації резервуар може знаходитись у різних станах, які можна розділити на безліч справних станів і безліч несправних станів.

Можливі несправності резервуарів можна розділити на несправності підвалини, котрі викликають рівномірне і нерівномірне осідання резервуара, та несправності корпусу резервуара, які визначають якісні зміни будь-якого параметра або руйнування.

1.1 Візуально-оптичний контроль

Обстеження резервуарів на предмет їх технічного стану і діагностування починається з першого етапу – візуального огляду поверхні основного металу і зварних з'єднань. Перелік і об'єм перевірок при зовнішньому огляді залежить від виду технічного обстеження (часткове, повне).

Усі конструктивні елементи резервуара (днище, стінка, покрівля, понтон, плаваючий дах, підвалина, вимощення) обстежуються з метою виявлення можливих дефектів та пошкоджень.

При проведенні зовнішнього огляду горизонтальних циліндричних резервуарів перевіряється: стан поверхні металу та геометричної форми циліндричного корпусу і днищ торців; стан внутрішніх діафрагм циліндричного корпусу (коли такі є); стан опор резервуара (тільки для наземних резервуарів).

Поверхню резервуара слід оглядати спочатку із зовнішньої, а потім з внутрішньої сторони у такій послідовності: крайок днища і нижня частина першого поясу; зовнішня частина першого і другого поясів, а потім третього і четвертого поясів, застосовуючи переносну драбину; верхні чотири пояси (оглядати з застосуванням підвісної люльки або оптичних приладів); місця перемінного рівня нафтопродуктів; покрівля і перекриття.

Поверхня, що оглядається, повинна бути очищена від бруду і нафтопродуктів. Для огляду основного металу застосовують, в основному, лупу 3–10-кратного збільшення. Для огляду перекрить на покрівлі обладнують отвір, вирізаний при встановленні настилу на фермах.

Днище, стінку і покрівлю оглядають по всій поверхні у доступних місцях як з зовнішньої, так і з внутрішньої сторін з метою виявлення поверхових дефектів у вигляді рисок, волосяних тріщин, закатів, подряпин, корозійних пошкоджень, усадочних раковин, виривів, оплавленого металу. Усі виявлені дефекти вимірюються за глибиною залягання, протяжністю, площею, яку вони займають, у масштабі наносяться на ескізи (карти).

1.2 Товщинометрія

За результатами огляду корозійних пошкоджень поверхні резервуара

визначаються найбільш зношені ділянки і проводиться вимірювання товщини металу ультразвуковим товщиноміром (товщинометрія).

Товщинометрія згідно з роботою [1] полягає у визначенні товщини елементів резервуара. Вона є важливою операцією в проведенні технічної діагностики сталевих резервуарів і дає найбільш об'єктивну і широку інформацію про корозійний знос резервуарів для розрахункової оцінки міцності, стійкості, герметичності і прогнозування його технічного стану та визначення залишкового ресурсу.

Існують три поняття товщини елементів резервуара: розрахункова, номінальна і фактична. Розрахункова товщина – теоретична товщина елемента, що визначається розрахунком за відповідними формулами. Номінальна товщина елемента – проектна товщина, прийнята за розрахунковою товщиною з округленням до значень, відповідних сортаментам діючих нормативних документів. Фактична товщина – виміряна товщина елемента на час експлуатації.

Об'єм робіт з вимірювання товщини визначається за наслідками зовнішнього огляду резервуара і залежно від тривалості експлуатації і агресивності продукту, що зберігається, але у всіх випадках потрібно проводити вимірювання в місцях, найбільш пошкоджених корозією. Практика показує, що стабільність показників приладів у виробничих умовах дуже низька. Тому рекомендується у кожній контрольній точці знімати 2-3 показники і визначати значення товщини в точці як середньоарифметичне. Кількість і місця розташування контрольних точок для заміру товщин потрібно визначати залежно від ступеня впливу того чи іншого конструктивного елемента на працездатність резервуара в цілому.

1.3 Вимірювання геометричної форми стінки резервуара

Одним із етапів комплексного діагностування резервуарів є виявлення

дефектів у вертикальних стінках резервуарів, виміри геометричної форми з метою усунення пошкоджень і забезпечення стійкості резервуарів. До дефектів геометричної форми відносяться вм'ятини, ви пучини нерівномірне осідання та інші порушення, які знижують міцність і стійкість споруди.

Виявлення дефектів геометричної стінки резервуара проводиться шляхом замірів відхилення її твірних від вертикалі. Заміри проводяться інвентарною кареткою або за допомогою теодоліта. Контрольні твірні рекомендується назначати не більше, ніж через кожні 6 м по периметру стінки. В окремих випадках стінка резервуара може мати різко виражені локальні вм'ятини, тоді необхідно зменшити крок контрольних твірних з метою виявлення основних параметрів вм'ятини (протяжність по висоті і окружності, значення максимального прогину), які необхідні для наступних розрахунків або співставлення з прийнятими допусками.

Якщо форма стінки має завідомо недопустимі дефекти, то кількість контрольних твірних необхідно приймати, орієнтуючись на можливу форму втрати стійкості стінки від зовнішнього тиску. Це дозволяє розрахунковим шляхом уточнити оцінку стійкості із врахуванням наявних дефектів, а не порівнювати відхилення з допусками.

При невиконанні вимог до відхилень твірних від вертикалі в кожному конкретному випадку можливий індивідуальний підхід. Але завжди необхідно провести обов'язкові заміри відхилень твірних від вертикалі при різних 3-4 рівнях заповнення резервуара з метою визначення кінетики поведінки стінки під навантаженням.

Вимірювання проводяться на заповненому або порожньому резервуарі з метою визначення ділянок найбільшого нахилу стінки і місць розташування небезпечних деформацій. При цьому особлива увага звертається на поведінку хрупунів та вм'ятин. В місцях їх знаходження проводяться додаткові дослідження, якщо ці дефекти не попадають на лінію вимірювання твірних.

Вимірювання відхилень від вертикалі твірних стінок резервуара проводиться за допомогою виска шляхом прямого вимірювання або за допомогою теодоліта методом нівелювання.

Особливе значення для забезпечення надійності і довготривалої експлуатації має технічна діагностика зварних з'єднань резервуара, яка включає фізичні (неруйнівні) методи контролю.

1.4 Контроль проникаючим випромінюванням

При неруйнівному методі контролю залежно від конфігурації, місця знаходження шва, технічного стану резервуара використовують наступні методи: з використанням проникаючих випромінювань (гама- і рентгенографії) та ультразвукового, кольорової та магнітографічної дефектоскопії.

Рентгенодефектоскопія дозволяє в межах чутливості визначити характер дефекту, його розміри, довжину, глибину та поперечні розміри, кількість дефектів у зварному шві або пришовній зоні. Ультразвукова дефектоскопія забезпечує виявлення внутрішніх та поверхневих дефектів у зварних швах та пришовній зоні без розшифровки характеру виявлених дефектів.

Перед контролем зварних з'єднань резервуар повинен бути звільнений від продукту і підготовлений до проведення вогнебезпечних робіт, окрім того зварні шви чотирьох нижніх поясів стінки і шви днища очищуються від шламу, окалини та інших забруднень. Перед початком робіт з просвічування зварні шви оглядаються візуально на предмет наявності подрізів, пор, незаплавлених кратерів та інших видимих дефектів, які повинні бути усунені, оскільки вони значно утруднюють розшифровку знімків. Рентгенівський або гама-знімок дозволяє в межах чутливості наочно визначити характер дефекту, його розміри по довжині, глибину і поперечні розміри, їх кількість у

шві або навколо шовній зоні.

Розміри дефекту (поперечні та в довжину) як вказано у роботі [2] визначаються простими вимірюваннями за допомогою лінійки. Розміри дефекту по перерізу шва у напрямі променя просвічування визначаються орієнтовно за допомогою еталона чутливості, порівнюючи затемнення на знімку з затемненням відповідної канавки еталона чутливості. При цьому враховується умова рівності висоти посилення шва з товщиною еталона.

Чутливість контролю визначається за формулою

$$H = \frac{h_i}{\delta} \cdot 100\% , \quad (1.1)$$

де H – глибина (розмір) дефекту по перерізу шва у напрямі променя просвічування, у %; h_i - глибина канавки еталона чутливості, схожа за затемненням з дефектом; δ - товщина металу, що контролюється, мм.

Розміром дефекту вважається найбільша довжина його зображення на знімку у міліметрах. За наявності групи дефектів різних розмірів одного виду вказується розмір дефекту в групі, що має перевагу.

Гама- і рентгеноскопічні методи контролю проводяться у відповідності з вимогами ГОСТ 7512-82 із застосуванням різноманітних приладів і обладнання, яке потребує суворого дотримання техніки безпеки.

1.5 Ультразвуковий контроль

Контроль ультразвуком має значні переваги перед рентгено- і гамаграфуванням своєю простотою і незначною вартістю. Для контролю у відповідності до роботи [3] використовують ультразвукові хвилі, які являють собою механічні коливання пружного середовища переважно з частотою 0,8; 1,8; 2,5 та 3,5 МГц. При цьому використовують здатність ультразвукових хвиль проникати в метал на значну глибину і відбиватися від неметалевих

включень або порожнин, що знаходяться в металі.

При ультразвуковому контролі визначається умовна протяжність, глибина і координати розташування дефекту у зварних з'єднаннях резервуарів із вуглецевої і низьколегованої сталей, виконаних ручним електродуговим зварюванням металевими електродами, автоматичним або напівавтоматичним зварюванням під шаром флюсу.

Ультразвуковим методом здійснюється контроль наступних з'єднань: зварних з'єднань листових конструкцій з товщиною елементів 4-20 мм, що зварюються у стик; кутових зварних з'єднань листових конструкцій з товщиною зварних елементів 4-20 мм; зварних з'єднань листових конструкцій з товщиною елементів 4-20 мм, зварених внапусток.

Ультразвуковий контроль здійснюється після усунення дефектів, виявлених при зовнішньому огляді, в об'ємі, обумовленому вимогами СНиЛ 111-3.03.01-87, а для експериментальних резервуарів – в об'ємі, передбаченому їх проектом.

1.6 Магнітографія

Магнітографія – один із методів спектромагнітної дефектоскопії. Принцип магнітографічного контролю ґрунтується на записі магнітних полів розсіювання на феромагнітну стрічку. Стрічку з записами протягують коло щілини магнітної головки відтворюючого електронного приладу. У ньому виникає електричний сигнал, який через підсилювач подається на вертикальні пластини електронно-променевої трубки і викликає на екрані відхилення променя від середньої лінії. Форма кривої (імпульсна) відображає характер та розміри дефекту. Якщо дефект відсутній, імпульс буде також відсутній і на екрані буде тільки лінія горизонтальної розгортки.

Ділянки зварних швів на резервуарі, що підлягають контролю, ретельно

оглядаються і робиться розмітка крейдою. Відмічені ділянки та їх розміри заносяться на ескіз-розгортку корпусу резервуара. Стрічку накладають на шов емульсійним шаром вниз з таким розрахунком, щоб шов знаходився посередині стрічки. Стрічка прикріплюється до корпусу резервуара лейкопластиром через проміжки 100-150 мм.

Сила струму для намагнічування металу вибирається у відповідності до його товщини.

Можливість встановлення змін технічного стану резервуарів на ранній стадії їх виникнення обумовлена повільним протіканням процесу зниження працездатності. Наприклад, встановлено, що зниження працездатності стінки резервуара у зв'язку з корозією відбувається на протязі часу, що перевищує в декілька разів інтервали між обстеженнями і дефектоскопією. Виняток складають руйнування корпусу від утворення крихких тріщин.

1.7 Акустико-емісійний контроль

Метод акустичної емісії (АЕ), як вказано у роботах [4, 5], заснований на реєстрації й аналізі акустичних хвиль, що виникають у процесі пластичної деформації й руйнування (росту тріщин) контрольованих об'єктів. Це дозволяє формувати адекватну систему класифікації дефектів і критерії оцінки стану об'єкта, засновані на реальному впливі дефекту на об'єкт. Іншим джерелом АЕ контролю є витікання робочого тіла (рідини чи газу) через наскрізні отвори в контрольованому об'єкті.

Характерними рисами методу АЕ контролю, що визначають його можливості й область застосування, є наступні:

–метод АЕ-контролю забезпечує виявлення і реєстрацію дефектів, які тільки розвиваються, що дозволяє класифікувати дефекти не за розмірами, а за ступенем їхньої небезпеки;

–метод АЕ контролю має дуже високу чутливість до зростаючих дефектів - дозволяє виявити в робочих умовах збільшення тріщини порядку часток мм. Гранична чутливість акустико-емісійної апаратури за теоретичними оцінками складає порядку 10^{-6} мм², що відповідає виявленню стрибка тріщини довжиною 1 мкм на величину 1 мкм;

–властивість інтегральності методу АЕ контролю забезпечує контроль всього об'єкта з використанням одного чи декількох перетворювачів АЕ контролю, нерухомо встановлених на поверхні об'єкта;

–метод АЕ дозволяє проводити контроль різних технологічних процесів і процесів зміни властивостей і стану матеріалів;

–положення й орієнтація об'єкта не впливає на виявлення дефектів;

–метод АЕ має менше обмежень, пов'язаних із властивостями і структурою матеріалів;

–контроль зон недоступних для інших методів (тепло- і гідроізоляція, конструктивні особливості);

–запобігання катастрофічних руйнувань конструкцій при випробуваннях і експлуатації за рахунок оцінки швидкості розвитку дефектів;

–визначення місць теч;

–особливістю методу АЕ, що обмежує його застосування, є в ряді випадків труднощі виділення сигналів АЕ з перешкод. Це пояснюється тим, що сигнали АЕ є шумоподібними, оскільки АЕ є стохастичний імпульсний процес. Тому, коли сигнали АЕ малі по амплітуді, виділення корисного сигналу з перешкод являє собою складну задачу.

При розвитку дефекту, коли його розміри наближаються до критичного значення, амплітуда сигналів АЕ і темп їхньої генерації різко збільшується, що приводить до значного зростання імовірності виявлення такого джерела АЕ.

Метод АЕ може бути використаний для контролю об'єктів при їхньому

виготовленні, у процесі приймальних випробувань, при періодичних технічних оглядах, у процесі експлуатації.

Метою АЕ контролю згідно [2] є виявлення, визначення координат і спостереження (моніторинг) за джерелами акустичної емісії, пов'язаними з несутцільностями на поверхні чи в об'ємі стінки об'єкта контролю, зварного з'єднання і виготовлених частин та компонентів. Всі індикації, викликані джерелами АЕ, повинні бути при наявності технічної можливості оцінені іншими методами неруйнівного контролю. АЕ метод може бути використаний також для оцінки швидкості розвитку дефекту з метою завчасного припинення випробувань і запобігання руйнування виробу. Реєстрація АЕ дозволяє визначити утворення свищів, наскрізних тріщин, протікань в ущільненнях, заглушках і фланцевих з'єднаннях.

АЕ контроль технічного стану обстежуваних об'єктів проводиться тільки при створенні в конструкції напруженого стану, що ініціює в матеріалі об'єкта роботу джерел АЕ. Для цього об'єкт піддається навантаженню силою, тиском, температурним полем і т.д. Вибір виду навантаження визначається конструкцією об'єкта й умовами його роботи, характером випробувань і приводиться в "Програмі робіт з АЕ контролю об'єктів".

Порівняльна оцінка методів неруйнівного контролю (НК) і методу акустичної емісії наведено у табл.1.1.

Метод акустичної емісії забезпечує прийом інформації з тих недоступних місць, до яких неможливо підійти з дефектоскопами; які скриті під шаром ізоляції; які працюють при високих і низьких температурах. Контроль всіх об'єктів здійснюється одночасно і безперервно, дозволяє силами одного оператора здійснити вивчення і аналіз ситуації в цілому.

Таблиця 1.1 – Порівняльна оцінка методів неруйнівного контролю (НК) і методу акустичної емісії

Традиційні методи НК	Метод акустичної емісії
Велика трудомісткість підготовчих робіт і контролю	Трудомісткість підготовчих робіт і контролю в десятки (сотні) разів менша
Неможливість розпізнавання дефектів, що розвиваються під дією експлуатаційних навантажень	Виявляються найбільш небезпечні (що розвиваються під дією експлуатаційних навантажень) види дефектів
Для проведення контролю потрібне припинення експлуатації об'єкта	Контроль може здійснюватися в умовах реальної експлуатації чи при впливі еквівалентних випробних навантажень

Сучасні системи АЕ діагностики дозволяють реєструвати і накопичувати в пам'яті комп'ютера великий обсяг даних в процесі досліджень, а потім, після закінчення досліджень, проводити їх багаторазовий віртуальний повтор, що забезпечує можливість усестороннього глибокого аналізу отриманих результатів.

Але найважливішою особливістю АЕ діагностики є можливість виявлення небезпечної ситуації безпосередньо в процесі випробування, часто

на тій стадії, коли локальне руйнування об'єкту, протікання чи інший дефект тільки починає формуватися. Це робить АЕ діагностику незамінним інструментом попередження аварій.

Досвід останніх десятиріч показав великі потенційні можливості методу АЕ, який дозволяє оцінювати динаміку розвитку дефектів та міцнісні властивості матеріалів під час експлуатації об'єктів без порушення їх цілісності. Він вигідно відрізняється від інших неруйнівних методів можливістю дистанційного контролю всього об'єму матеріалу виробу незалежно від його форми та розмірів, має високу чутливість, що дає змогу отримати інформацію про руйнування на відстанях, які на порядки перевищують розміри первинних перетворювачів і величину дефектів, які розвиваються.

Контроль АЕ об'єктів застосовують у наступних випадках.

1. При проведенні гідравлічних випробувань водою чи рідким робочим продуктом.

2. При проведенні пневматичних випробувань стисненим повітрям чи інертним газом таких об'єктів:

- з торкрет-бетонною футерівкою;
- посудин, заповнених адсорбентом чи каталізатором;
- великогабаритних і крупнотонажних, коли існує небезпека порушення цілісності фундаменту чи коли міцність фундаменту не забезпечується за умови проведення гідравлічних іспитів;

- посудин, заповнення яких водою забороняється технологічним регламентом чи технічними умовами;

- шкідливих речовин, що експлуатуються під тиском, (рідких чи газоподібних) 1,2,3,4 класів небезпеки за ДСТ 12.1.007.

3. При технічному огляді чи технічному діагностуванні, коли зовнішній, внутрішній огляди і контроль стінок ультразвуковим чи іншим методами

утруднений.

4. При необхідності оцінки ступеня небезпеки виявлених іншими методами неруйнівного контролю дефектів і впливу їх на працездатність конструкції.

5. За вимогою органів нагляду.

До основних переваг даного методу належить в першу чергу те, що оперативно відбувається контроль всього ОК в цілому. При цьому нема необхідності готувати для контролю всю поверхню ОК. Достатньо зачистити декілька невеличких ділянок його поверхні, площа яких не перевищує 1 дм². Наступні переваги: можливість виявлення небезпечної ситуації безпосередньо в процесі випробування, часто на тій стадії, коли дефект тільки починає формуватися; прийом інформації з недоступних місць; можливість дистанційного контролю всього об'єму матеріалу виробу незалежно від його форми та розмірів; висока чутливість; можливість реєструвати і накопичувати в пам'яті комп'ютера великий обсяг даних випробувань.

Недоліком цього способу є залежність сигналу від частоти, що вносить похибку при зміні спектру сигналу і нерівномірність амплітудно – частотних характеристик на поверхні об'єкта. Слід зазначити, що прилади амплітудної локації і локації за напрямом практично не використовуються в науково – дослідних цілях головним чином через високу спеціалізацію галузі.

Наявність великої кількості способів вимірювань і схемних вирішень говорить про відсутність на даний час усталеного уявлення про оптимальний підхід до знаходження координат джерел акустичної емісії.

1.8 Вибір методу та постановка задачі на магістерську роботу

За останні роки в промисловості розвинутих країн відбулася зміна стратегії технічного обслуговування обладнання. Від профілактичного технічного обслуговування провідні компанії перейшли до попереджувального

технічного обслуговування.

Попереджувальне технічне обслуговування являє собою метод забезпечення безпечної безперервної експлуатації обладнання на основі отримання і аналізу об'єктивних інструментальних даних про його фактичний технічний стан (додаток Б). Для обладнання нафтохімічних виробництв основними джерелами цих даних є комплекси АЕ моніторингу ємкісного обладнання. Комплексами моніторингу потенційні дефекти виявляються на ранніх стадіях їх розвитку, що дозволяє своєчасно виконати програму компенсуючих заходів для запобігання можливій аварії чи позаплановій зупинці виробництва. Таким чином, у відповідності з стратегією попереджувального обслуговування обладнання воно допускається до експлуатації за його фактичним технічним станом, а компенсуючі заходи (зміна технологічного режиму чи ремонт) виконуються за необхідністю до настання критичної ситуації.

АЕ моніторинг являє собою безперервний процес реєстрації, обробки і локалізації джерел сигналів акустичної емісії, які з'являються в контрольованому об'єкті при виникненні і розвитку різноманітних дефектів. Він дозволяє безперервно слідкувати за розвитком потенційних дефектів і визначати в реальному часі ступінь їх небезпеки.

