

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Сенів Іван Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.179

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення приладу для контролю дефектів акустичним імпедансним методом

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Сенів Іван Михайлович

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Барна Ольга Борисівна, к.т.н.

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Віталій ЦИХ

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

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетикиКафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджментуОсвітній рівень перший (бакалаврський)Спеціальність 152- Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМВ.С. Цих« » 20 року**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**Сеніву Івану Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення приладу для контролю дефектів акустичним імпедансним методомкерівник роботи Барна Ольга Борисівна, к.т.н.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “30” квітня 2025 року № 270/72. Строк подання студентом роботи 20.06.20253. Вихідні дані до роботи об'єкт контролю – пластина товщиною 5мм, матеріал пластини – пластик; вид дефекту – тріщина, відшарування; діапазон глибини тріщини – 10%...30% від діаметра дроту

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

1. Аналіз методів та приладів ультразвукового контролю2. Теоретичне обґрунтування розробленого методу3. Розроблення структурної схеми приладу та моделювання розробленого методу4. Метрологічний аналіз5. Охорона праці

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

1. Аналіз методів та приладів ультразвукового контролю2. Теоретичні основи акустичного імпедансу3. Акустичний імпедансний давач та структурна схема приладу4. Моделювання зміни акустичного імпедансу у MatLab5. Метрологічний аналіз

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗНС та БП		
нормо контроль	Лютак З.П., проф. каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання 05.05.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	15.05.2025	
2.	<i>Аналіз методів та приладів ультразвукового контролю</i>	19.05.2025	
3.	<i>Теоретичне обґрунтування розробленого методу</i>	26.05.2025	
4.	<i>Розроблення структурної схеми приладу та моделювання розробленого методу</i>	02.06.2025	
5.	<i>Моделювання зміни акустичного імпедансу у MatLab</i>	09.06.2025	
	<i>Метрологічний аналіз</i>	12.06.2025	
6.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	19.06.2025	

Студент _____ Сенів І.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)Керівник роботи _____ Барна О. Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Аналіз методів та приладів ультразвукового контролю	7
1.1 Аналіз методів ультразвукового контролю	7
1.2 Прилади акустичного контролю.....	17
1.3 Постановка задачі дослідження.....	25
2 Теоретичне обґрунтування розробленого методу	28
2.1 Математичний опис пружних хвиль у твердих тілах.....	31
2.2 Типи акустичних хвиль у твердих пружних тілах.....	34
2.3 Чинники що впливають на швидкість акустичних хвиль.....	38
2.4 