На відміну від інших методів НК, АЕ моніторинг є не скануючим, а глобальним. Один давач діаметром близько 20 мм може контролювати стан об'єкта на площі від кількох десятків до ста квадратних метрів. Таким чином перевіряються не окремо, часто довільно вибрані невеликі ділянки об'єкта, а весь об'єкт.

Використання АЕ моніторингу в процесі функціонування обладнання дозволяє контролювати розвиток навіть тих дефектів, виявити які традиційними методами НК неможливо. Це дає можливість експлуатувати об'єкти моніторингу за їх фактичним технічним станом, тобто обґрунтовано виключити

зупинки виробництва для періодичних обстежень, та оптимально планувати ремонтні роботи. Завдяки виключенню впливу перехідних процесів при зупинці і пуску обладнання зберігається його ресурс.

В більшості випадків затрати на впровадження АЕ моніторингу менші фінансових втрат навіть від однієї зупинки виробництва [14].

Метою магістерської роботи є розробка системи для контролю стану резервуарів нафтопродуктів.

Задачами даної магістерської роботи є:

- 1) вибір оптимального методу контролю резервуарів нафтопродуктів;
- 2) теоретичне обґрунтування вибраного методу контролю;
- 3) розробка структурної схеми системи контролю стану резервуарів нафтопродуктів;
- 4) розробка електричної принципової схеми системи контролю стану резервуарів нафтопродуктів;
- 5) розробка конструкції блоку первинної обробки сигналів системи контролю стану резервуарів нафтопродуктів;
- 6) розробка конструкції первинного перетворювача системи контролю стану резервуарів нафтопродуктів;
- 7) розробка алгоритму функціонування системи контролю стану резервуарів нафтопродуктів;
- 8) розробка методики роботи із системою контролю стану резервуарів нафтопродуктів;
- 9) проведення метрологічного аналізу розробленої системи і оцінка достовірності отримуваних нею результатів;

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ РЕЗЕРВУАРІВ НАФТОПРОДУКТІВ

2.1 Теоретичне обґрунтування вибраного методу контролю

2.1.1 Поширення хвиль акустичної емісії в півпросторі від дії симетричного локального джерела випромінювання

Питаннями розрахунку хвильових процесів, що виникають при локальних перебудовах структури матеріалів, почали займатися в 1960-1970-х рр. У зв'язку з невеликою потужністю обчислювальних засобів великі зусилля було витрачено на вибір прийнятних методів розрахунку. Увагу аналітиків привабила теорія узагальненого променя, яка застосовувалась при розрахунку сейсмічних процесів в геофізичних задачах. Розв'язок спрощували, оскільки не було необхідності розв'язувати динамічну задачу теорії пружності в загальній постановці. В цій теорії пружні хвилі, які поширюються по різних траєкторіях внаслідок багатократних відбивань і заломлень, розраховували за геометричними траєкторіями залежно від точки, в якій потрібно отримати результат розрахунку. Узагальнене значення впливу хвилі на матеріал підраховували шляхом інтегрування по променю. Для розв'язування цієї задачі вводилось також припущення, що хвиля, яка рухається, може бути представлена у вигляді кінцевої суми плоских хвиль, що одночасно проходять через джерело у всіх напрямках. Кожній плоскій хвилі приписувалась своя амплітуда. Плоскі хвилі сумувалися у всіх напрямках шляхом інтегрування по параметру. Сумування прямих, відбитих і заломлених плоских хвиль проводилося по всьому їх шляху аж до точки, в якій треба було визначити результат їх дії. Спрощення загальної теорії призвело до сильного загромодження розрахунків. Дослідження хвильових процесів із застосуванням теорії узагальненого променя дозволило вирішити кілька окремих задач у дуже спрощеному варіанті. Подальші розробки в цьому напрямку показали

необхідність розв'язку загальної задачі теорії пружності.

Локальний дефект, який виник у пластині, як вказано у роботі [4], у першому наближенні можна описати в циліндричних координатах початковими деформаціями $\varepsilon_z^*, \varepsilon_\theta^*, \varepsilon_r^*$ і γ_{rz}^* , які є функціями координат і часу. Використовуючи рівняння рівноваги для даного випадку

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

а також залежності

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda(e - e^*) + 2G(\varepsilon_r - \varepsilon_r^*) && ; \\ \sigma_\theta &= \lambda(e - e^*) + 2G(\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^*); && (2.2) \\ \sigma_z &= \lambda(e - e^*) + 2G(\varepsilon_z - \varepsilon_z^*) && ; \\ \tau_{rz} &= G(\gamma_{rz} - \gamma_{rz}^*) && , \end{aligned}$$

де $e = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z$ - сума відносних деформацій, отримаємо диференціальні рівняння для визначення переміщень u і w :

$$\begin{aligned} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial r} + G \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 2G \left(\frac{\partial \varepsilon_r^*}{\partial r} + \frac{\varepsilon_r^* - \varepsilon_\theta^*}{r} \right) + G \frac{\partial \gamma_{rz}^*}{\partial z} + \lambda \frac{\partial e^*}{\partial r}; \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 2G \frac{\partial \varepsilon_z^*}{\partial z} + G \left(\frac{\partial \gamma_{rz}^*}{\partial r} + \frac{\gamma_{rz}^*}{r} \right) + \lambda \frac{\partial e^*}{\partial z}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де u і w - переміщення вздовж радіуса r і по товщині z , м; $\lambda = \nu E / [(1 - \nu)(1 - 2\nu)]$ – постійна Ламе, Па; $G = E / [2(1 + \nu)]$ – модуль пружності при зсуві, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності при розтяганні, Па.

Розглянемо розв'язок рівнянь для випадку, коли $\varepsilon_r^* = \varepsilon_\theta^* = \varepsilon_z^* = \varepsilon^*$, а $\gamma_{rz}^* = 0$, тобто коли деформація в матеріалі утворилася у формі розриву з мікропереміщеннями, симетричними відносно його центру, що знаходиться в точці $(0, z_0)$ на рис.2.1. Механізм виникнення і розвитку деформацій в часі можна представити графіком, зображеним на рис.2.2.

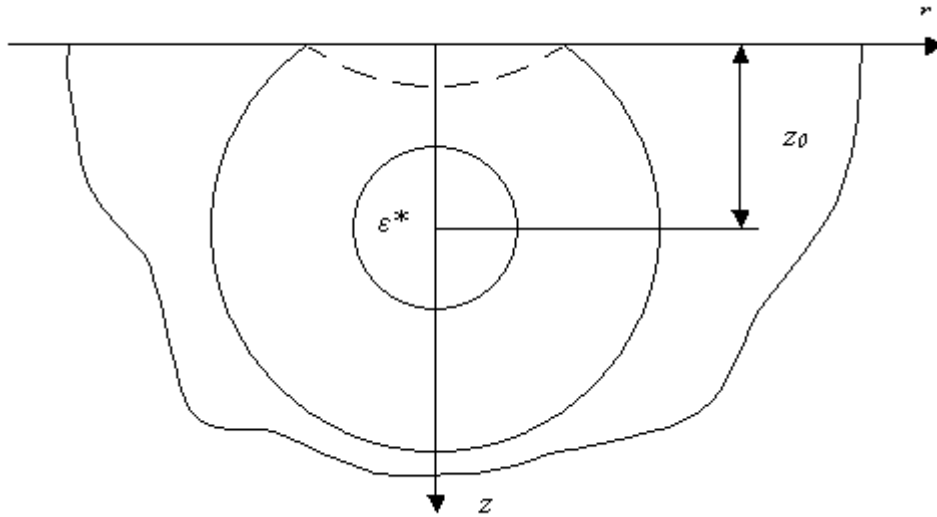


Рисунок 2.1 – Деформація матеріалу у формі розриву

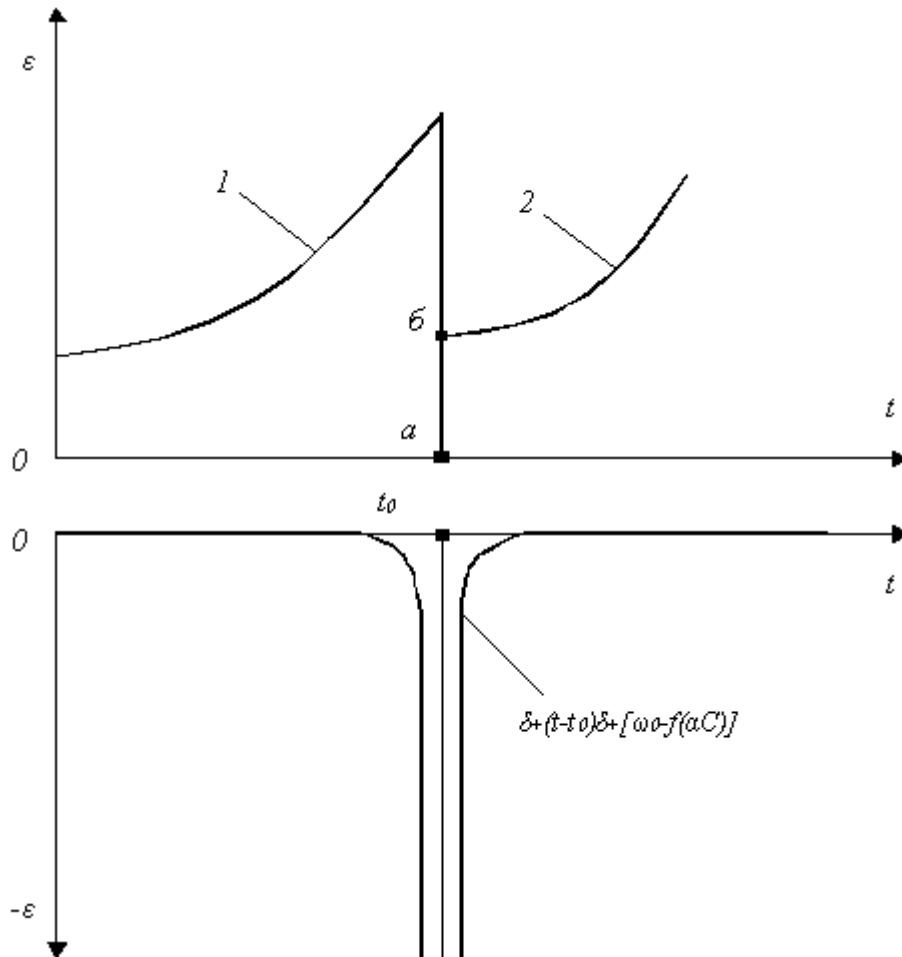


Рисунок 2.2 – Графік механізму виникнення і розвитку дефекту

Деформація ε^* монотонно розвивається від вихідного стану до того часу, поки в момент часу t_0 в найслабшому місці матеріалу (в точці $(0, z_0)$) не

утвориться розрив чи раптове зміщення, що характеризується швидким скиданням деформації в цьому місці до нуля (точка a , крива 1) чи до деякого мінімального на даний період часу значення (точка b , крива 2). На графіку рис.2.2 інтерес представляє лишень один момент часу t_0 , коли деформація стрибкоподібно змінює своє значення.

Процес деформування до моменту t_0 – монотонний і не вносить змін у розв’язок задачі. Динаміка виникає тільки в момент t_0 і може бути описана імпульсною функцією $\delta_+(t-t_0)$. Змістимо початок координат по часу в точку t_0 ; тоді розподілення об’єму ε_0^* , m^3 , що раптово змінився на глибині z_0 від поверхні пластини, по осях ординат і часу можна представити у вигляді добутку δ_+ -функцій:

$$\varepsilon^* = -\varepsilon_0^* \frac{\delta_+(r)}{2\pi r} \delta_+(z - z_0) \delta_+(t) \delta_+[\omega_0 - f(\alpha \cdot C)]. \quad (2.4)$$

Тут функція $\delta_+[\omega_0 - f(\alpha C)]$ вказує на зв’язок між круговою частотою ω_0 , $1/c$, і хвильовим числом α , $1/m$; функцію $f(\alpha C)$ знаходять із спектрального рівняння, від якого визначається граничними умовами.

Вираз (2.4) дозволяє ввести функцію переміщень і розділити кожне рівняння (2.3) на два простіші для розв’язку.

Використаємо теорему Гельмгольца, яка дозволяє представити векторне поле у вигляді двох складових – безвихрової і соленоїдальної частин:

$$F(R) = F_1(R) + F_2(R), \quad (2.5)$$

$$\nabla \times F_1(R) = 0; \quad \nabla F_2(R) = 0. \quad (2.6)$$

Умова (2.4) легко задовольняється, якщо представити функцію $F_1(R)$ у вигляді скалярного потенціалу деякої функції $\varphi(R)$, тобто

$$F_1(R) = \nabla \varphi(R), \quad (2.7)$$

а функцію $F_2(R)$ – у вигляді ротора деякої векторної функції $\psi(R)$:

$$F_z(R) = \nabla \times \psi(R). \quad (2.8)$$

Тоді повні переміщення $F(R)$ можна записати:

$$F(R) = \nabla \varphi(R) + \nabla \times \psi(R) \quad (2.9)$$

чи, розписавши цей вираз для осесиметричного випадку в циліндричних координатах,

$$u = F_r(R) = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_\theta}{\partial z};$$

$$w = F_z(R) = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(r\psi_z)}{\partial r} - \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta} \right]. \quad (2.10)$$

В циліндричних координатах можна спростити вирази (2.10), поставивши $\psi = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, -\frac{\partial \psi}{\partial r}, \chi \right]$. Тоді, враховуючи, що $\partial \psi / \partial \theta = 0$ і $\chi = 0$ (з врахуванням симетрії відносно осі z), отримаємо:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z};$$

$$w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2}. \quad (2.11)$$

Підставивши (2.11) в (2.3) і провівши перетворення з врахуванням вибраної моделі ($\varepsilon_r^* = \varepsilon_\theta^* = \varepsilon_z^* = \varepsilon^*$, $\gamma_{rz}^* = 0$), отримують:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \varepsilon^*;$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0, \quad (2.12)$$

де ε^* - “спалахова” деформація, визначена формулою (2.4);

C_1 і C_2 – швидкості поширення поздовжньої і поперечної хвиль:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad C_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}, \quad (2.13)$$

де ρ – густина.

Використовуючи формули (2.9) і рівняння (2.10) і враховуючи, що на межі $z=0$ і $\sigma_z=0$, після перетворень отримують:

$$\sigma_z = -2G \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right] = 0. \quad (2.14)$$

З даного рівняння одержують спектральне рівняння для півпростору:

$$\frac{\omega_0^2/2C_2^2 - \alpha^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2/2C_1^2}} + 2\alpha^2 \frac{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2/2C_2^2}}{2\alpha^2 - \omega_0^2/2C_2^2} = 0. \quad (2.15)$$

Це рівняння дозволяє встановити зв'язок між ω_0 і α і визначити вид функції $\delta_+[\omega_0 f(\alpha C)]$. Воно має єдиний дійсний розв'язок, коли $\omega_0 = \alpha C_3$, де C_3 – швидкість поширення хвилі Релея.

Підставивши в (2.15) $\omega_0 = \alpha C_3$, отримують:

$$(1 + \gamma_2^2)^2 - 4\gamma_1\gamma_2 = 0, \quad (2.16)$$

де $\gamma_1 = \sqrt{1 - C_3^2/C_1^2}$; $\gamma_2 = \sqrt{1 - C_3^2/C_2^2}$.

Розв'язок рівняння (2.16) дає $C_3 = 0,927C_2$ при $\nu = 0,3$. Тоді можна записати: $f(\alpha C) = \alpha C_3$. Вираз (2.16) вказує на те, що в пластинах великої товщини поширюються тільки хвилі Релея в повному спектрі і, таким чином, інформація про дефект, що виник, передається без спотворення. Зі зменшенням товщини листа починає впливати друга межа $z = \delta$, і чим тонша пластина, тим більший цей вплив. З'являються хвилі Лемба, і пластина стає хвилеводом у відповідності зі своїми розмірами. В цьому випадку сигнал, отриманий від дефекту, надходить до датчика сильно спотвореним.

В той же час хвилі Релея можуть поширюватися і в порівняно тонких листах. Однак в цих випадках спектр частот, які переносяться, уже не відповідає одиничному імпульсу. З іншої сторони обмеження спектру здійснюється з нижньої сторони при малих α і великих довжинах хвиль:

$$\alpha = 2\pi/\lambda; \quad \alpha C_3 = 2\pi f, \quad (2.17)$$

де λ – довжина хвилі, м;

f – частота хвиль, 1/с.

Таким чином, в тонких пластинах без спотворення поширюються тільки високочастотні коливання.

Поширення хвиль деформацій в реальних умовах суттєво залежить від опору середовища, в якому вони утворилися. Вплив такого опору може бути двояким. З одного боку, пружна хвиля, поширюючись, зменшує свою амплітуду, а з другого, у зв'язку з тим, що опір пропорційний довжині хвилі, може з'явитися дисперсія з віддаленням хвилі від джерела випромінювання. В обох випадках величина опору переміщенню хвиль може суттєво вплинути на ефективність контролю процесів руйнування.

2.1.2 Аспекти відбору сигналу акустичної емісії

Сигнал акустичної емісії являється багатопараметричним. Зокрема його інформативними параметрами є сумарний рахунок імпульсів АЕ за час спостереження, інтенсивність потоку імпульсів, густина ймовірності розподілу інтервалів між суміжними імпульсами, моменти появи імпульсів на елементах п'єзоантени, енергетичні характеристики, серед яких – середнє значення амплітуди імпульсів, огинаюча сигналу, амплітудний розподіл, частотний спектр сигналу та інші.

Повне використання сигналу акустичної емісії передбачає наявність цілого комплексу спеціалізованих апаратурних засобів для його відбору і опрацювання. У роботі [15] розглянуто альтернативний підхід до відбору сигналу АЕ, який передбачає попередню дискретизацію сигналу, запам'ятовування, введення в ПЕОМ в режимі “off-line” з обробкою в реальному масштабі часу, чи в режимі “on-line” з наступною обробкою за відповідним алгоритмом. Він передбачає необхідність запам'ятовування великих масивів інформації. Рациональним методом формування масивів інформації є виділення і фіксація моментів появи імпульсів АЕ з подальшою дискретизацією тільки імпульсу протягом його існування чи його окремої

частини.

Внаслідок спотворення при поширенні, багатократного відбивання від бокових поверхонь (для взірців невеликих розмірів), при накладанні виникаючих при цьому нових типів хвиль і прийманні, реєстровані АЕ-сигнали сильно відрізняються від первинних акустичних імпульсів джерела і зазвичай мають вигляд достатньо довгих радіоімпульсів з затухаючою по експоненті амплітудою

$$U = U_0 \exp(-t/\tau_0), \quad (2.18)$$

де τ_0 – постійна часу післязвучання сигналу АЕ в контрольованому матеріалі і перетворювачі (зазвичай $\tau_0 \approx 10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ c}$);

U_0 – максимальне значення амплітуди коливань в імпульсі.

За момент появи імпульсу АЕ приймається момент перевищення сигналом порогового рівня U_n , який найчастіше вибирається з умови перевищення ним рівня акустичних і електричних шумів.

Амплітуда імпульсів АЕ випадково змінюється в широкому динамічному діапазоні ($>60 \text{ дБ}$) відповідно і їх тривалість з врахуванням (2.18)

$$x = \tau_0 \ln(U_0/U_n), \quad (2.19)$$

змінюється випадково. Результати досліджень показують, що густина ймовірності розподілу амплітуд в широкому динамічному діапазоні описується степеневою залежністю

$$p(U_0/U_n) = (m-1) \left(\frac{U_0}{U_n} \right)^{-m}, \quad (2.20)$$

де $1 < m < 3$, причому найчастіше $m=2$.

Враховуючи функціональну залежність (2.19), для густини ймовірності розподілу тривалості імпульсу можна отримати вираз

$$p(\xi) = \frac{(m-1)}{\tau_0} \exp\left(-\frac{m-1}{\tau_0} \xi\right). \quad (2.21)$$

Тоді математичне очікування тривалості буде:

$$|\xi| = \tau_0 / (m - 1), \quad (2.22)$$

а дисперсія

$$D_\xi = \tau_0^2 / (m - 1)^2. \quad (2.23)$$

Якщо динамічний діапазон реєстрованих сигналів рівний $20 \lg \frac{u_0}{u_n} = x$, то

максимально можлива тривалість імпульсу $\Delta t_{\max} = \tau_0 x \frac{\ln 10}{20}$, що при $X=40$ дБ складає $\Delta t_{\max} \approx 4,6\tau_0$.

Після виділення моменту появи імпульсу, важливо встановити момент його закінчення, щоб виключити можливість реєстрації хибних імпульсів внаслідок вимірювання коливань всередині окремого імпульсу.

Відповідно до одного з відомих підходів до проблеми виключення ймовірності реєстрації хибних імпульсів задаються інтервалом фіксованої тривалості $\Delta t_M = \text{const}$ (причому $\Delta t_M \geq \Delta t_{\max}$, інакше можлива реєстрація всередині імпульсу), пов'язаним з моментом появи імпульсу АЕ, на протязі якого вважається повинен існувати тільки один цей імпульс. Однак для цього випадку фіксованого стробу внаслідок випадковості довжин імпульсів і моментів їх появи існує відмінна від нуля ймовірність появи на протязі інтервалу Δt_M ще одного імпульсу АЕ. В допущенні пуассонового закону розподілу актів АЕ вона рівна:

$$P(2/\Delta t_M) = n^2 \Delta t_M^2 \exp(-n\Delta t_M). \quad (2.24)$$

При $\Delta t_M = \Delta t_{\max}$, інтенсивності $n = 200 \text{ c}^{-1}$, динамічному діапазоні амплітуд імпульсів 40 дБ і постійній часу $\tau_0 = 10^{-3} \text{ c}$ ймовірність рівна вже $P(2/\Delta t_M) \approx 0,17$.

Це призводить до зниження достовірності результатів експерименту. Так як математичне очікування довжини імпульсу АЕ з врахуванням (2.22) $|\xi| < \Delta t_M$, то тут має місце також неоптимальне використання часу вимірювання (більше необхідного).

Підвищення достовірності результатів експерименту і оптимальності часу вимірювання досягають введенням автоматичного керування тривалістю строби за законом $\Delta t = \tau_0 \ln(U_0/U_n)$, що виходить із співвідношення (2.18).

До недоліків даного методу слід віднести необхідність оперативного визначення максимального значення амплітуди коливань в імпульсі, а також необхідність апріорної інформації про постійну часу після звучання. Для випадку перекриття суміжних імпульсів АЕ для цього методу також існує відмінна від нуля ймовірність реєстрації хибних імпульсів.

Необхідно відмітити, що частотний спектр сигналів АЕ лежить в межах від кількох герц до кількох мегагерц. Однак при експериментальних дослідженнях методом акустичної емісії, як правило, використовується діапазон від 100 кГц до 2 МГц. Такий вибір обумовлений тим, що на низьких частотах до 100 кГц високий рівень по сторонніх акустичних шумів (механічні випробувальні машини, гідравлічні навантажуючі пристрої, вібраційні пристрої та ін.), а на високих частотах сильне затухання пружних хвиль в досліджуваних тілах. Звідси випливає, що частотна фільтрація, вибір оптимальної смуги пропускання фільтрів з врахуванням частотних властивостей перетворювача є важливою ланкою при відборі сигналів АЕ. Фільтри повинні мати чіткі границі смуги пропускання, зрізи верхніх f_v і нижніх f_n частот повинні бути індивідуально керовані.

Використання апріорної інформації про зріз нижніх частот f_n смуги пропускання дає можливість запропонувати метод визначення тривалості імпульсу, що базується на такому положенні: коливання в імпульсі АЕ не можуть мати період $\vartheta > T_{max} = 1/f_n$. Тоді достатньо здійснити ковзне порівняння періоду поточного коливання з величиною T_{max} . Якщо $\vartheta \leq T_{max}$, то імпульс ще не закінчився. Інформацією про закінчення імпульсу буде факт перевищення значення часу очікування чергового коливання величини T_{max} .

Враховуючи коливальний характер імпульсу АЕ, можна модифікувати

запропонований метод. Значення періоду поточного коливання ϑ_i порівнюють вже зі значенням попереднього періоду, помноженим на коефіцієнт, більше одиниці $k\vartheta_{i-1}$: якщо $\vartheta_i \leq k\vartheta_{i-1}$ - імпульс не закінчився і навпаки. Чим більший k , тим менша ймовірність прийняття хибного рішення про закінчення імпульсу АЕ. З практичних міркувань значення коефіцієнта доцільно обирати у вигляді $k=2^i$, де $i=1, 2, \dots$

Обидва ці методи особливо ефективні у випадку накладання двох імпульсів АЕ, виключаючи ймовірність реєстрації хибного імпульсу.

Важливим є питання про доцільність дискретизації всього імпульсу, що збільшує обсяг запам'ятовуваної інформації, чи досить обмежитися дискретизацією тільки окремої його частини. Тому необхідно відмітити, що через деякий час Δt_{om} після реєстрації моменту появи імпульсу АЕ в перетворювач починає надходити відбитий від бокових поверхонь сигнал. В процесі поширення пружні хвилі не тільки змінюють свою форму, але й затухають. Залежність коефіцієнта затухання від частоти коливань має квадратичний характер і приймає різні значення для поздовжньої і поперечної хвиль. Отже, у відбитому сигналі має місце спотворення спектру сигналу. Тому з точки зору інформативності і неспотвореності спектру сигналу його дискретизацію достатньо проводити тільки протягом часу $\Delta t_{om} \approx 2l_{min}/V_i$, де V_i – швидкість поширення поздовжньої хвилі, l_{min} – мінімальна відстань від перетворювача до відбиваючої поверхні, яка залежить від геометрії об'єкта і місцезнаходження перетворювача. Обсяг вибірки N_b тоді визначається відношенням $N_b T_d = \Delta t_{om}$, де період дискретизації вибирається з умови $T_d \leq 1/2f_e$. Далі достатньо проводити підрахунок кількості переходів сигналом порогу дискримінації.

2.1.3 Визначення координат джерел акустичної емісії

Місце розташування джерел АЕ варто визначати з заданою точністю з використанням багатоканальної системи локації або зонного контролю.

Точність багатоканальної локації повинна бути не менше величини, рівної двом товщинам стінки чи 5% відстані між перетворювачами акустичної емісії (ПАЕ) в залежності від того, яка величина більша. Визначення координат джерел АЕ сигналів роблять у режимі планарної локації, тобто без визначення глибини залягання джерела.

Похибки обчислення координат визначаються похибками вимірювання часу надходження сигналу на перетворювачі. Джерелами похибок є:

- похибка вимірювання часових інтервалів;
- відмінність реальних шляхів поширення від теоретично прийнятих;
- наявність анізотропії швидкості поширення сигналів;
- зміна форми сигналу в результаті поширення по конструкції;
- накладання за часом сигналів, а також дія декількох джерел;
- реєстрація перетворювачами хвиль різних типів;
- похибка вимірювання (задання) швидкості звуку;
- похибка задання координат ПАЕ.

Величину контрольованої площі при зонному контролі визначають границею поверхні об'єкта навколо ПАЕ, для якої загасання сигналу, що проходить від границі до ПАЕ, не перевищує 20 дБ.

Причиною отримання хибних координат може бути фіксація в різних каналах сигналів, породжених різними типами хвиль. Реальні джерела АЕ випромінюють, як правило, хвилі кількох типів, до яких чутливі перетворювачі. Різні швидкості поширення цих хвиль можуть призвести до того, що в опрацьовуваній серії будуть сигнали від хвиль різних типів.

Ще одним джерелом отримання хибних координат може бути затухання сигналів АЕ. При роботі на більш високих частотах затухання значне, тому ймовірна ситуація, коли сигнали буде реєструвати тільки найближчий до джерела перетворювач. В цьому випадку апаратурою також опрацьовуються

сигнали від різних джерел.

Хибні координати отримують і при обробці в локаційній серії окрім корисних також сигнали, викликані посторонніми шумами (перешкодами).

Отримання хибних координат призводить до грубих похибок вимірювань. Апріорний аналіз ймовірності таких помилок утруднений через складний характер АЕ і його залежність від великої кількості факторів. Наприклад, ймовірність отримати хибні координати через пропуск початку серії часового накладання серій визначається інтенсивністю АЕ і збільшується із зростанням останньої. А інтенсивність залежить від типу матеріалу, його термообробки, характеру і закону навантаження, прийнятого рівня дискримінації сигналів та інших факторів.

В основу визначення координат спалахів АЕ покладено вимірювання різниці часу приходу АЕ сигналів до датчиків, встановлених в певному порядку на поверхні конструкції. Реєстрація часу спрацювання АЕ датчиків починається після того, як спрацював перший, найближчий до спалаху АЕ датчик. Цей датчик запускає таймер і починається відлік часу, який фіксується і присвоюється кожному датчику, що спрацював.

Для полегшення і пришвидшення розрахунків датчики об'єднуються спеціальні антени. Зазвичай такі антени нараховують чотири датчики, що забезпечує найоптимальніші умови роботи. Число вимірювальних антен може бути будь-яким і визначається конкретними задачами контролю. Найтиповішою конфігурацією апаратури є системи з незначним числом вимірювальних каналів (8-12). Збільшення числа каналів призводить до незручностей в обслуговуванні через велику кількість з'єднувальних проводів і датчиків, що вимагають спеціального зберігання і обслуговування. Антени датчиків встановлюються на різних поверхнях конструкцій і в залежності від їх виду називаються лінійними, плоскими, циліндричними, сферичними та ін. В кожному з таких випадків вибирається найефективніший порядок розміщення датчиків.

Антени з розміщенням датчиків на одній лінії встановлюють на конструкціях, що мають переважаючі розміри вздовж одного напрямку. Тоді формули для визначення координат джерел виникаючої АЕ отримують в результаті наступних міркувань, запозичених з роботи [1].

Нехай датчики АЕ розміщені в точках D_1 і D_2 об'єкта (рис.2.3). Відстань b між ними називають базою вимірювання. Якщо на лінії D_1-D_2 в точці A на відстані x від першого датчика виник спалах АЕ, і величина $x < b-x$, то першим спрацює датчик D_1 , а через деякий час $\Delta t_{1,2}$, що називається різницею часу приходу сигналу АЕ до першого і другого датчиків, - датчик D_2 . Зрозуміло, що

$$2x + C\Delta t_{1,2} = b, \quad (2.25)$$

де C – швидкість поширення пружної хвилі в матеріалі конструкції. Звідси

$$x = \frac{b - C\Delta t_{1,2}}{2}. \quad (2.26)$$

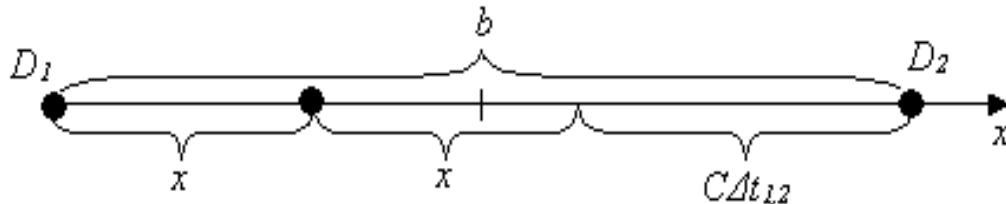


Рисунок 2.3 – Розрахунок координат АЕ лінійною антеною датчиків

Якщо використовувати дві взаємно перпендикулярні лінійні антени (рис.2.4) з двох датчиків кожна ($D_1 - D_2$ і $D_3 - D_4$), то наявність другої антени дозволить визначити координати джерела, що діє на віддалі від лінії $D_1 - D_2$.

Якщо для зручності відліку початок координат перенести в центр лінії $D_1 - D_2$, отримаємо:

$$x_1 = \frac{b}{2} - \frac{b - C\Delta t_{1,2}}{2} = \frac{C\Delta t_{1,2}}{2}. \quad (2.27)$$

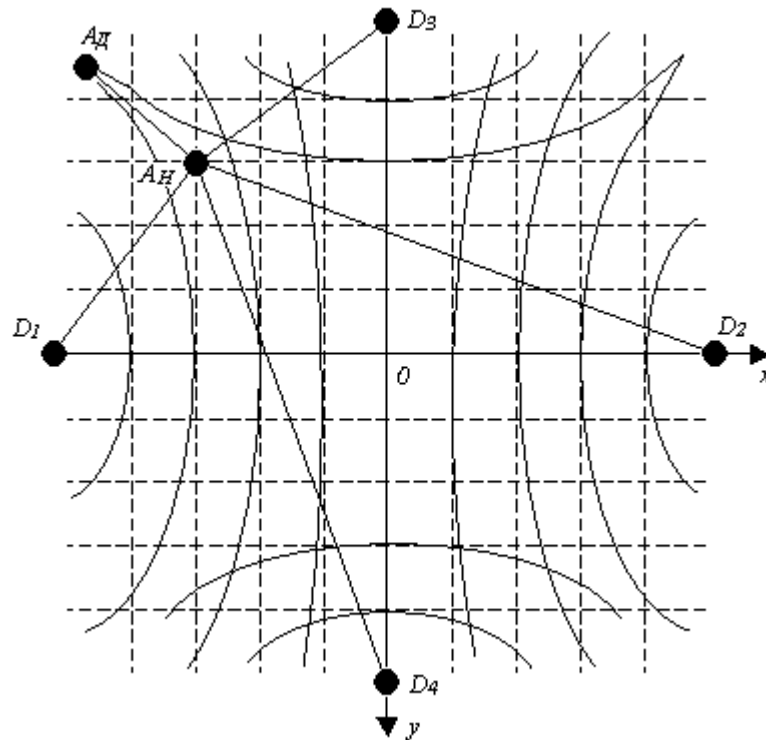


Рисунок 2.4 – Розрахунок координат АЕ на площині двома лінійними антенами

Знаючи швидкість поширення пружної хвилі і час $\Delta t_{1,2}$, можна визначити координати джерела АЕ. Якщо ж джерело розміщене не на лінії D_1-D_2 , то при розрахунку його координати за формулою (2.26) чи (2.27) виникає похибка, яка тим більша, чим далі від лінії D_1-D_2 чи (при однакових відстанях) чим ближче до одного з датчиків знаходиться джерело випромінювання.

Використовуючи наведені вище виклади для координати x , за аналогією можна отримати таку ж формулу для координати y . Тоді, якщо відлік координат здійснювати від центру антени, то для сумісної дії двох взаємно перпендикулярних антен на площині отримують:

$$x = \frac{C\Delta t_{1,2}}{2}; y = \frac{C\Delta t_{3,4}}{2}. \quad (2.28)$$

Квадрант розміщення джерела АЕ визначається номерами датчиків кожної антени, які спрацювали першими.

З рис.2.4 видно, що помилка розрахунку координат джерел АЕ значною мірною залежить від місця його фактичного розміщення на площині (точка A_D – дійсне місцезнаходження джерела АЕ, точка A_H – наближене). Ця помилка тим більша, чим далі цей сигнал від центру антени і ближче до діагоналі квадранту, в якому відбувається вимірювання.

Розрахунок координат сигналів АЕ на площині може бути виконаний точно, використовуючи рис.2.5.

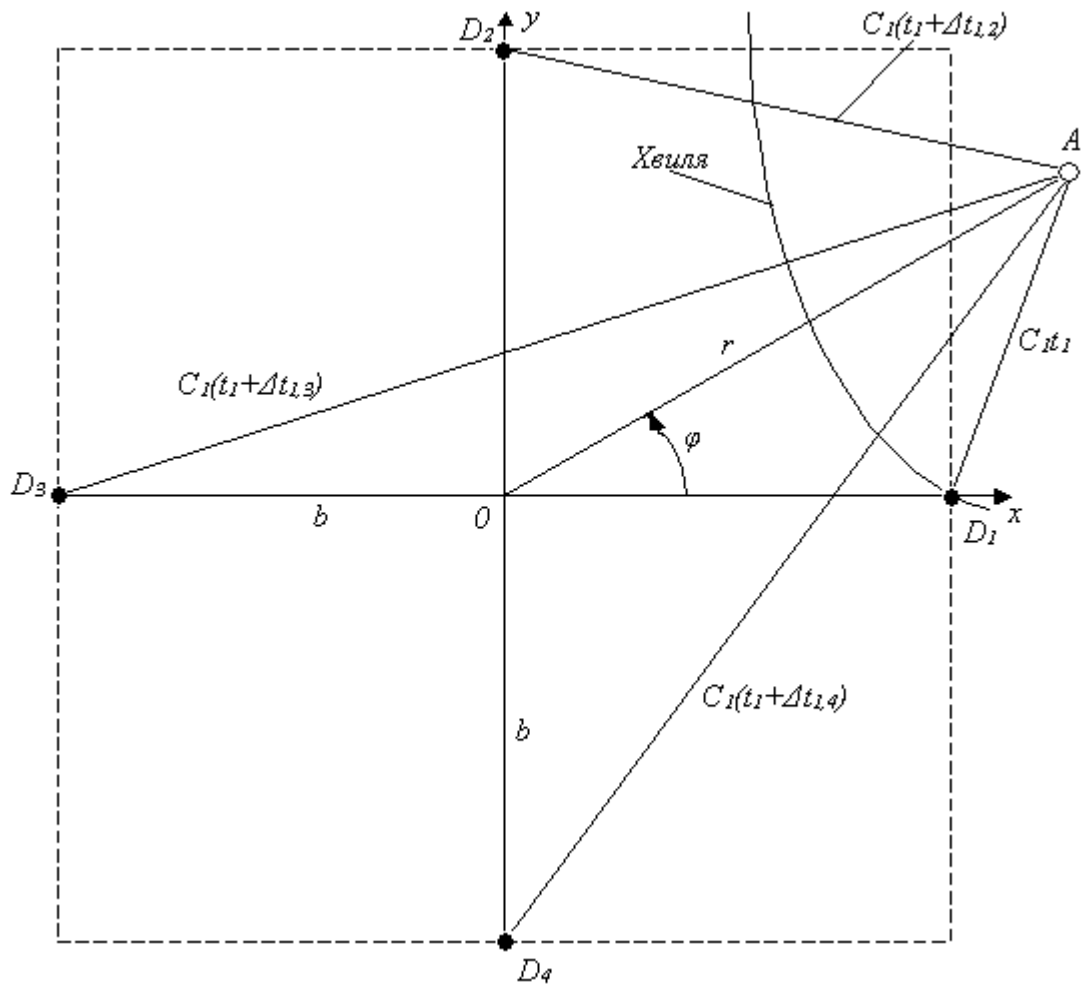


Рисунок 2.5 – Точний розрахунок координат АЕ на площині чотирма датчиками

Для отримання розрахункових залежностей використовують теорему косинусів для косокутного трикутника. Тоді можна записати:

$$\begin{aligned}
 C^2 t_1^2 &= b^2 + r^2 - 2rb \cos \varphi && ; \\
 C^2 (t_1 + \Delta t_{1,2})^2 &= b^2 + r^2 - 2rb \cos(90 - \varphi) && ; \\
 C^2 (t_1 + \Delta t_{1,3})^2 &= b^2 + r^2 - 2rb \cos(180 - \varphi); && (2.29) \\
 C^2 (t_1 + \Delta t_{1,4})^2 &= b^2 + r^2 - 2rb \cos(90 + \varphi) && ,
 \end{aligned}$$

де t_1 – час приходу пружної АЕ хвилі до датчика вимірювальної антени, який спрацював першим; $\Delta t_{1,2}$, $\Delta t_{1,3}$, $\Delta t_{1,4}$ – додатковий час поширення хвилі АЕ від фронту “хвиля” до кожного з датчиків у групі 2,3,4.

Розв’язуючи рівняння відносно r , t_1 і φ , після перетворень отримують:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \frac{\Delta t_{1,2}^2 + \Delta t_{1,4}^2 - \Delta t_{1,3}^2}{2(\Delta t_{1,3} - \Delta t_{1,4} - \Delta t_{1,2})} && ; \\
 r &= \sqrt{\frac{C^2(2t_1^2 + 2t_1\Delta t_{1,3} + \Delta t_{1,3}^2) - 2b^2}{2}}; && (2.30) \\
 \varphi &= \arccos\left(\frac{b^2 + r^2 - C^2 t_1^2}{2rb}\right) .
 \end{aligned}$$

В деяких випадках представляє цікавість розрахунок координат віддалених від антени джерел випромінювання. При локації сигналів АЕ описаними способами виникають значні помилки. В таких випадках стають конкурентноздатними і можуть бути застосовані формули так званої “цілевказівки” – напрямку на випромінююче джерело по відношенню до бази вимірювальної антени. В цих випадках координати джерела можна визначити як точку перетину цілевказівок двох антен. Такі антени можуть виконувати дві функції: визначати координати АЕ всередині прямокутників вимірювань і разом з другою антеною, розміщеною на деякій відстані від першої,

визначати координати джерела за межами вимірювального прямокутника.

Визначення координат спалахів АЕ на сферичній поверхні спрощується за рахунок особливостей сфери, де найкоротша відстань між будь-якими двома точками визначається геодезичними лініями. Тому в якому б місці поверхні сфери не виник спалах АЕ поширення хвилі, викликане ним, буде проходити по геодезичних лініях, які з'єднують точку спалаху з найближчими датчиками.

Слід відмітити, що всі наведені вище формули не враховують неоднозначності визначення координат в замкнених для руху хвилі конструкціях. Визначення координат джерел АЕ для конструкцій з циліндричними, сферичними та іншими замкненими поверхнями здійснюється застосуванням різноманітних прийомів, таких як виділення обмеженої зони контролю, фіксація датчика, який спрацював першим, установка додаткових датчиків-індикаторів зони виникнення спалаху АЕ та інші заходи. Для уникнення дублювання розрахункових формул застосовують метод циклічної перестановки індексів у значеннях часу приходу сигналів до датчиків АЕ, де першим стає датчик, який першим прийняв сигнал АЕ.

2.2 Розробка акустико-емісійної системи для контролю стану резервуарів

2.2.1 Розробка структурної схеми акустико-емісійної системи для контролю стану резервуарів

Акустико-емісійна система повинна включати: комплект перетворювачів АЕ; блоки підсилювачів, попередньої обробки і перетворення сигналів АЕ; ЕОМ із необхідним програмним забезпеченням; засоби візуального відображення інформації; засоби для калібрування системи.

Апаратура повинна мати можливість застосування різних типів

перетворювачів (направлених, широко- і вузькосмугових) залежно від типу об'єкта.

АЕ система повинна забезпечувати реєстрацію подій, вимірювання та обробку їх параметрів, розрахунок місцезнаходження дефектів, будувати графіки, таблиці, гістограми, а також проводити документування, забезпечувати довгострокове збереження інформації.

АЕ система повинна забезпечувати як оперативну обробку і відображення інформації в режимі реального часу, так і обробку, відображення та виведення інформації на периферійні пристрої для документування накопичених протягом випробування даних.

До такої інформації відносяться:

- номери груп перетворювачів АЕ, що зареєстрували імпульс АЕ, або номер ПАЕ;
- координати кожного зареєстрованого імпульсу АЕ (у режимі зонного контролю це не потрібно);
- амплітуда імпульсу АЕ (амплітудний розподіл АЕ процесу);
- енергія імпульсів акустичної емісії, або "MARSE" (Measured Area of the Rectified Signal Envelope - Вимірювана площа під огинаючою сигналу), або інший енергетичний параметр;
- число викидів (перевищень сигналом рівня дискримінації);
- часові характеристики сигналу;
- параметри навантаження, при яких зареєстрований імпульс АЕ (тиск, чи деформація, температура);
- час реєстрації імпульсу;
- значення різниці часів приходу (РЧП) сигналів (у режимі зонного контролю це не потрібно);

До АЕ систем пред'являються наступні загальні технічні вимоги, підтвержені каліброваним сертифікатом на апаратуру:

- робочий частотний діапазон від 10 кГц до 500 кГц;

- нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в межах частотного діапазону не більш ± 3 дБ;

- коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача 20-60 дБ;

- коефіцієнт підсилення основного підсилювача 0-40 дБ зі східчастим регулюванням через 1 дБ;

- амплітудний динамічний діапазон попереднього підсилювача не менше 70 дБ; динамічний діапазон вимірювання амплітуди сигналів АЕ не менше 60 дБ;

- АЕ система повинна забезпечувати можливість вирівнювання чутливості вимірювальних каналів, щоб відмінності не перевищували ± 1 дБ.

АЕ система повинна забезпечувати відбраковування помилкових подій, реалізовану як на апаратному, так і на програмному рівнях.

Системна частина програми повинна забезпечувати зручності спілкування оператора з ЕОМ, введення наказів завдання і зміни параметрів у діалоговому режимі обробки.

Структурна схема системи АЕ контролю включає в себе перетворювачі акустичної емісії ПАЕ, підсилювачі П, фільтри Ф, селектор С, аналогово-цифровий перетворювач АЦП та персональний комп'ютер ПК з підключеними периферійними пристроями для виведення інформації – монітором М та принтером П (МР.МТм- .00.00.000 С1).

Система працює наступним чином. Сигнал АЕ з виходу перетворювача акустичної емісії поступає на вхід підсилювача, з виходу якого через фільтр – на входи селектора та блоку АЦП. Комп'ютер проводить почергове опитування датчиків. Отримана інформація опрацьовується комп'ютером і виводиться на периферійні пристрої (монітор, принтер).

Розроблено складальне креслення блоку обробки сигналів (МР.МТм- .00.00.000 СК).

2.2.2 Розробка електричної принципової схеми акустико-емісійної системи для контролю стану резервуарів

У відповідності до розробленої структурної схеми розробляють схему електричну принципову (МР.МТм- .01.00.000 ЕЗ). Зокрема, вибирають підсилювач, фільтр, для якого виконують розрахунок, аналогово-цифровий перетворювач та стабілізатор напруги.

Схема вибіркового підсилювача з подвійним Т-подібним фільтром в ланці від'ємного зворотного зв'язку (рис. 2.6).

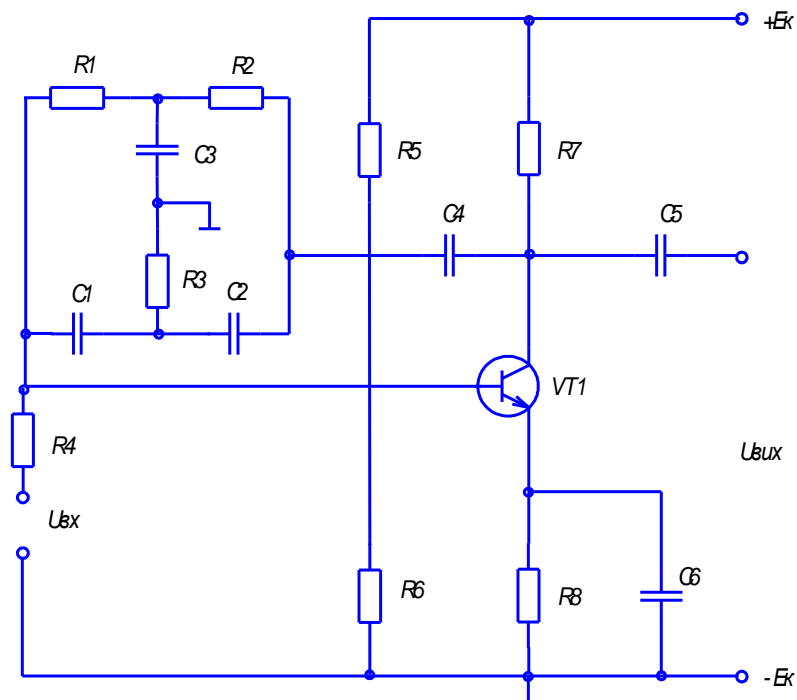


Рисунок 2.6 – Схема вибіркового підсилювача з подвійним Т-подібним мостом

На квазірезонансній частоті f_0 фільтр вносить максимальне згасання в сигнал, що проходить з виходу на вхід. Тому глибина від'ємного зворотного зв'язку практично рівна нулю і підсилення сигналу виявляється максимальним. На частотах, які відрізняються від квазірезонансної, згасання, яке вноситься

фільтром, зменшується. При цьому підсилюється від'ємний зворотний зв'язок і відповідно зменшується підсилення сигналу. Частотна характеристика такого підсилювача нагадує резонансну характеристику коливального контуру, і, відповідно, дана схема за своїми властивостями схожа на вибірковий підсилювач з навантаженням у вигляді коливального контуру. Щоб виключити вплив малого внутрішнього опору джерела вхідної напруги на фільтр, між входом підсилювача і фільтром включають розв'язуючий резистор R_4 опором (1...2) МОм.

Вибіркові підсилювачі характеризуються наступними основними технічними показниками: коефіцієнтом підсилення K ; вибірковістю d - величиною ослаблення підсилюваного сигналу при заданому розстроюванні; смугою пропускання $2\Delta f$; величиною спотворення сигналу; діапазоном частот $f_{min} \dots f_{max}$ - у випадку діапазонного підсилювача чи середньої частоти f_0 ; смугою пропускання – для підсилювачів з фіксованою настройкою.

Вимоги до вибіркових підсилювачів залежать від їх конкретного призначення, але в основному зводяться до того, що коефіцієнт підсилення повинен бути достатньо великим, а підсилювач забезпечувати необхідну вибірковість при достатній ширині смуги пропускання; спотворення сигналів не повинні перевищувати допустимої величини; підсилювач повинен працювати стійко, тобто не самозбуджуватися і мати параметри, що мало змінюються в процесі експлуатації; діапазонні підсилювачі повинні забезпечувати настройку на будь-яку частоту в межах заданого діапазону. При цьому їх якісні показники в усьому діапазоні повинні задовольняти пред'явлені до них вимоги.

Схема застосовується в основному на низьких частотах і являє собою транзисторний підсилювач низької частоти, охоплений достатньо глибоким від'ємним зворотним зв'язком. Тому розрахунок схеми зводиться до проектування підсилювача низької частоти без зворотного зв'язку, а потім до визначення параметрів Т-подібного фільтра, включеного в ланку зворотного

зв'язку. При цьому може виявитися, що для отримання заданого коефіцієнта підсилення в схему підсилювача будуть входити кілька каскадів з відповідним охопленням зворотним зв'язком.

Вихідними даними для розрахунку можуть служити: квазірезонансна частота подвійного Т-подібного RC -фільтра f_0 ; смуга пропускання підсилювача $2\Delta f$; коефіцієнт підсилення підсилювача без зворотного зв'язку K .

В результаті розрахунку необхідно визначити режим роботи підсилювача, дані елементів його схеми і параметр Т-подібного фільтра.

Розрахунок здійснюють в наступній послідовності:

1. Розраховують транзисторний підсилювач низьких частот (рис. 2.7).

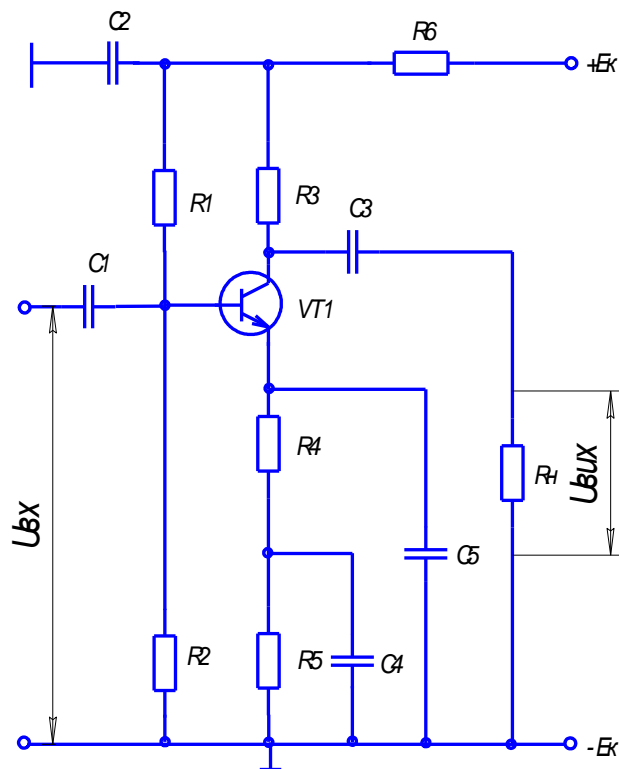


Рисунок 2.7 – Схема широкопasmового підсилюючого каскаду з низькочастотною і високочастотною корекцією частотної характеристики

1.1 Для підсилення прийнятого перетворювачем сигналу потрібен підсилювач з коефіцієнтом підсилення по напрузі $K \geq 500$.

Для широкосмугових підсилювачів використовують високочастотні транзистори з високою граничною частотою підсилення струму f_{zp} . Транзистори вибирають, щоб виконувалась умова:

$$f_e \leq 0,1 f_{zp}. \quad (2.31)$$

Оскільки робоча частота $f_p=250$ кГц повинна входити в частотний діапазон $f_n \dots f_e$ підсилювача, то $f_e=600$ кГц. Тоді $f_{zp}=6$ МГц.

Підійдуть транзистори типу КТ315 (мінімальний коефіцієнт підсилення по струму $h_{21E}=20$).

Перевіряють правильність вибору транзистора. Для нормального режиму роботи транзистора необхідно, щоб допустима напруга між колектором і емітером вибраного транзистора не перевищувала напругу живлення ($E_{жс}=5$ В):

$$U_{KEmax} > E_{жс}. \quad (2.32)$$

Для всіх транзисторів КТ315 $U_{KEmax} \geq 25$ В, отже, вони підходять. Величина допустимого струму колектора повинна перевищувати вхідний струм наступного каскаду не менш ніж в 1,5...2 рази:

$$I_{Kmax} > (1,5 \dots 2) I_{т.вх.наст}. \quad (2.33)$$

Максимальний вхідний струм наступних каскадів, які теж побудовані на транзисторах типу КТ315, становить 1 мА. Отже, повинно бути $I_{Kmax} \geq 2$ мА. Для транзисторів КТ315 $I_{Kmax}=30$ мА, що задовольняє умову.

1.2 Визначають величину струму спокою в ланці колектора:

$$I_{Kp} \approx 1,4 I_{т.вх.наст}. \quad (2.34)$$

$$I_{Kp} \approx 1,4 \text{ мА}.$$

1.3 Знаходять опір навантаження R_3 в колі колектора:

$$R_3 = 0,4 E_{жс} / I_{Kp}. \quad (2.35)$$

$$R_3 = 0,4 \cdot 5 / 1,4 \cdot 10^{-3} = 1,43 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Потужність, яка розсіюється на резисторі R_3 , становить $P_{R3} = I_{Kp}^2 \cdot R_3 = (1,4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,43 \cdot 10^3 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$

Виберемо стандартне значення опору резистора $R_3=1,5$ кОм, потужністю 0,125 Вт.

1.4 Визначають опір резистора R_4 в ланці термостабілізації:

$$R_4 + R_5 \approx 0,2 E_{жс} / I_{Кр}. \quad (2.36)$$

$$R_4 + R_5 \approx 0,2 \cdot 5 / (1,4 \cdot 10^{-3}) = 0,71 \cdot 10^3 \approx 1,0 \text{ кОм}.$$

Потужність, яка розсіюється на резисторах R_4 і R_5 , становить $P_{R_4 R_5} = I_{Кр}^2 \cdot (R_4 + R_5) = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$. Вибирають стандартне значення $P_{R_4} = 0,125 \text{ Вт}$

1.5 Знаходять ємність конденсатора C_3 :

$$C_3 = 10^6 / 2\pi f_n 0,1 R_4, \quad (2.37)$$

Нижня частота діапазону коливань АЕ становить 10 кГц, то нижня частота діапазону підсилення повинна бути (0,1...0,2) від даної частоти, тобто $f_n = (0,1 \dots 0,2) 10000 \approx 2 \text{ кГц}$.

$$C_3 = 10^6 / 2\pi \cdot 2000 \cdot 0,1 \cdot 1000 = 0,796 \text{ мкФ}.$$

Виберемо стандартне значення для оксидних конденсаторів типу К50-16 $C_3 = 1 \text{ мкФ}$ на напругу 16 В.

1.6 Знаходять напругу між колектором і емітером транзистора в режимі спокою:

$$U_{КЕр} = E_{жс} - I_{Кр} R_3 - I_{Ер} (R_4 + R_5) \approx E_{жс} - I_{Кр} (R_4 + R_5). \quad (2.38)$$

$$U_{КЕр} = 5 - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot (1,5 \cdot 10^3 - 1,0 \cdot 10^3) = 4,3 \text{ В}.$$

1.7 В сім'ї вихідних статичних характеристик транзистора КТ315 А (рис. 2.8), відмічають положення робочої точки P з координатами $U_{КЕр}$ і $I_{Кр}$.

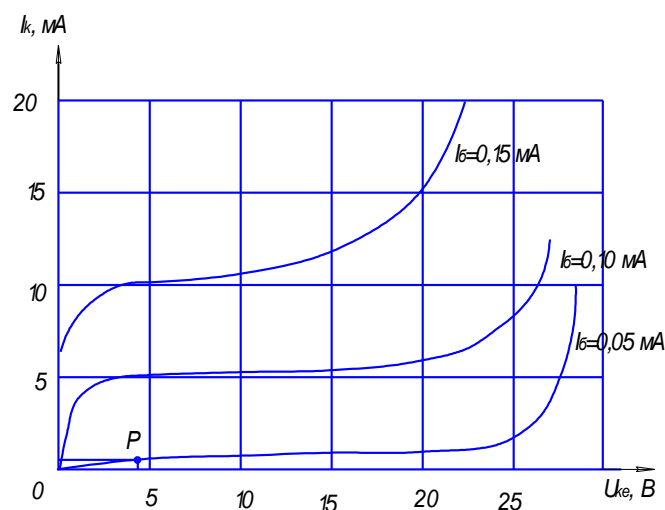


Рисунок 2.8 – Вибір робочої точки P в сім'ї статичних вихідних характеристик транзистора КТ315 А

1.8 Знайденому значенню робочої точки P відповідає вольт амперна статична характеристика транзистора КТ315 А при струмі бази $I_b=0,05$ мА. Це значення струму бази дозволяє знайти на вхідній характеристиці транзистора положення робочої точки P' , знятої при $U_{кЕр} \neq 0$.

Із вхідної характеристики транзистора КТ315 А (рис. 2.9) визначають напругу спокою ділянки база-емітер $U_{БЕр}$ і вхідний опір змінному струму транзистора розраховуваного каскаду $R_{вх}$.

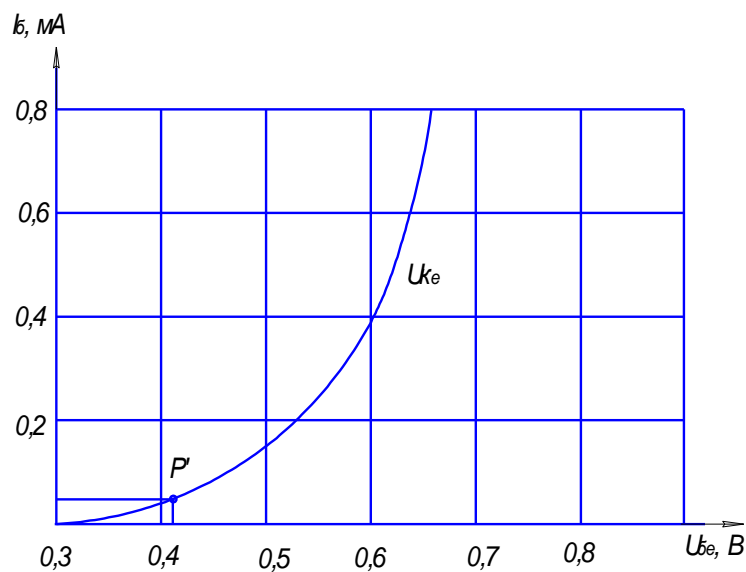


Рисунок 2.9 – Вибір робочої точки P' на вхідній характеристиці транзистора КТ315 А

Для знаходження $R_{вх}$ треба провести дотичну до характеристики в точці P' і знайти відношення $\Delta U_{БЕр}/I_{Бр}$, тобто тангенс кута нахилу дотичної.

$$R_{вх} \approx 0,4/0,05 = 8 \text{ кОм.}$$

1.9 Визначають елементи дільника напруги в колі бази R_1 і R_2 . Спад напруги на опорі резистора R_5 фільтра знаходиться в межах

$$\Delta U_{R5} = (0,1 \dots 0,2) E_{жс}. \quad (2.39)$$

Приймають $\Delta U_{R5} = 0,15 \cdot E_{жс} = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ В.}$

Знаходимо напругу, яка підводиться до дільника R_1, R_2 :

$$U_D = E_{жс} - \Delta U_{R5}. \quad (2.40)$$

$$U_D = 5 - 0,75 = 4,25 \text{ В.}$$

Вибирають струм в колі дільника з умови

$$I_D = (2 \dots 5) I_{Бр}. \quad (2.41)$$

$$\text{Беруть } I_D = 3,5 I_{Бр} = 3,5 \cdot 0,05 = 0,175 \text{ мА.}$$

Визначаємо R_1 і R_2 за формулами:

$$R_1 = (U_D - \Delta U_{R4R5} - U_{БЕр}) / (I_{Бр} - I_D); \quad (2.42)$$

$$R_2 = (\Delta U_{R1} + U_{БЕр}) / I_D. \quad (2.43)$$

Падіння напруги на резисторі R_4 приймають рівним

$$\Delta U_{R4} = I_{Кр} \cdot (R_4 + R_5) = 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 \cdot 10^3 = 1,4 \text{ В.}$$

$$R_1 = (7,65 - 1,4 - 0,42) / (0,05 \cdot 10^{-3} + 0,175 \cdot 10^{-3}) = 30 \text{ кОм};$$

$$\Delta U_{R1} = R_1 \cdot I_D = 30 \cdot 10^3 \cdot 0,175 \cdot 10^{-3} = 5,25 \text{ В};$$

$$R_2 = (5,25 + 0,42) / 0,175 \cdot 10^{-3} = 32,4 \text{ кОм.}$$

Вибирають стандартне значення $R_2 = 33 \text{ кОм}$. Потужність розсіювання на R_1 і R_2 становить порядку 1 мВт, тому приймають 0,125 Вт.

1.10 Розраховують елементи розв'язуючого фільтра

$$R_6 = \Delta U_{R5} / (I_D + I_{Кр}); \quad (2.44)$$

$$R_6 = 0,75 / (0,175 \cdot 10^{-3} + 1,4 \cdot 10^{-3}) = 0,476 \text{ кОм.}$$

Найближче стандартне значення $R_6 = 470 \text{ Ом}$. Його потужність мусить бути $P_{R6} \geq 0,75(0,175 + 1,4) \cdot 10^{-3} = 0,002 \text{ Вт}$. Вибирають $P_{R6} = 0,125 \text{ Вт}$, щоб усі резистори були однакової потужності.

Величина конденсатора фільтра визначається з умови:

$$C_2 = (10 \dots 50) / f_{н} R_5 \quad (2.45)$$

$$C_2 = 20 / 20000 \cdot 470 = 200 \text{ мкФ.}$$

Беруть стандартне значення для конденсаторів типу К50-16 $C_2 = 200 \text{ мкФ}$.

Напруга C_2 повинна бути $U_C \geq 1,5 E_{жс}$. $U_C = 7,5 \text{ В}$.

Фільтр на елементах R_6 і C_2 зменшує пульсації напруги живлення, а у випадку, коли каскадів підсилення більше одного, зменшує паразитні зворотні

зв'язки.

Розраховують схеми корекції. В ширококутових транзисторних підсилювачах, які працюють на наступний транзистор, найчастіше використовується схема емітерної високочастотної корекції із RC -ланок.

Оптимально допустимий опір колекторного навантаження для змінної складової катодного струму

$$R_{k.онт} = \sqrt{r_b / 2\pi \cdot f_{зр} C_k} = R_{к\infty} = \frac{R_k \cdot R_{k.вх.наст}}{R_k + R_{k.вх.наст}} = \frac{R_3 \cdot R_{k.вх.наст}}{R_3 + R_{k.вх.наст}}. \quad (2.46)$$

$$R_{k.онт} = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^3 / (1,5 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^3) = 1,3 \text{ кОм}.$$

Знаходять граничну частоту вхідного кола транзистора:

$$f_{зр.роб.} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{BE} R_{екв.в}}, \quad (2.47)$$

де C_{BE} – еквівалентна вхідна ємність транзистора, яка включає ємність зворотного зв'язку;

$R_{екв.в.}$ – еквівалентний опір на верхніх частотах.

$$C_{BE} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{зр} \cdot r_e} + C_k \frac{R_{к\infty}}{r_e}, \quad (2.48)$$

де $r_e = 26 / I_{к.роб.}$;

$$R_{екв.в.} = (R_{екв.в.} + r_e) h_{11E} / (R_{нопер} + r_{\sigma} + h_{11E});$$

$$R_{нопер} = 2000 \text{ Ом}.$$

З довідника для КТ315: $h_{11E} = h_{11B} = 40 \text{ Ом}$; $h_{22E} = h_{22B} = 0,3 \text{ мкСм}$; $h_{21E} = 20$; $C_K = C_E = 10 \text{ нФ}$; $\tau_k = 300 \dots 1000 \text{ нс}$; нехай $\tau_k = 700 \text{ нс}$.

Відомо, що $r_{\sigma} = \tau_k / C_K$.

$$r_{\sigma} = 700 \cdot 10^{-12} / 700 \cdot 10^{-12} = 70 \text{ Ом};$$

$$r_e = 26 / 1,4 = 18,6 \approx 19 \text{ Ом};$$

$$C_{BE} = \frac{1}{2\pi \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 19} + 10 \cdot 10^{-12} \frac{2000}{19} = 2449 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$R_{екв.в.} = (2000 + 70) \cdot 40 / (2000 + 70 + 40) = 39 \text{ Ом};$$

$$f_{зр.роб.} = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 2449 \cdot 10^{-12} \cdot 35) = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Гц};$$

$$f_{зр.роб.} / f_{\epsilon} = 1,8 \cdot 10^6 / 600 \cdot 10^3 = 3.$$

Коефіцієнт підсилення на верхніх частотах

$$K_{\epsilon} = \frac{1}{M_{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot f_{\epsilon} \cdot \tau_{\epsilon})^2}}, \quad (2.49)$$

де $\tau_e = 0,0455 t_i = 0,0455 \cdot 10^{-7} \text{ c} = 45,5 \cdot 10^{-10} \text{ c}$;

$$K_e = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \cdot 45,5 \cdot 10^{-10})^2}} = 0,99.$$

Тоді з номограми визначають за величинами K_e та $f_{зр.роб}/f_e$ величину коефіцієнта А глибини зворотного зв'язку: $A=1,2$.

Опір резистора R_4 ланки корекції

$$R_4 = (R_{nonep} + r_b + r_e(1 + h_{21E}))(A - 1) / (1 + h_{21E}). \quad (2.50)$$

$$R_4 = (2000 + 70 + 19(1 + 20)(1,2 - 1)) / (1 + 20) = 102 \text{ Ом}.$$

Нехай $R_4 = 100 \text{ Ом}$.

Визначають величину конденсатора C_5 :

$$C_5 = 0,16 / A \cdot R_4 \cdot f_{зр.роб}; \quad (2.51)$$

$$C_5 = 0,16 / 1,2 \cdot 100 \cdot 1,8 \cdot 10^6 = 7,4 \cdot 10^{-10} = 740 \text{ пФ}.$$

$$R_5 = 1,0 - 0,1 = 0,9 \text{ кОм} = 900 \text{ Ом}.$$

Ємність розділюваних конденсаторів C_1 і C_3 знаходять з умови одержання допустимих частотних спотворень на низьких частотах:

$$C_p = 10^6 / 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_K + R_{вх.наст}) \sqrt{M_n^2 - 1}. \quad (2.52)$$

$$C_p = 10^6 / 2 \cdot 3,14 \cdot 20000 \cdot (1,5 + 8) \sqrt{(1/0,99)^2 - 1} = 0,0059 \text{ мкФ}.$$

Розділювальні конденсатори беруть типу К50-16 $C_p = 6,3 \text{ нФ}$ на напругу 16 В.

2. Задають величини опорів резисторів $R1=R2=R$, що задовольняють нерівність

$$R \geq (7 \dots 15) R_K, \quad (2.53)$$

де R_K – опір навантаження в ланці колектора транзистора, з якого подається напруга в ланку зворотного зв'язку.

$$R_K = 1,5 \text{ кОм}; R = 15 \text{ кОм}.$$

При виконанні умови (2) може бути досягнута узгодженість ланки зворотного зв'язку з виходом підсилювача.

3. За відомою частотою f_0 при умові $C1=C2=C$ знаходять величину ємностей фільтра

$$C = 10^6 / 2\pi f_0 R \approx 16 \cdot 10^4 / f_0 R \quad (2.54)$$

$$C = 16 \cdot 10^4 / 250 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 = 42,7 \text{ мкФ}.$$

Вибирають стандартне значення $C = 47 \text{ мкФ}$.

4. Згідно стандартних значень R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , знаходять величини опорів резистора R_3 і конденсатора C_3 :

$$R_3=R/2; \quad (2.55)$$

$$C_3=2C. \quad (2.56)$$

$$R_3=15 \cdot 10^3/2=750 \text{ Ом};$$

$$C_3=2 \cdot 47 \cdot 10^{-6}=85,4 \cdot 10^{-6}=94 \text{ мкФ}.$$

Вибирають стандартне значення $C_3=100 \text{ мкФ}$.

5. Визначають розрахункову смугу пропускання підсилювача

$$2\Delta f_{\text{розр}} \approx 4/Kf_0. \quad (2.57)$$

$$2\Delta f_{\text{розр}} \approx 4/500 \cdot 250000=3,2 \cdot 10^{-8}.$$

Отримане значення $2\Delta f_{\text{розр}}$ повинно задовольняти нерівність

$$2\Delta f_{\text{розр}} < 2\Delta f. \quad (2.58)$$

Якщо необхідно звужити смугу пропускання, треба підвищити його коефіцієнт підсилення.

6. Знаходять еквівалентну добротність підсилювача з подвійним Т-подібним RC-фільтром

$$Q_{\text{екв}}=f_0/2\Delta f_{\text{розр}}=K/4. \quad (2.59)$$

$$Q_{\text{екв}}=500/4=125.$$

Прагнучи до підвищення вибіркової RC-підсилювачів, необхідно пам'ятати, що зі збільшенням еквівалентної добротності фільтра помітно зростає нестабільність коефіцієнта підсилення, вибіркової і резонансної частоти. Тому при конструюванні підсилювача низької частоти з високою вибірковою необхідно потурбуватися про стабільність його елементів стосовно змін температури та інших факторів.

Розроблено складальне креслення блоку живлення (МР.МТТм–26.00.010.000 СК), його плату (МР.МТТм–26.00.01.001) та відповідну документацію згідно з вимогами стандартів.

2.2.3 Розрахунок і розробка конструкції перетворювача акустичної емісії

2.2.3.1 Основні вимоги до перетворювачів акустичної емісії

Одним з основних елементів технічних засобів акустично-емісійного контролю є перетворювачі акустичної емісії (ПАЕ). Вони визначають чутливість контролю і робочий частотний діапазон. Робочу частоту вибирають, виходячи з параметрів шумів та акустичного затухання в об'єкті. Для контролю посудин, котлів і апаратів рекомендується використовувати діапазон 100...500 кГц. При контролі трубопроводів можна використовувати більш низький діапазон частот - 20...60 кГц. При контролі об'єктів на більш низьких частотах спостерігається високий рівень сторонніх механічних шумів. У діапазоні понад 500 кГц у більшій мірі відчувається затухання пружних хвиль у конструкції.

Основною вимогою до прийомного перетворювача механічних сигналів АЕ в електричні є висока чутливість в обраній смузі частот, стабільність властивостей і вид амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). Для забезпечення мінімальних спотворень важлива лінійність перетворення. До перетворювачів може бути пред'явлений також ряд експлуатаційних вимог (стійкість до механічних й інших впливів, зручність установки, малі габаритні розміри й т.п.).

У цей час відома велика кількість методів перетворення коливального руху поверхні твердого тіла в електричні сигнали. Однак більшість з них не забезпечує необхідної чутливості. Широкого розповсюдження для вимірювання параметрів АЕ набув п'єзоелектричний метод. Теоретична оцінка порогу чутливості п'єзоелектричного перетворювача до зсуву, обумовлений тепловими шумами, має порядок 10^{-17} м. Реальний поріг чутливості залежить від конструкції перетворювача. Так, демпфовані п'єзоперетворювачі, що використовуються у звичайній ультразвуковій дефектоскопії, виявляються неприйнятними для виявлення й вимірювання параметрів АЕ через малу чутливість. Тому п'єзоперетворювачі для АЕ розробляють, як правило, спеціально. Висока чутливість досягається використанням резонансних

властивостей перетворювача, що, однак, викликає істотну нелінійність АЧХ.

Оскільки акустичний сигнал на виході сенсора дуже слабкий (на рівні одиниць, десятків одиниць мікрвольт), то перш ніж він буде переданий на вхід основного каналного підсилювача, сигнал повинен бути посилений до необхідного рівня для забезпечення збереження необхідного динамічного діапазону. Крім того, для забезпечення високого відношення сигнал/шум як правило необхідно використовувати спеціальні смугові фільтри для фільтрації сигналу від небажаних акустичних, електричних і радіошумів. Крім того, акустичні перетворювачі повинні мати низький рівень власних шумів, тому що цей параметр є найважливішим параметром, що визначає чутливість усього комплексу в цілому.

Використовувані ПАЕ повинні бути температурно-стабільними в діапазоні температур, у якому проводиться контроль об'єктів. Їх коефіцієнт електроакустичного перетворення не повинен змінюватися більш, ніж на 3 дБ у цьому діапазоні температур. Розкид коефіцієнтів перетворення ПАЕ для партії перетворювачів, що використовуються при контролі об'єкта, не повинен перевищувати 3 дБ. Рекомендується використовувати переважно резонансні ПАЕ.

ПАЕ повинні бути захищеними від завад, що досягається використанням прийнятих методів, а також застосуванням диференціальних схем.

ПАЕ кріплять до об'єкта з використанням механічних пристроїв, магнітних тримачів, або за допомогою клею. Пристрої для установки перетворювачів на об'єкті вибирають з врахуванням його конструктивних особливостей. Вони можуть бути знімними (магнітні тримачі, струбцини, хомути й т.п.) або у вигляді стаціонарно встановлених кронштейнів.

Сигнальний кабель і попередній підсилювач повинні бути зафіксовані. Попередній підсилювач розміщують поблизу ПАЕ або безпосередньо в його корпусі. Довжина сигнального кабелю, що з'єднує ПАЕ із попереднім підсилювачем, як правило, не повинна перевищувати 2 м, кабель повинен мати

екран для захисту від електромагнітних завад. Максимальна довжина кабелю, що з'єднує попередній підсилювач з приладом, як правило, не повинна перевищувати 150 м. Втрати сигналу в даному кабелі не повинні перевищувати 1 дБ на 30 м довжини, електрична ємність не повинна перевищувати 30 пФ/м.

Перетворювач АЕ встановлюють або безпосередньо на поверхню об'єкта, або з використанням хвилеводу. Рекомендується використовувати ненаправлені перетворювачі. При контролі лінійних об'єктів (трубопроводів) або при контролі певних зон допускається використовувати направлені ПАЕ. Для товстостінних об'єктів можливе застосування п'єзоперетворювачів поверхневих хвиль.

При установці ПАЕ на об'єкт контролю акустичне контактне середовище повинне забезпечувати ефективний акустичний зв'язок ПАЕ з об'єктом і, в той же час, не повинна впливати на контрольований об'єкт. Контактне середовище повинне забезпечувати надійний акустичний контакт протягом усього часу випробувань при температурі контрольованого об'єкта. Рекомендується використовувати контактне середовище з мінімальним затуханням. Як контактне середовище можна використовувати епоксидну смолу без затверджувача, машинне масло, гліцерин й інші рідкі середовища. Допускається застосування хвилеводів. Поверхня об'єкта контролю в місці встановлення ПАЕ зачищають до шорсткості не менше R_z40 .

Після встановлення ПАЕ на об'єкт контролю роблять перевірку їх працездатності з використанням імітаторів АЕ. Як імітатор сигналів АЕ використовують п'єзоелектричний перетворювач, збуджуваний електричними імпульсами від генератора. Частотний діапазон імітаційного імпульсу повинен відповідати частотному діапазону системи контролю.

Як імітатор сигналів АЕ також можливо використовувати джерело Су-Нільсена (злам графітового стрижня діаметром 0,3...0,5 мм, твердістю 2Т(2Н)).

При виконанні контролю використовувані робочі ПАЕ повинні бути відкалібровані з використанням еталонних перетворювачів АЕ.

Визначення коефіцієнта електроакустичного перетворення еталонного ПАЕ шляхом вимірювання амплітуди динамічного зсуву поверхні твердого тіла й амплітуди імпульсної характеристики роблять з використанням зразкових засобів вимірювання.

Калібрування робочих ПАЕ роблять незалежні спеціалізовані організації з використанням еталонних ПАЕ. Визначення основних параметрів робочих ПАЕ здійснюють власники ПАЕ з використанням методик відповідно до вимог нормативно-технічної документації. Калібрування еталонних ПАЕ повинна проводитися один раз у рік. Визначення основних параметрів робочих ПАЕ повинна проводитися перед кожним контролем, але не рідше одного разу в рік. Результати калібрування заносять у паспорт ПАЕ.

2.2.3.2 Характеристика матеріалів, що використовуються для виготовлення перетворювача акустичної емісії

При виборі матеріалів для п'єзоперетворювача варто враховувати такі їхні характеристики, як коефіцієнт електромеханічного зв'язку, діелектричну проникність, а також температуру Кюрі, механічну міцність й інші експлуатаційні характеристики.

Всі матеріали, що використовуються для виготовлення п'єзоперетворювачів, поділяють на неполярні й полярні.

Неполярні п'єзоелектрики характеризуються, як правило, малими значеннями відносної діелектричної проникності й п'єзоелектричних модулів. Для матеріалів цієї групи характерні малі діелектричні й механічні втрати, слабка залежність всіх властивостей від температури.

По електричних властивостях неполярні п'єзоелектрики ділять на п'єзодіелектрики й п'єзонапівпровідники. З п'єзодіелектриків цієї групи найбільш широко використовується кварц. П'єзонапівпровідники, зазвичай, характеризуються відносно високою електронно-дірковою провідністю. Наявність у п'єзонапівпровідниках вільних носіїв електричного заряду

приводить до виникнення в них специфічних ефектів, пов'язаних з тим, що вільні носії під дією п'єзоелектричних полів, що супроводжують пружну деформацію, перерозподіляються по об'єму кристала. У свою чергу, перерозподіл носіїв заряду створює додаткове електричне поле, що викликає додаткову деформацію. Ці ефекти впливають на поглинання пружних хвиль у зразках (добротність), а також на пружні константи. Іншими словами, з'являється можливість керувати властивостями п'єзоелектричних зразків за допомогою додаткового зовнішнього електричного поля (постійного чи змінного). Крім того, п'єзонапівпровідники, в основному, фоточутливі, тобто їх характеристики змінюються під впливом освітлення.

П'єзовластивості п'єзонапівпровідників значно кращі кварцу, а більша діелектрична проникність поліпшує інші електричні характеристики.

Типовими представниками даної групи матеріалів є сульфід і селенід кадмію та окис цинку.

Полярні п'єзоелектрики відрізняються наявністю власної електричної поляризації, яка існує при відсутності зовнішньої механічної деформації і зовнішнього електричного поля. Вони, у свою чергу, поділяються на лінійні (піроелектрики) і нелінійні (сегнетоелектрики). Найістотніша відмінність між ними в тому, що сегнетоелектрики розбиваються на області спонтанної поляризації - домени, а піроелектрики - ні. П'єзоелектричні властивості лінійних полярних п'єзоелектриків мало відрізняються від властивостей розглянутих вище неполярних п'єзоелектриків. Найпоширеніші їхні представники - турмалін, сульфат літію. Однак навіть у них згадані величини досить малі, і тому широкого застосування в УЗ приладах неруйнівного контролю вони не знайшли.

Сегнетоелектрики одержали найширше застосування в сучасних п'єзоелектричних перетворювачах. Всі сегнетоелектрики мають п'єзоелектричні властивості принаймні в області температур існування спонтанної поляризації. Справедливість цього твердження випливає з того факту, що наявність

спонтанної поляризації створює в кристалі окремі напрямки, тобто відсутній центр симетрії, що знищує п'єзоэффект.

Якщо кристал перебуває в монодоменному стані - (весь кристал складається з одного домену), то спонтанна поляризація відмінна від нуля для всього кристала. Якщо ж зразок розбитий на домени, то полярними, зрозуміло, є окремі домени. П'єзоматеріали цієї групи мають досить високу відносну діелектричну проникність і дуже високі п'єзомодулі.

Останнім часом отримані такі сегнетоелектричні матеріали, як ніобіт літію, танталат літію, сульфаноат сурми. Однак найбільшу практичну цінність мають сегнетоелектрики іншого типу - кристали титанату барію й п'єзоелектричні текстири на його основі, що мають у параелектричній модифікації центр симетрії і п'єзоелектричних властивостей, які з'являються за рахунок лінеаризації електрострикції спонтанної поляризації.

Числові значення п'єзокоефіцієнтів монодоменизованого кристала титанату барію такі, що його п'єзомодулі за значенням практично не уступають сегнетовій солі, а температурний інтервал існування набагато ширший. Ще більш цікавими є п'єзоелектричні текстири. Текстурами називають мікроскопічно однорідні середовища не ґратчастої будови, що складаються із часток, властивості яких характеризуються деяким виділеним у просторі напрямком. Частковим випадком п'єзоелектричних текстур є п'єзокераміка. П'єзокераміка являє собою полікристалічну структуру і складається із кристалітів із сегнетоелектричними властивостями.

Спосіб виготовлення п'єзокераміки, її механічні властивості й структура аналогічні звичайній кераміці. Тому кристаліт п'єзокераміки - це зерна з випадковою орієнтацією кристалографічних осей. Середні розміри зерен становлять від одиниць до декількох десятків мікрон, кристалічна структура трохи деформована на границях. Зерна розділені між собою міжкристалітним прошарком або сполучною масою. Кожен кристаліт має доменну структуру, властиву матеріалу, на базі якого виготовлена кераміка.

У відсутності зовнішнього електричного поля сумарна електрична поляризація зразка дорівнює нулю як внаслідок доменної структури кристалітів, так і внаслідок довільної орієнтації кристалітів один щодо іншого. Щоб надати кераміці п'єзовластивості, її поляризують - прикладають до зразка, на який нанесені електроди, сильне електричне поле, і витримують зразок так протягом певного інтервалу часу. Режими поляризації можуть розрізнятися напруженістю електричного поля, температурою й тривалістю поляризації. У процесі поляризації кристаліти монодоменуються, і весь кристал одержує сумарну поляризацію. Одночасно сумарну поляризацію здобуває й весь зразок, тому що вектори поляризації кожного кристаліта орієнтуються навколо напрямку напруженості зовнішнього поля в межах деякого кута. Після зняття поля ця переважна орієнтація зберігається.

Крім титанату барію (BaTi_3) для одержання п'єзокераміки використовують інші хімічні сполуки з хімічною формулою ABO_3 (наприклад, PbTi_3), а також тверді розчини на їхній основі.

Особливо широко застосовують як п'єзоелектричні матеріали сполуки системи $\text{PbTi}_3 - \text{PbZr}_3$ (так звані ЦТС або PZT), що вигідно відрізняються від інших сполук більше високими п'єзоелектричними коефіцієнтами й точкою Кюрі.

Розрізняють сегнетом'яку й сегнетожорстку кераміки. Перша характеризується високими значеннями п'єзомодуля і діелектричної проникності, а також порівняно великими механічними і електричними втратами. До неї відносяться п'єзокераміки-ЦТСНВ-1, ТБ-1, PZT-5Н. Друга, навпаки, характеризується, порівняно малими втратами, але п'єзоелектричні властивості виражені слабше (наприклад, ЦТС-23, PZT-8, ТБК-3). Розроблені також сполуки п'єзокерамік з проміжними властивостями (ЦТС-3, ЦТС-19).

В останні роки проводяться інтенсивні пошуки полімерних матеріалів з п'єзоелектричними властивостями. Найкращі характеристики має полівінілденфторид (ПВДФ), що може бути поляризований до досить високого

рівня п'єзоактивності.

ПВДФ являє собою полікристалічний полімер $(\text{CH}_2 - \text{CF})_n$ із точкою плавлення, що лежить у діапазоні температур 150 - 180 °С. На орієнтовану ПВДФ плівку наносять металеві електроди (звичайно методом вакуумного напилювання) з алюмінію, хрому, срібла, нікелю, і піддають її поляризації в сильних електричних полях. Отримані плівки мають порівняно низький коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Механічна гнучкість ПВДФ дозволяє використати його в сполученні з поверхнями різноманітної форми, а малий хвильовий опір забезпечує гарне акустичне узгодження з водою та з матеріалами ліній затримки в перетворювачах.

Характеристики п'єзоматеріалів, що застосовуються при виготовленні первинних перетворювачів, наведені у додатку В.

2.2.3.3 Розрахунок перетворювача акустичної емісії

Розрахунок первинного перетворювача сигналів акустичної емісії аналогічний розрахунку ультразвукового низькочастотного датчика в режимі прийому і зводиться до знаходження електричного сигналу перетворювача, приєднаного до реєструючого приладу, при створенні на його поверхні відомого розподілу механічних деформацій.

Розрахунок реального перетворювача значною мірою залежить від його конструкції. Тим не менше, загальну концепцію розрахунку можна побачити на основі найпростішого перетворювача, який складається з п'єзоелемента (пластини з матеріалу, що володіє п'єзовластивостями, з наклеєними електродами), акустичне навантаження і демпфер.

Система рівнянь, яка описує роботу п'єзоперетворювача, повинна включати рівняння руху пружного середовища, рівняння, що пов'язує механічні напруження і деформації, а також рівняння, що враховує взаємодію акустичних і електричних полів при прийманні сигналів акустичної емісії.

Рівняння руху пружного середовища можна отримати з 2-го закону

Ньютона, якщо прирівняти силу внутрішніх напружень і прискорення на масу одиниці об'єму тіла:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (2.60)$$

де ρ – густина;

ξ – зміщення.

Використавши в якості незалежних змін деформацію тіла і напруженість електричного поля, при підстановці в (2.60), отримаємо:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} - c_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial x_j \partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = - \frac{\partial}{\partial x} (e_{ijk} E_k). \quad (2.61)$$

Продиференціюємо ліву і праву частини рівняння (2.61) по координаті і в отриманий вираз підставимо рівняння прямого п'єзоefекту. Отримаємо:

$$\rho S_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \sigma_{kl}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \sigma_{ik}}{\partial x_j \partial x_k} = \rho d_{ijk} \frac{\partial^2 E_k}{\partial t^2}, \quad (2.62)$$

Це основні рівняння при дослідженні процесів приймання пружних хвиль п'єзоперетворювачем, тому що дозволяють виразити змінні в просторі і часі механічні величини (зміщення, механічна напруженість) через електричні і навпаки. Однак ці рівняння повинні бути доповнені рівняннями, що пов'язують напруженість і індукцію електричного поля всередині п'єзоелемента з такими величинами, як напруга, прикладена до перетворювача.

В принципі, при аналізі розповсюдження хвиль в п'єзоелектрику, рівняння (2.61) і (2.62) слід розв'язувати разом з рівняннями Максвелла. Розв'язок в загальному випадку являє собою рівняння змішаних напружено-електромагнітних полів. Однак внаслідок великої різниці в поширенні механічних і електромагнітних хвиль, для пружних хвиль можна не враховувати магнітне поле, індуковане змінним електричним полем і навпаки. Тому електричне поле в п'єзоелектрику можна вважати потенціальним і

характеризувати його скаляром:

$$E_i = \frac{\partial \varphi_e}{\partial x_i}. \quad (2.63)$$

Підставивши в (2.63) одне з рівнянь прямого п'єзоефекту і виконавши інтегрування, отримаємо:

$$\int_0^d E_i dx_i = \varphi_n = \int_0^d \beta_{ij}^u D_j dx_i - \int_0^d h_{ijk} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} dx_i. \quad (2.64)$$

Щодо сили струму, який протікає через п'єзоелемент, то її нескладно пов'язати з електричною індукцією, так як остання безпосередньо визначається поверхневою густиною вільних зарядів на електродах:

$$i = A \frac{\partial \sigma_{bil}}{\partial t} = A \frac{\partial D_n}{\partial t}. \quad (2.65)$$

Отримана система рівнянь (2.60–2.65) дозволяє знайти реакцію п'єзоперетворювача у вигляді протікаючого через нього струму чи різниці потенціалів між електродами, що виникає при прикладенні до нього заданого механічного впливу.

Після спрощення приведеної системи рівнянь, можна отримати одномірне неоднорідне хвильове рівняння:

$$c_{33}^E \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_3^2} - \rho \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_3} (e_{33} E_3), \quad (2.66)$$

Розрахунок п'єзоперетворювача будемо проводити, відштовхуючись від характеристик сигналів акустичної емісії, що виникають внаслідок розвитку елементарної тріщини.

Сформулюємо задачу: в пластині з сталі з мінімальною товщиною $b_0 = 10$ мм на глибині $z_0 = b_0/10$ виникли сигнали акустичної емісії, викликані початковою стадією розвитку тріщини. Знайдемо спектр частот хвиль, що передаються листом до місця встановлення датчика АЕ. Будемо вважати, що наша апаратура не дозволяє приймати сигнали, що в n раз менші за номінальні.

Поперечні хвилі, що переміщуються в пластині можна описати рівнянням:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0^*}{2\pi^2} \int_0^\infty \alpha J_1(\alpha r) \cos(\alpha C_3 t) \left\{ \frac{1}{\gamma_1} \exp(-\alpha(z_0 - z_1)\gamma_1) - \frac{2\gamma_2^2}{1+\gamma_2^2} \exp(-\alpha z_0(\gamma_1 - \gamma_2) - \alpha(z_0 - z_1)\gamma_2) \right\} da \quad (2.67)$$

Тоді, оскільки підінтегральний вираз повинен бути більшим $1/n$, отримаємо при максимальному значенні функції $\alpha J_1(\alpha r) \cos(\alpha C_3 t)$, рівному одиниці:

$$\alpha_1 e^{\alpha_1(\delta_0 - z_0)\gamma_1} = \frac{1}{n}. \quad (2.68)$$

Розв'язуючи це рівняння для $n = 50$, $y_1 = 0,868$, $z_0 = 1$ мм, $b_0 = 10$ мм, отримаємо:

$$\alpha_1 e^{\alpha_1(10-1)0.868} = \frac{1}{35}. \quad (2.69)$$

Звідси $\alpha_1 = 4$ см⁻¹,

Як відомо, частота сигналу АЕ розраховується за формулою:

$$f = \alpha_1 \frac{C_3}{2\pi} = 4 \cdot \frac{27 \cdot 10^4}{2 \cdot 3.14} = 152866 \text{ Гц}. \quad (2.70)$$

де $\alpha_1 = 4$ см⁻¹ - хвильове число.

$C_3 = 27 \cdot 10^4$ см/с, - швидкість поширення хвиль Релея в сталі.

Отже, нижня границя отриманого сигналу акустичної емісії в цьому випадку буде на частоті 150 кГц.

Цей розрахунок є суттєво спрощеним, тому що не враховуються процеси відбивання, накладання і дисперсії хвиль в тонких пластинах, але він дозволяє приблизно оцінити параметри сигналів, виявлення і обробка яких є першочерговим завданням нашої системи.

П'єзоелемент, будучи кристалом чи поляризованою керамікою, не

являється ізотропною речовиною. Пружні, діелектричні і інші сталі в ньому залежать від напрямку відносно кристалічних осей чи напрямку поляризації. Оскільки п'єзоперетворювач розрахований на прийом поперечних хвиль, то властивості розрахованої пластини будемо характеризувати значеннями констант, що діють тільки в цьому напрямку.

Оскільки від даного п'єзоперетворювача вимагається нормальна робота в польових умовах і висока чутливість, п'єзоелемент виготовимо з п'єзокераміки ЦТС – 19 (додаток В).

Найчастіше в датчиках акустичної емісії п'єзопластина виготовляється товщиною, рівною половині довжини хвилі:

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}, \quad (2.71)$$

де d – товщина пластини; f – частота сигналу; c – швидкість звуку в пластині.

Тоді для нашого випадку ($c = 3500$ м/с, $f = 150$ кГц) товщина пластини буде рівна:

$$d = \frac{c}{2f} = \frac{3,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 150 \cdot 10^3} \approx 0,012 \text{ м}. \quad (2.72)$$

Отже, для забезпечення прийому сигналів АЕ на даних частотах пластину п'єзоелементу найдоцільніше виготовити товщиною $d = 12$ мм.

Для забезпечення рівномірної і кругової діаграми спрямованості робимо нашу п'єзопластину у вигляді циліндра діаметром 5 мм.

2.2.3.4 Розробка конструкції перетворювача акустичної емісії

В загальному ПАЕ складається з пьезоелементу, протектора, демпфуючої шайби, корпусу, роз'єму, втулки, кришки та контактного пристосування. Часто вмонтовують в датчик попередній підсилювач.

Попередні підсилювачі призначені для підсилення електричних сигналів, які поступають з виходу датчиків з метою зниження спотворень корисного сигналу при передаванні цього сигналу кабелем на великі відстані.

Суміщений датчик-передпідсилювач є міцним, має малі розміри, суміщає дві функції, що зменшує вартість обладнання і скорочує час підготовки до проведення АЕ контролю. Досить поширеними є датчики з функцією автоматичного тестування. ПАЕ з попереднім підсилювачем оптимальні для польових випробувань посудин під тиском, трубопровідних систем та інших структур, де можна протягнути довгі кабелі (до 150 м).

Маса ПАЕ, які виготовляються серійно, становить від 0,2 гр. (без під'єданого кабеля) до 60 гр. Габаритні розміри включають діаметр та висоту.

Основними матеріалами для виготовлення корпусу є алюміній та нержавіюча сталь. Для корпусу датчиків з вмонтованими попередніми підсилювачами доцільно використовувати дюралюміній для зменшення вартості та маси.

Чутливу п'єзоелектричну систему герметизують спеціальним еластичним герметиком. Весь об'єм корпусу заливають епоксидним компаундом з підвищеною адгезією до нержавіючої сталі.

Протектор виготовляється з кераміки або нержавіючої сталі. Керамічне покриття забезпечує електричну ізоляцію металічного корпусу датчика від випробовуваних структур.

Враховуючи вищесказане, розроблено конструкцію перетворювача акустичної емісії (МР.МТм– .00.00.000 СК).

2.2.4 Розробка методики контролю стану об'єкта без примусової зміни тиску

Після прийняття рішення про проведення АЕ контролю власник надає виконавцю всю необхідну для проведення контролю проектну, технічну та

нормативну документацію на резервуар із зазначенням фактичних умов та режимів експлуатації. На підставі отриманих даних проводиться оцінка вихідних даних і складання програми випробувань. Розробляються методичні прийоми контролю об'єкта, а також система класифікації джерел АЕ і критерії оцінки результатів контролю. Складається програма робіт та карта діагностування.

Контроль здійснюється багатоканальною АЕ системою з допомогою закріплених на стінках резервуару ПАЕ, які реєструють акустичні сигнали, викликані корозійним ураженням чи протіканням продукту. Отримані результати дозволяють визначити місцезнаходження дефектної ділянки, а за параметрами сигналів класифікувати стан об'єкта. Наведено технологічну схему проведення контролю методом акустичної емісії (МР.МТм-0.00.00.001).

Об'єкти повинні контролюватися в їхньому робочому положенні. Після проведення підготовчих робіт здійснюються безпосередні роботи по контролю, що починаються з установки ПАЕ на об'єкт.

Кожен ПАЕ повинен бути встановлений безпосередньо на поверхню об'єкта або повинен бути використаний відповідний хвилевід. Варто враховувати, що при наявності фарбування і захисних покриттів, а також кривизни і нерівностей поверхні об'єкта в зоні контакту, можливе зменшення амплітуди сигналу АЕ і перекручування його форми. Якщо зменшення амплітуди сигналу АЕ перевищує 6 дБ, поверхня об'єкта в місці установки ПАЕ повинна бути очищена від фарби чи покриття в обов'язковому порядку. Необхідно передбачити також кріплення сигнального кабелю і попереднього підсилювача, щоб виключити втрату контакту і механічне навантаження ПАЕ.

Для кріплення перетворювачів, як правило, використовуються акустопрозорі клеї, спеціальні мастики, механічні або магнітні притискуючі пристрої. Акустичне контактне середовище повинне забезпечувати надійний та ефективний акустичний зв'язок перетворювачів з об'єктом на протязі всього

терміну випробувань і в той же час не повинно справляти небажаний вплив на контрольований об'єкт.

Розміщення ПАЕ і кількість антенних груп визначається конфігурацією об'єкта і максимальним рознесенням ПАЕ, пов'язаним із загасанням сигналу, точністю визначення координат. Враховують критичні місця об'єкта, зварні шви, зони високих напруг, патрубки, зони, піддані ремонту і т.д. Необхідно враховувати додаткове загасання в зварних швах і на ділянках, де має місце зміна товщини стінки об'єкта. Розміщення ПАЕ приводять у технології контролю (картах контролю).

У залежності від конфігурації об'єкт поділяють на окремі елементарні ділянки: лінійні, плоскі, циліндричні, сферичні. Для кожної ділянки вибирають відповідну схему розташування перетворювачів. Крім основних груп перетворювачів, що служать для визначення координат, на об'єкті можуть розміщатися допоміжні (блокувальні) групи для просторової селекції зони виявлених джерел шуму.

Розміщення ПАЕ повинне забезпечувати контроль усієї поверхні контрольованого об'єкта. У ряді випадків за узгодженням із замовником допускається розміщення ПАЕ тільки в тих областях об'єкта, що вважаються важливими.

Координати джерел акустичної емісії обчислюють по різниці часу приходу (РЧП) сигналів на перетворювачі, розташовані на поверхні контрольованого об'єкта.

У випадку багатоканальної локації відстань між ПАЕ вибирають таким чином, щоб сигнал від імітатора АЕ (зламу олівця), розташованого в будь-якому місці контрольованої зони, виявлявся тією мінімальною кількістю перетворювачів, що потрібна для розрахунку координат.

Відстань між ПАЕ при використанні зонної локації задають таким чином, щоб сигнал АЕ від зламу олівця (або сигнал АЕ від іншого імітатора АЕ) реєструвався в будь-якому місці контрольованої зони хоча б одним ПАЕ і мав

амплітуду не менше заданої. Як правило, різниця амплітуд імітатора АЕ при розташуванні його поблизу ПАЕ і на краю зони не повинна перевищувати 20 дБ. Максимальна відстань між ПАЕ не повинна перевищувати відстані, що у 1,5 рази більша граничної. Останню визначають як відстань, при якій амплітуда сигналу від імітатора АЕ (зламу грифеля олівця) дорівнює граничній напрузі.

При контролі об'єктів з високим загасанням пружних хвиль рекомендується використовувати дві робочі частоти: низьку - у діапазоні 20...60 кГц і більш високу - у діапазоні 100...500 кГц. Допускається застосування двох і більше робочих частот (відповідно двох і більше частотних каналів). У цьому випадку високочастотні канали використовують для виявлення й оцінки АЕ джерел. Низькочастотні канали варто використовувати для виявлення тих джерел АЕ, що можуть бути пропущені через велике загасання сигналів АЕ на високій частоті. Якщо виявлена значна активність на низькій частоті й відсутня реєстрація по високочастотних каналах, варто переустановити високочастотні ПАЕ і повторити контроль.

Вимірювання швидкості звуку, використовуване для розрахунку координат джерел АЕ, роблять у такий спосіб. Імітатор АЕ розташовують поза групами ПАЕ на лінії, що з'єднує ПАЕ, на відстані 10...20 см від одного з них. Провівши багаторазові виміри (не менше п'яти) для різних пар ПАЕ, визначають середній час поширення. По ньому і відомій відстані між ПАЕ обчислюють швидкість поширення сигналів АЕ.

Перевірку працездатності АЕ системи виконують негайно після установки ПАЕ на контрольований об'єкт, а також після проведення випробувань, шляхом збудження акустичного сигналу АЕ імітатором, розташованим на визначеній відстані від кожного ПАЕ. Відхилення зареєстрованої амплітуди сигналу АЕ не повинне перевищувати 3 дБ від середньої величини для всіх каналів. У випадку перевищення зазначеного значення необхідно усунути причину, у противному випадку варто провести повторний контроль.

Рівень чутливості різних груп ПАЕ може відрізнятися. У цьому випадку повинна бути оцінка в протоколі контролю й обґрунтування в звіті. При оцінці результатів контролю необхідно враховувати розкид чутливості каналів.

Коефіцієнт підсилення каналів і поріг амплітудної дискримінації вибирають з урахуванням очікуваного діапазону амплітуд сигналів АЕ. При цьому стежать, щоб забезпечувалася неспотворена передача сигналів АЕ, і частота викидів перешкод у каналі не перевищувала в середньому один у сто секунд. Перевіряється значення порога, число викидів сигналу АЕ, енергія, амплітуда й інші необхідні характеристики за технологією, записаною в технології контролю.

Основним фактором, що обмежує ефективність АЕ контролю, є шуми. Усі шуми повинні бути ідентифіковані, мінімізовані, повинні бути зареєстровані їхні параметри. Після проведення настроювання апаратури протягом 15 хв. перевіряється шумовий фон, що повинен бути нижчий встановленого граничного рівня. При реєстрації шумів, рівень яких перевищує поріг, джерело шумів повинне бути виключене, або необхідно припинити контроль.

Місце розташування джерел АЕ варто визначати з заданою точністю або з використанням багатоканальної системи локації, або з використанням зонного контролю.

Точність багатоканальної локації повинна бути не менша величини, рівної двом товщинам стінки чи 5% відстані між ПАЕ в залежності від того, яка величина більше. Визначення координат джерел АЕ сигналів роблять у режимі планарної локації, тобто не визначається глибина залягання джерела.

У процесі контролю роблять оперативне нагромадження й обробку даних. Система контролю повинна забезпечити реєстрацію і сигналізацію джерела АЕ, що відповідає IV класу (катастрофічно активному джерелу) у реальному масштабі часу. Після виконання контролю об'єкта здійснюється наступна обробка й аналіз даних у повному обсязі.

Нагромадження даних роблять після виділення параметрів сигналів АЕ. При наявності цифрових реєстраторів використовується запам'ятовування сигналів АЕ з метою наступного аналізу процесу.

Обробка й аналіз даних визначається обраною системою класифікації джерел АЕ і критеріями оцінки результатів контролю. Усі зареєстровані сигнали АЕ відносять до джерел АЕ в залежності від їхнього положення в контрольованому об'єкті. Класифікацію джерел роблять у залежності від значень параметрів.

Після обробки прийнятих сигналів результати контролю представляють у виді ідентифікованих і класифікованих джерел АЕ.

При ухваленні рішення за результатами АЕ контролю використовують дані, що повинні містити зведення про всі джерела АЕ, їхні класифікації і відомості щодо джерел АЕ, параметри яких перевищують припустимий рівень. Припустимий рівень джерела АЕ встановлюється при підготовці до АЕ контролю конкретного об'єкта.

Класифікацію джерел АЕ виконують з використанням наступних параметрів сигналів: сумарного рахунку, числа імпульсів, амплітуди (амплітудного розподілу), енергії (або енергетичного параметра), швидкості рахунку, активності, концентрації джерел АЕ.

Виявлені й ідентифіковані джерела АЕ рекомендується поділяти на чотири класи.

Джерело I класу - пасивне джерело.

Джерело II класу - активне джерело.

Джерело III класу - критично активне джерело.

Джерело IV класу - катастрофічно активне джерело.

Вибір системи класифікації джерел АЕ і припустимого рівня (класу) джерел рекомендується здійснювати щоразу при АЕ контролі конкретного об'єкта

Результати АЕ контролю повинні міститися в звітних документах -

звіті, протоколі і висновку, що складаються організацією-виконавцем, яка проводить АЕ контроль. Протокол і висновок є частиною звіту. Вони також можуть бути використані як самостійні документи.

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ РЕЗЕРВУАРІВ НАФТОПРОДУКТІВ

3.1 Схеми накопичення похибок розробленої системи контролю

Якість засобу вимірювання характеризується його похибками. Окремі похибки пов'язані з засобами вимірювання, інші викликані методом вимірювання. У роботі [6] такі похибки називають, відповідно, інструментальними та методичними.

Інструментальними похибками засобів вимірювання називаються такі, які належать конкретному засобу вимірювання, можуть бути визначені при його випробуваннях і заносяться в паспорт цього засобу вимірювання.

До інструментальних похибок розробленої системи можна віднести:

- похибку первинного перетворювача, викликану невідповідністю електричних сигналів на виході перетворювача акустичній хвилі, що прийшла до перетворювача. Також п'єзоелектричні властивості матеріалу датчика залежать від температури і вологості повітря, що може впливати на параметри отриманих сигналів. Не можна не враховувати можливої неточності у виготовленні і збиранні датчика та вплив дефектів, які можуть виникнути під час експлуатації і транспортування. Для усунення впливу цих похибок методикою проведення випробувань за допомогою системи передбачено проведення калібрування датчиків перед кожним випробуванням;

- похибки підсилення і перетворення електричних сигналів виникають при проходженні сигналів через підсилювачі і фільтри системи і викликані власними шумами і частотними характеристиками цих ланок. Ці похибки виявляються ще в процесі розробки даних елементів і надалі враховуються при обробці й аналізі сигналів;

- похибку квантування, яка зумовлена використанням у системі аналого-цифрових перетворювачів. Ця похибка є невід'ємною для цифрової

техніки і може зменшуватись шляхом підвищення розрядності аналого-цифрових перетворювачів;

– похибку, викликану впливом зовнішніх факторів. Зокрема, зміною характеристик різних блоків і елементів системи під впливом температури, вологості, електромагнітних полів та інших факторів. Оскільки ПАЕ призначені для роботи на відкритому повітрі і в різні пори року, вони можуть зазнавати впливу зміни зовнішніх факторів. Тому необхідно детально вивчити характер зміни показів системи в залежності від зовнішніх умов і програмним методом вводити відповідні корективи;

– похибку, викликану недосконалістю виготовлення системи. Оскільки в процесі виготовлення системи допускаються певні неточності і невідповідності, при їх певному збігу можливі неточна передача, обробка і аналіз сигналів акустичної емісії. Ці похибки є індивідуальними для кожної окремої системи і виявляються при повірці і метрологічній атестації системи.

Крім інструментальних похибок при вимірюванні є й такі похибки, які не можуть бути віднесеними до інструментальних, а пов'язані з методикою проведення вимірювань. Такі похибки називаються методичними. В даному випадку однією з причин виникнення методичних похибок є те, що вимірюється не безпосередньо напружений стан металу, а хвилі акустичної емісії, які є наслідком зміни стану матеріалу. Така заміна того, що дійсно підлягає вимірюванню тим, що дещо відрізняється від необхідного, але простіше реалізується, дуже широко використовується при розробці засобів вимірювальної техніки і організації вимірювань. Відмінною особливістю методичних похибок є те, що вони можуть бути визначені лише шляхом створення математичної моделі або імітаційним моделюванням досліджуваного об'єкта і не можуть бути знайденими дослідженнями самого засобу вимірювальної техніки. До методичних похибок даної системи контролю можна віднести:

– похибку, пов'язану з непрямим характером визначення координат джерел сигналів акустичної емісії. Виникає внаслідок того, що координати сигналів розраховуються математичними методами, які допускають певні неточності;

– похибку, викликану особливостями явища акустичної емісії. Вона виникає внаслідок різноманітного характеру сигналів від дефектів, неоднакової швидкості поширення хвиль, явищами накладання і затухання сигналів і іншими особливостями поширення пружних коливань у твердих тілах;

– похибку, викликану особливостями методів апаратної обробки сигналів АЕ. Внаслідок використання складної апаратури можливі ситуації, коли отриманий сигнал буде оброблений неправильно або не буде оброблений зовсім, що може викликати різного роду неточності у показах системи;

– похибку реального об'єкту контролю. Ця похибка виникає внаслідок відмінності контрольованого об'єкту від його математичної моделі і, як наслідок, відмінності сигналів, що виникають у цьому об'єкті. Ця похибка є індивідуальною для кожного окремого об'єкту і повинна оцінюватись і виключатись безпосередньо перед контролем, наприклад застосуванням еталонних джерел акустичної емісії, детального аналізу об'єкту і т.д.

Узагальнена схема накопичення сумарної відносної похибки при проведенні контролю резервуарів нафтопродуктів приведена на плакаті МР.МТм- .00.00.002.

3.2 Оцінка методичної похибки системи

Для аналізу похибок вимірювання координат дефектів і вплив на їх числове значення встановлення перетворювачів скористаємося прийомами, що використовуються для розрахунку похибок визначення положення об'єктів у радіонавігації.

Місцезнаходження об'єкта визначають по так званих лініях положення. У методі гіперболічного перетину ними є гіперболи. Середня квадратична

похибка визначення лінії положення становить:

$$\sigma_{pi} = \frac{\sigma_i}{g_i}, \quad (3.1)$$

де σ_i - середня квадратична похибка вимірювання параметра, що визначає i -ту лінію положення;

g_i - модуль градієнта функції, що характеризує лінію положення.

Середня квадратична радіальна похибка визначення положення об'єкта по лініях положення визначається формулою:

$$\sigma_r = \sqrt{\sum_1^n \frac{\sigma_{pi}^2}{\sin^2 \omega_{i,i+1}}}, \quad (3.2)$$

де $\omega_{i,i+1}$ - кути перетину відповідних ліній положення в точці знаходження об'єкта.

У задачі локації дефектів за допомогою АЕ (розглядається найпоширеніший метод гіперболічного перетинання) параметром, що визначає лінію положення, є часова затримка, тому:

$$\sigma_i = \sigma_a c, \quad (3.3)$$

де σ_a - середня квадратична похибка вимірювання часової затримки. Функція, що характеризує лінію положення, має вигляд $s_i - r$. Модуль градієнта цієї функції:

$$g(s_i - r) = 2 \sin \frac{\psi_i}{2}, \quad (3.4)$$

де ψ_i кут, під яким із точки дефекту видно базу перетворювача. Отже:

$$\sigma_{pi} = \frac{\sigma_a c}{2 \sin \frac{\psi_i}{2}}, \quad (3.5)$$

При використанні мінімально необхідного числа додаткових перетворювачів ($i = 1, 2$) і однакових похибок $\sigma_{p1} = \sigma_{p2} = \sigma_p$:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{2}\sigma_p}{\sin \omega_{1,2}}. \quad (3.6)$$

Провівши деякі тригонометричні перетворення, отримаємо:

$$\sigma_r = \sigma_r cK, \quad (3.7)$$

де

$$K = \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\psi_1}{2} + \sin^2 \frac{\psi_2}{2}}}{2 \sin \frac{\psi_1}{2} \sin \frac{\psi_2}{2} \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}},$$

(3.8)

Проаналізуємо отримані залежності. Як видно з формули (3.5), похибка визначення лінії положення крім σ_{α} істотно залежить від кута ψ_i . Мінімальна похибка відповідає $\psi_i = 2\pi$, тобто знаходженню дефекту на базовій лінії. Її значення зростає зі зменшенням кута ψ_i при віддаленні дефекту від базової лінії, наближенні до лінії продовження бази ($\psi_i \rightarrow 0$) і зменшення бази.

Вплив на радіальну похибку взаємного розташування перетворювачів і дефекту можна оцінити, побудувавши за допомогою графоаналітичних методів для заданого розташування перетворювачів сітку ліній рівних похибок. Для будь-якої обраної точки можливого розташування дефекту визначають кути ψ_1 і ψ_2 . З'єднуючи точки $\sigma_{\alpha} = const$, одержують лінії рівних похибок. Характер сімейства ліній рівних похибок для різних комбінацій кутів наведений на рис. Г.1 (додаток Г).

Якщо відома допустима похибка, то умова $\sigma_{rdon} \leq \sigma_r$ визначає так звану робочу область для обраного розташування перетворювачів (окреслена лінією рівної похибки $\sigma_{rdon} = \sigma_r$).

Аналіз впливу кута $\alpha_1 - \alpha_2$ на форму і площу робочої області при фіксованих базах перетворювачів показує, що при $\alpha_1 - \alpha_2 = 2\pi$ зони I і II робочої області рівні по площі і симетрично розташовані відносно базових

ліній. Максимум площі зони спостерігається при $\alpha_1 - \alpha_2 = 140 \div 150^\circ$, а площа зони II зменшується. Бічні пелюстки зон III й IV при цьому невеликі. У випадку подальшого зменшення кута $\alpha_1 - \alpha_2$ площа зон III і IV збільшується, однак площі основних зон I і II зменшуються, що веде до зменшення загальної площі робочої області. Зони V й VI звичайно не будують, тому що вони не мають практичного значення.

Друга група методичних похибок обумовлена принципами побудови вимірювальної апаратури. При визначенні координат передбачається, що сигнали АЕ являють собою серію послідовних, відмінних у 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 підбраному рівні дискримінації).

Проводячи синхронний запис у часі імпульсів АЕ по трьох каналах, одержать схематично наступну картину (рис. Д.1, додаток Д). Одиничний акт АЕ від першого джерела дасть локаційну серію імпульсів 1—0, 1—1, 1—2 (перша цифра номер джерела, друга номер каналу) у всіх трьох каналах апаратури. Друге джерело дасть локаційну серію 2—0, 2—1, 2—2 і т.д. Для показаної послідовності приходу імпульсів:

$$\Delta T^{(i)} = \tau_2^{(i)} - \tau_1^{(i)}, \quad (3.9)$$

де верхній індекс - номер джерела АЕ, нижній - номер каналу апаратури;

$\Delta T^{(i)}$ - тривалість і-ї локаційної серії імпульсів;

$\tau_2^{(i)}, \tau_1^{(i)}$ - часові затримки для і-ї серії.

Часова затримка між послідовними серіями:

$$\Delta T^{(i+1)} = t_1^{(i+1)} - t_1^{(i)}, \quad (3.10)$$

де $t_1^{(i+1)}, t_1^{(i)}$ - час приходу сигналів у каналі № 1 (для прийнятої послідовності приходу).

Оцінку $\Delta T^{(i+1)}$ можна виконати по формулі (3.10), знаючи координати

перетворювачів, швидкість поширення сигналів АЕ і задаючись можливими координатами джерел. Априорно оцінити $\Delta T^{(i+1)}$ значно складніше внаслідок нестационарного характеру проходження імпульсів АЕ і залежності цієї величини від чутливості апаратури, прийнятого рівня дискримінації і інших факторів. Деяке уявлення про порядок цієї величини може дати середній період проходження серій:

$$T = \frac{1}{N}, \quad (3.11)$$

Інтенсивність N , як свідчать експериментальні дані, може мінятися в значних межах від одиниць до сотень тисяч імпульсів у секунду. Тому на практиці можлива реалізація різних умов, зокрема:

$$\Delta T^{(i)} < \Delta T^{(i+1)}, \quad (3.12)$$

$$\Delta T^{(i)} > \Delta T^{(i+1)}. \quad (3.13)$$

Розглянемо можливі результати вимірів при різних сполученнях значень $\Delta T^{(i)}, \Delta T^{(i+1)}$ і $T_{пер}$. За умови (3.12) і $T_{пер} \leq \Delta T^{(i+1)} - \Delta T^{(i)}$ апаратура обробляє серію імпульсів від одного джерела і встигне зареєструвати інформацію до приходу наступної серії. За умови (3.12) і $T_{пер} > \Delta T^{(i+1)} - \Delta T^{(i)}$ будуть оброблені часові затримки для серії імпульсів, що належать різним джерелам, тобто локаційна серія імпульсів буде помилковою.

На рис. Д.1,а показано саме цей випадок. При $T_{пер} > \Delta T^{(2)} - \Delta T^{(1)}$ будуть оброблені часові затримки для двох імпульсів другого джерела і одного імпульсу від третього джерела. Зрозуміло, триангуляційний розрахунок вказує в цьому випадку на помилкове джерело (помилкові координати). Як видно, причиною є пропуск початку серії.

За умови (3.13) залежно від часу вимірювання також можливо одержати помилкові координати. На рис. Д.1,б показаний один з варіантів виникаючого при цьому накладання локаційних серій. Триангуляційний розрахунок також

приводить до одержання помилкових координат, оскільки використовуються сигнали від різних джерел.

Ще одною причиною одержання помилкових координат може стати фіксація в різних каналах сигналів, породжених різними типами хвиль, тобто внаслідок особливостей сигналів АЕ, викликаних реальними дефектами. Реальні джерела АЕ випромінюють, як правило, хвилі декількох типів, до яких чутливі первинні перетворювачі. Різні швидкості поширення цих хвиль можуть привести до того, що в оброблюваній серії з'являються сигнали від хвиль різних типів.

Наступним джерелом одержання помилкових координат може бути загасання сигналів АЕ. При роботі на високих частотах загасання є значним, тому ймовірна ситуація, коли сигнали буде реєструвати найближчий до джерела перетворювач, і не будуть реєструвати віддалені. У цьому випадку апаратура також обробляє сигнали, що надходять від різних джерел.

Помилкові координати одержують і при обробці в локаційній серії окрім корисних, сигналів, викликаних сторонніми шумами (перешкодами) при неоднаковому рівні дискримінації сигналів по каналах і неоднаковій чутливості каналів.

Одержання помилкових координат приводить до грубих похибок вимірювань. Априорний аналіз ймовірності таких помилок ускладнений через складний характер АЕ й залежність її від великої кількості факторів. Наприклад, імовірність одержати помилкові координати через пропуски початку серії і часового накладення серій визначається інтенсивністю АЕ і збільшується зі зростанням останньої. Інтенсивність ж залежить від типу матеріалу, його термообробки, характеру і закону навантаження, прийнятого рівня дискримінації сигналів і багатьох інших факторів.

Для усунення цих похибок застосовується ряд досить ефективних методів і програмний аналіз отриманих результатів, що дозволяє майже повністю виключити їх вплив на кінцевий результат.

Розрахувати похибку, викликану неідеальністю об'єкту контролю, теоретично неможливо. Її оцінка проводиться безпосередньо перед початком і під час контролю шляхом збудження в об'єкті еталонних сигналів АЕ і аналізу характеристик самого об'єкту. Результати цих досліджень враховуються програмним забезпеченням, яке автоматично вносить корективи в процесі аналізу отриманих сигналів АЕ.

3.3 Оцінка інструментальних похибок системи

Загальну інструментальну похибку визначимо, виходячи з структурної схеми розробленої системи. Її аналіз показує, що інструментальні похибки в основному накопичуються під час проходження аналогового сигналу від датчика через підсилювач, фільтр та селектор сигналів до аналого-цифрового перетворювача. На подальших етапах присутня тільки похибка квантування, яка через високу розрядність сучасних АЦП є дуже малою і не впливає ні на точність визначення координат, ні на точність визначення параметрів сигналів АЕ. Тому нею можна знехтувати.

Оскільки ці елементи з'єднані послідовно, їх сумарна похибка складе:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (3.14)$$

де δ_1 - відносна похибка підсилювача; δ_2 - відносна похибка фільтра; δ_3 - відносна похибка селектора сигналів.

В даному випадку похибки визначаються неточністю використовуваних елементів.

3.4 Шляхи підвищення точності системи контролю і вірогідності результатів контролю

Радіальна похибка локації дефекту буде мінімальною, якщо:

а) взаємне розташування перетворювачів створить максимум площі робочої області з урахуванням конфігурації контрольованої ділянки виробу;

б) взаємне розташування перетворювачів і можливої області виникнення дефекту буде таким, що остання ввійде в робочу область перетворювачів і буде перебувати в тій її частині, де розташовані лінії мінімальної рівної похибки.

Надлишок інформації внаслідок збільшення числа перетворювачів понад мінімально необхідний також дозволяє зменшити похибки локації. Використання трьох ліній локації (чотирьох перетворювачів) знижує похибку у середньому на 20—30% у порівнянні з використанням двох ліній локації (трьох перетворювачів).

Зупинимося на деяких методах селекції сигналів, що дозволяє уникнути розрахунку помилкових координат.

Одним з ефективних шляхів селекції помилкових серій є збільшення числа одночасно використовуваних перетворювачів (числа каналів апаратури). Якщо використати чотири перетворювачі, розташовані як показано на рис. 3.1, утвориться 18 зон, що створюють різну черговість приходу імпульсу АЕ до перетворювачів.

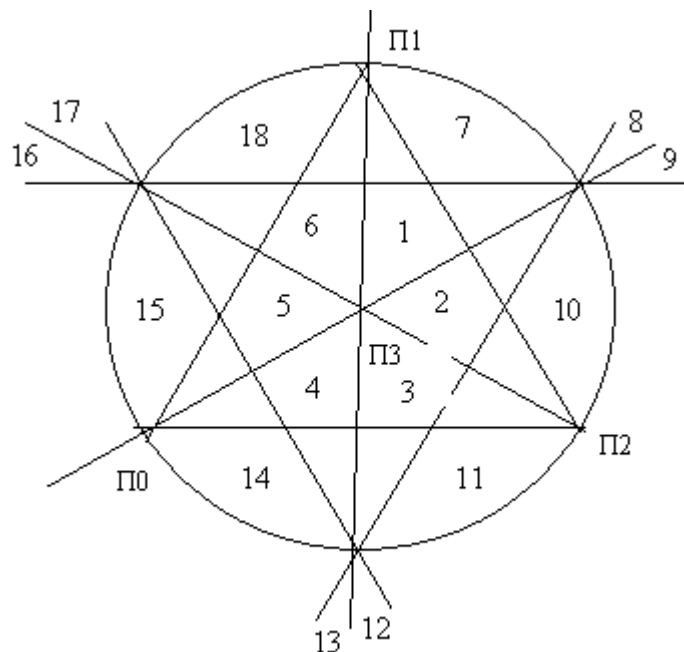


Рисунок 3.1 – Можливі зони джерел акустичної емісії для чотирьох перетворювачів

Наприклад, при розташуванні джерела в 16-й зоні черговість приходу до перетворювачів відповідає $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_3, \Pi_2$. Загальне ж число можливих комбінацій черговості приходу імпульсів для чотирьох перетворювачів складе $4! = 24$. Таким чином, шість комбінацій можуть бути обумовлені тільки помилковими серіями. Наприклад, черговість приходу $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ неможлива, тому що відстань від будь-якої точки площини до перетворювача Π_3 не більша, ніж відстань до кожного із трьох інших перетворювачів. Імпульсів, що створюють зазначені шість комбінацій приходу до перетворювачів, може не враховувати сама апаратура. При високій інтенсивності АЕ, коли поява різних комбінацій почерговостей приходу імпульсів приблизно рівноймовірна, застосування чотирьох перетворювачів дозволяє знизити число помилкових координат на 25%. Як уже відзначено вище, збільшення числа прийомних перетворювачів приводить також до зменшення похибки визначення координат справжніх джерел АЕ.

Другим можливим шляхом селекції помилкових серій є амплітудний аналіз сигналів. З фізичних міркувань очевидно, що амплітуди імпульсів, викликаних одним 1-м джерелом, повинні задовольняти співвідношенню (при нумерації перетворювачів відповідно до черговості приходу імпульсів):

$$A_k^{(i)} \geq A_{k+1}^{(i)}, \quad (3.15)$$

де k - номер перетворювача (каналу).

Інакше кажучи, наступний за часом приходу імпульс у істинній серії не може мати амплітуду більшу, ніж попередній, якщо вони обидва виходять із одного джерела. Порухення цієї умови означає, що в серії імпульсів є сигнали від різних джерел, що й приводить до одержання помилкових координат. Автоматичний амплітудний аналіз імпульсів в апаратурі дозволяє виділити ту частину помилкових серій, які породжені даною причиною. При високій інтенсивності АЕ виконання і порушення умови (3.) приблизно рівноймовірно, тому амплітудна селекція дозволяє приблизно вдвічі зменшити число помилкових серій.

Інші шляхи селекції помилкових сигналів пов'язані з відповідними причинами їхньої 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. У реальних умовах часто ефективно допомагає виключити сигнали, породжувані сторонніми шумами, застосування часової селекції. При досить розповсюдженому на практиці циклічному навантаженні, частина сторонніх механічних шумів групується усередині кожного циклу навантаження на ділянці, де корисні сигнали АЕ або взагалі відсутні, або їх кількість дуже мала. У цьому випадку врахування зазначених шумів в апаратурі можна виключити простим запиранням вхідних каналів на відповідних ділянках циклу навантаження (часове стробування).

Для боротьби з шумами можна також застосовувати просторову селекцію сигналів. На рис. 3.2 схематично показаний один з можливих принципів такої селекції.

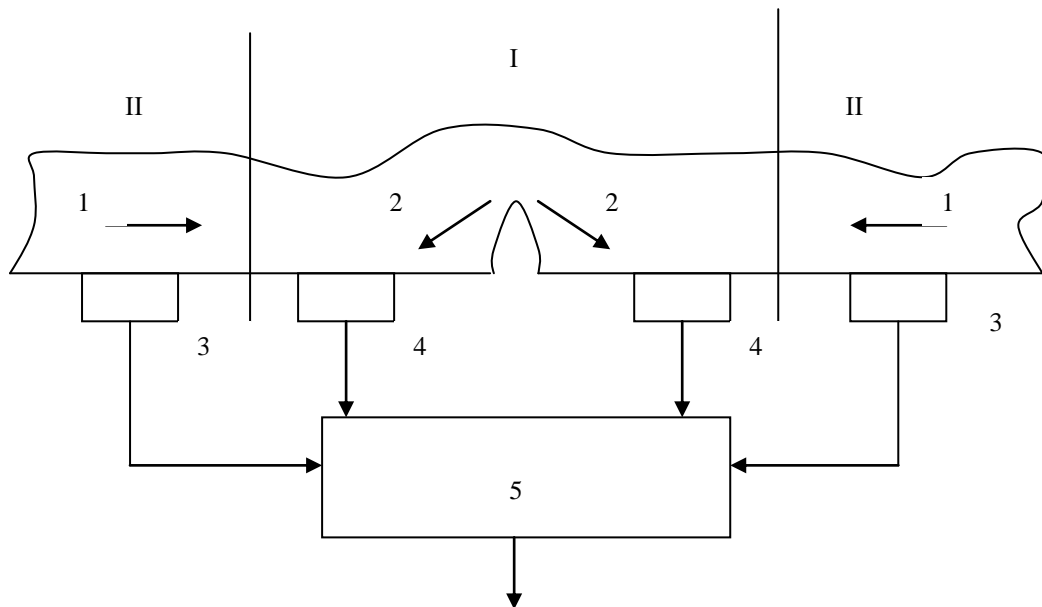


Рисунок 3.2 – Схема просторової селекції сигналів акустичної емісії

I – зона очікуваного розвитку дефекту; II – зони джерел шуму

Якщо сигнал 1 спочатку сприймається допоміжними перетворювачами 3,

а потім основними 4, це свідчить про те, що джерело сигналу лежить поза контрольованою зоною. Логічна стробуюча схема 5 у цьому випадку закриває апаратуру і сигнал не реєструється. Недоліком використання даного принципу є можливість втрати частини корисних сигналів 2.

Певною ознакою помилкових джерел є хаотичність їхнього розташування. Оскільки дефекти, що представляють небезпеку для міцності конструкції, розвиваються, як правило, протягом значного часу, кожен дефект характеризується сукупністю справжніх джерел, що локалізуються в зоні його розвитку. Цю ознаку також можна використати для селекції джерел. При візуальному спостереженні результатів триангуляційних розрахунків найбільш імовірним розташуванням дефектів відповідають місця скупчення джерел. При апаратурній селекції по цьому принципу в розрахунках беруть до уваги тільки імпульси, що дають приблизно однакову сукупність часових затримок.

3.5 Імовірнісна оцінка дефектів конструкції в процесі акустико-емісійного моніторингу

Розвиток методу акустичної емісії гальмується відсутністю надійних методик обробки АЕ інформації, які б давали можливість впевнено ідентифікувати джерело АЕ і дефект.

Просторова і часова невизначеність проявлення дефекту в матеріалі конструкції роблять необхідними статистичний підхід до інтерпретації даних акустико-емісійних випробувань. В той же час достовірність виявлення дефекту і визначення тенденції його розвитку повинна бути достатньо великою, щоб забезпечити своєчасність прийняття того чи іншого рішення. Необхідність оцінки стану досліджуваного об'єкту на основі отриманої достовірної інформації потребує використання результатів не окремих вимірювань, а потоків даних, які отримують як при випробуваннях, так і при моніторингу в процесі експлуатації, оскільки тільки в цьому випадку можна досягнути своєчасного оповіщення про виникнення чи розвиток небезпечного об'єкта і

усунути його чи умови його розвитку до настання аварійної ситуації чи катастрофи [16].

Виявлення і ідентифікація дефекту за допомогою акустичної емісії можливе при збігу наступних обставин:

1) Співпадають час активності джерела АЕ і час спостереження. Ймовірність спів падання цих подій оцінюється як P_q . Дана ймовірність при нормальних умовах може бути збільшена штучно шляхом проведення ряду міроприємств.

Неперервний моніторинг дозволяє проводити вимірювання при природних коливаннях на об'єкті, який знаходиться в режимі експлуатації. При цьому виявляються всі джерела, які знаходяться в зоні чутливості стаціонарної акустико-емісійної системи.

Вимірювання в режимі випробувань проводяться одночасно зі штучним збільшенням навантаження на об'єкт. При цьому може бути виявлено, як існуючі дефекти, які перейшли стадію активного розвитку, так і спровоковано появу нових дефектів (наприклад, пластичної деформації), що призводить до загрози руйнування об'єкта.

2) Джерело знаходиться в зоні чутливості перетворювача АЕ. Ймовірність події може бути позначена як $P_{лок}$. Дана ймовірність може бути збільшена через використання багатоканальних систем і приймальних антен ПАЕ, зона дії яких охоплює весь об'єкт, а також шляхом виявлення ділянок конструкції, які найбільше піддаються дії надлишкових навантажень.

3) Сигнал може бути виявлений на фоні завад, тобто рівень сигналу перевищує рівень завади, або характеристики сигналу суттєво відрізняються від характеристик завади. Якщо позначити ймовірність маскування сигналу АЕ шумом $P_{шум}$, то ймовірність виявлення сигналу відповідно буде $P_{сигн}=1-P_{шум}$. Збільшення $P_{сигн}$ може бути досягнуто як апаратними засобами, так і застосуванням сучасних методів обробки сигналів.

Таким чином, ймовірність виявлення довільного джерела АЕ , за

умови, що він існує, є добутком:

$$P_{вияв} = P_{ч} \cdot P_{лок} \cdot P_{сигн} = P_{ч} \cdot P_{лок} \cdot (1 - P_{шум}) \quad (3.16)$$

Виявлення джерела АЕ є першою стадією його ідентифікації та ідентифікації дефекту. На наступних стадіях повинні бути реалізовані наступні ймовірності:

а) Джерело АЕ належить до одного з відомих типів: теча, пластична деформація, зростаюча тріщина, корозія і т.п. Якщо кожному з типів джерел АЕ формально поставити у відповідність вектор станів $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, то ймовірність належності джерела певного типу описується розподілом:

$$P_{тип} = P(X) \quad (3.17)$$

Дана ймовірність значною мірою повинна визначатися за результатами статистичних досліджень при проведенні діагностики методами неруйнівного і руйнівного контролю.

б) Джерело АЕ можна вважати ідентифікованим тоді, коли визначено наявність, місцезнаходження, а також збіг набору ознак, які спостерігаються, з характерними для даного типу джерела. Ймовірність збігу спостережуваних ознак з “еталонними” визначається при порівнянні відповідних гіпотез за критерієм близькості. Таким чином, найбільша ймовірність, з якою можна визначити тип дефекту – джерела акустичної емісії визначається виразом:

$$P_{іден} = \max_x (P_{вияв} \cdot P_{тип} \cdot P_{тип}(X)) \quad (3.18)$$

Наведені ймовірності повинні бути визначені для кожної конкретної конструкції при розробці методики, системи і програмного забезпечення моніторингу об'єкта в результаті аналізу і попередньої діагностики.

Найвідповідальнішим при діагностиці будь-якого об'єкту є момент прийняття рішення і визначення границь довірчих інтервалів, в яких автоматично приймається і протоколюється те чи інше рішення, оскільки при розробці методик акустико-емісійного моніторингу конструкції результати

вимірювання повинні передаватися оператору системою в індикаторному режимі для зменшення впливу людського фактору.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі розглянуто існуючі методи неруйнівного контролю резервуарів нафтопродуктів та обґрунтовано доцільність застосування акустико-емісійного моніторингу резервуарів.

Відповідно до поставлених у магістерській роботі задач:

1) вибрано метод акустичної емісії як оптимальний для моніторингу резервуарів нафтопродуктів у зв'язку з можливістю виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку;

2) наведено теоретичне обґрунтування методу акустичної емісії, зокрема описано поширення хвиль АЕ в півпросторі від дії симетричного локального джерела випромінювання, аспекти відбору сигналу АЕ та визначення координат джерел;

3) розроблено структурну схему системи для контролю стану резервуарів нафтопродуктів, відповідно до якої розроблено складальне креслення блоку обробки сигналів та схему електричну принципову;

4) розроблено методику роботи із системою для контролю стану резервуарів нафтопродуктів у режимі експлуатації;

5) проведено метрологічний аналіз розробленої системи і оцінку достовірності отримуваних нею результатів;

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Глоба, Венгерцев. Технічна діагностика і ремонт сталевих резервуарів. – К.: Либідь, 1999. – 254 с.
2. Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Сулим Г.Т. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування: монографія. — Львів: СПОЛОМ, 2007. — 480 с.
3. Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів атомних електростанцій / З. Т. Назарчук, І. М. Неклюдов, В. Р. Скальський. — К.: Наукова думка, 2016. — 307 с.
4. Білокур І.П. Акустичний контроль. – К.: Либідь, 1999. – 244 с.
5. Марасанов В.В., Шарко О.В., Шарко А.О. Статистична обробка сигналів акустичної емісії та їх параметрів. Вісник Національного університету "Львівська Політехніка", с. 98-107. 2016.
6. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навч. пос. для студентів вищ. навч. закл. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
7. Кісіль І.С. Конструювання вимірювальних приладів: Навч. пос. для студентів вищ. навч. закл. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 328 с.
8. Клим Б.П., Микитін Г.В., Почайський Є.П., Бухало О.П. Аспекти відбору сигналу акустичної емісії // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2000. – №3. - С.17-23.
9. Бігус Г.А., Дорохова Є.Г. Ідентифікація джерела АЕ на основі параметрів розподілу ймовірності амплітуди сигналу АЕ // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 1998. – №3. -С.25-31.
10. Недосека А.Я., Недосека С.А., Волошкевич І.Г. Хвилі деформацій, що виникають при локальній перебудові структури матеріалів// Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2004. – №3. - С.8-15.

11. Антипенко Є.І., Вісіловський Н.Г., Кельріх М.Б. Оцінка ефективності методу акустичної емісії при технічному діагностуванні об'єктів//Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2004. – №4. - С.11-14.

12. Розщепляєв Ю.С., Попов А.В. Оцінка ступеня небезпеки дефектів на основі інваріантів при акустико-емісійному неруйнівному контролі // Контроль. Діагностика - 2001. - №3. - С. 29-32.

13. СТП 50.01-2000 Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Акустико-емісійний метод контролю.

14. Tetelman, AS, Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. A symposium presentad at the December Committee Week American Society for Testing and Матеріали. Bal Harbour. 7-8 December, 1971, pp. 30-40.

15. Патон Б.Є., Лобанов Л.М. Недосека А.Я. та ін. Акустична емісія та ресурс конструкцій: Теорія, методи, технології, засоби, застосування. Київ, Вид-во «Індпром».– 2012

ДОДАТКИ

Додаток А

Причини руйнувань і аварій резервуарів

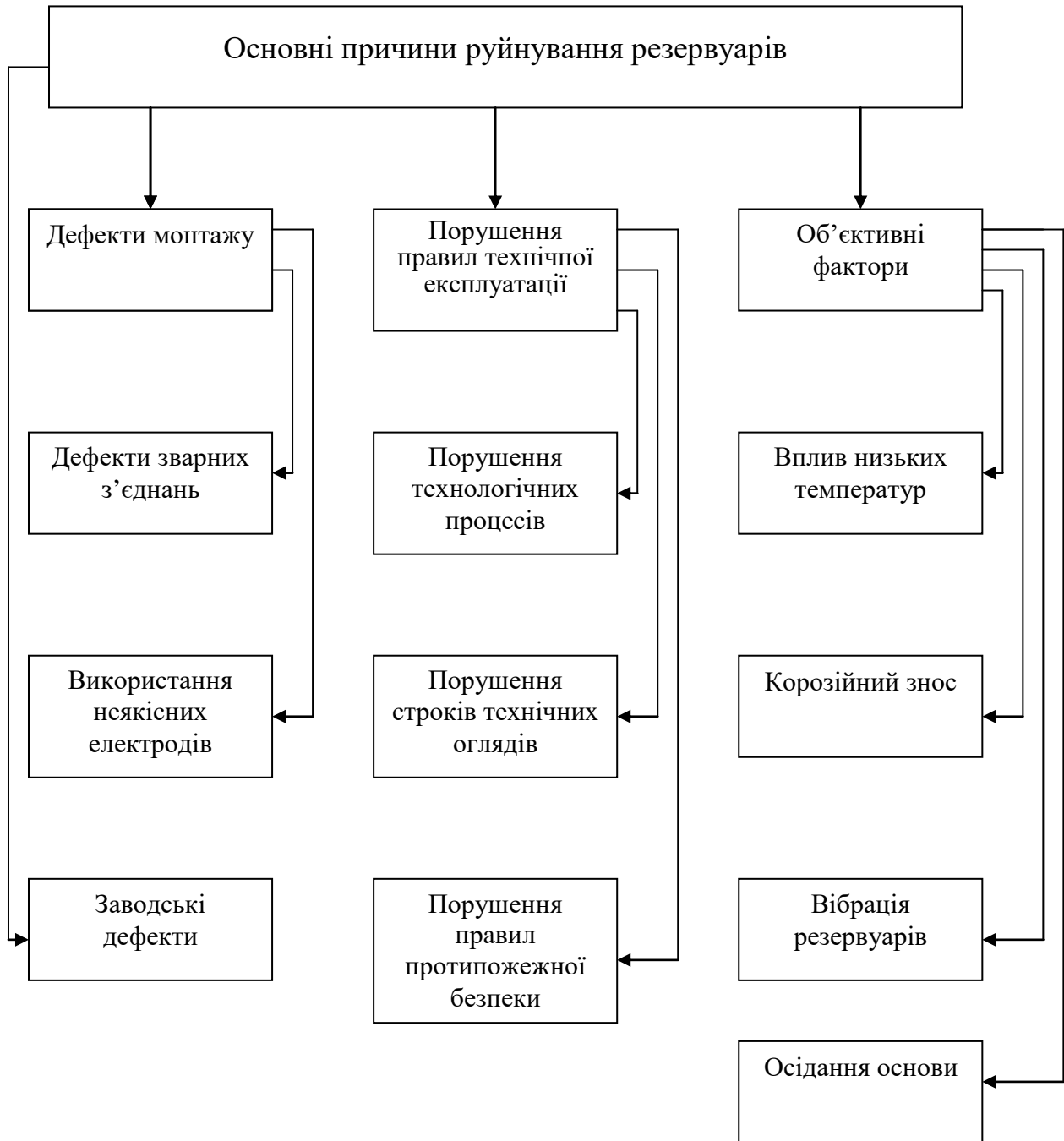


Рисунок А.1 – Класифікація основних причин руйнувань і аварій резервуарів

Додаток Б

Графічне подання алгоритму попереджувачого технічного обслуговування

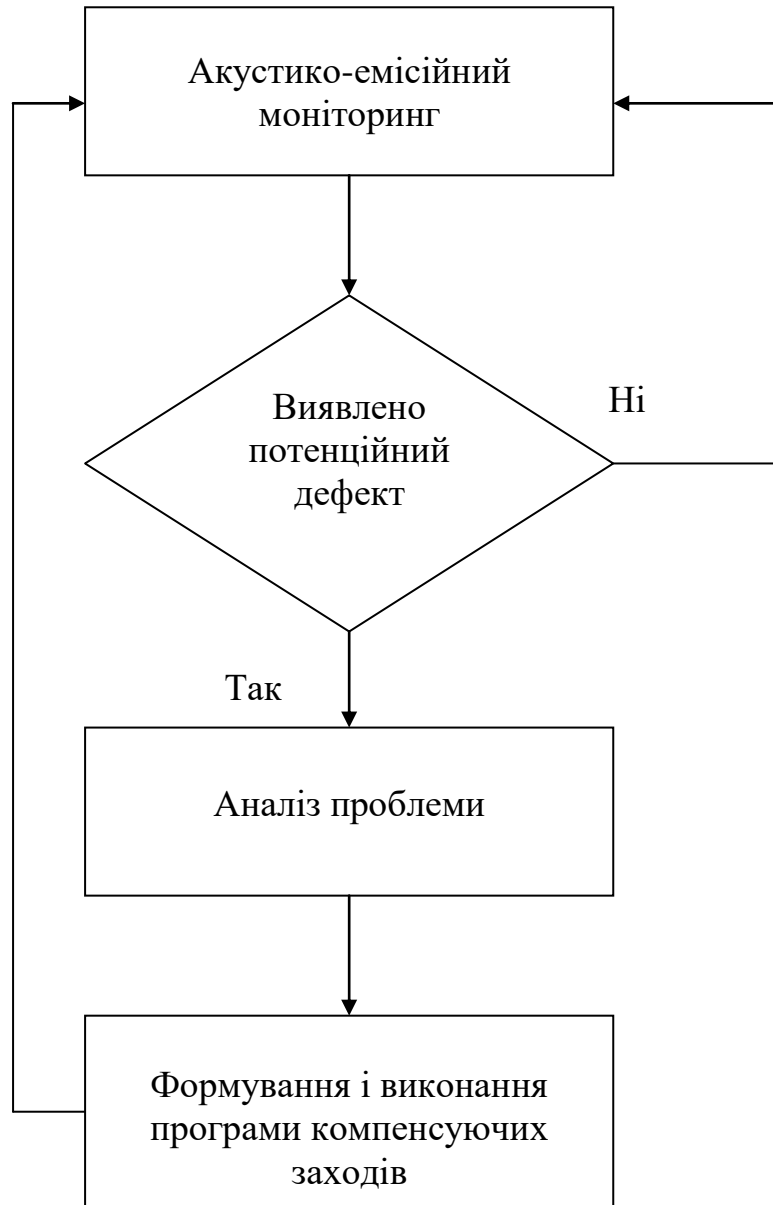


Рисунок Б.1 – Алгоритм попереджувачого технічного обслуговування

Додаток В
Основні характеристики п'єзоматеріалів

Таблиця В.1 – Характеристики п'єзоматеріалів

Матеріал	Густина, $\rho \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	Швидкість звуку, $c \cdot 10^3$ м/с	Температура Кюрі, °С	П'єзомодуль , $d \cdot 10^{12}$ кл/н	Відносна діелектрична проникність	Коеф. Пуассона
ЦТС 19	7,45	3 - 3,6	290	100 – 200	1725	0,38
ЦТС 21	7	3,5 - 3,8	400	26,6 – 66,6	550	0,33
ТБ 1	5,3	4,3 – 4,9	110	45 - 100	1500	0,3
PZT 8	7,6	3,1 – 3,4	300	93 - 217	1000	0,3
Кварц	2,65	5,75	573	2,3	4,5	0,3
Сульфат літію	2,05	4,7	573	16,3	10,3	0,3
Сегнетова сіль	1,77	3,1	18 – 24	275	350	0,3
Титанат барію	6,02	5,6 – 6,15	120	189 - 225	265 – 2130	0,3
Полівініл-хлорид	1,78	1,96	120	-23 - 35	12	0,3

Додаток Г

Характер сім'ї ліній рівних похибок для різних комбінацій кутів

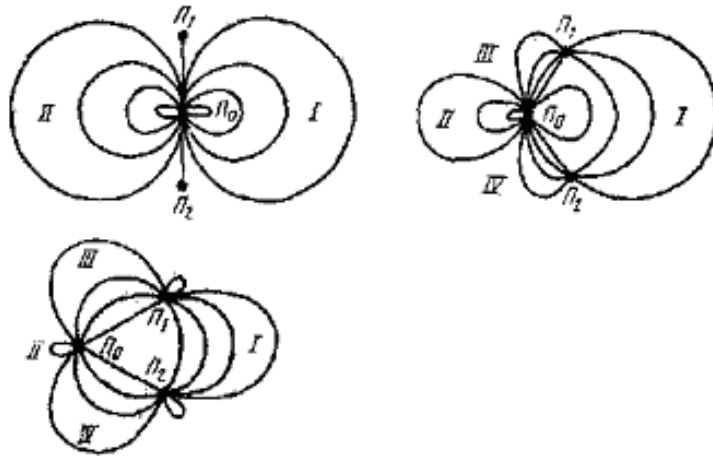
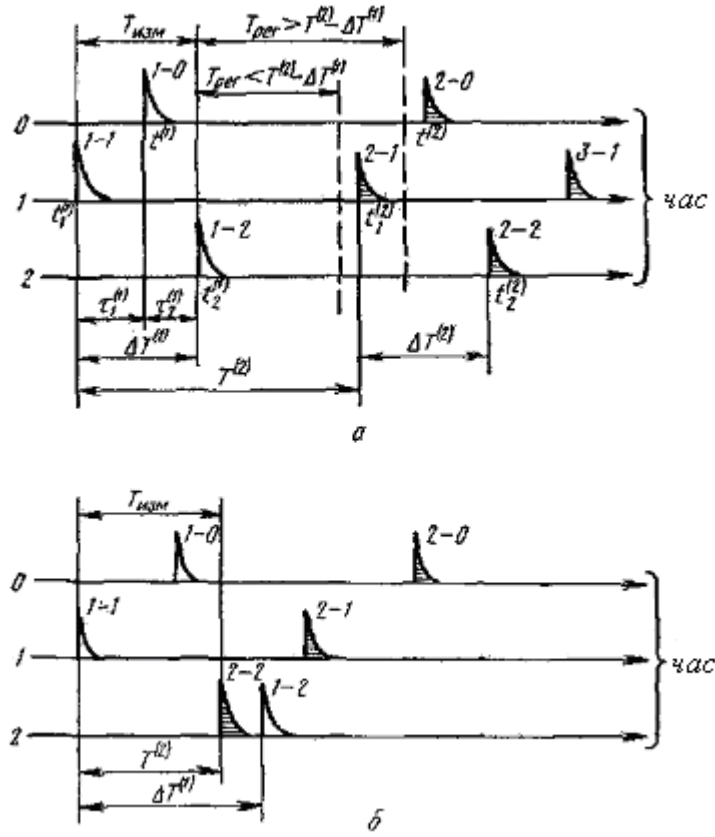


Рисунок Г.1 – Лінії рівних похибок локації при різному взаємному розміщенні перетворювачів

Додаток Д

Запис у часі імпульсів акустичної емісії по трьох каналах



а - часові затримки для серії імпульсів, що належать різним джерелам

б - накладання локаційних серій залежно від часу вимірювання

Рисунок Д.1 – Схема локаційних серій імпульсів акустичної емісії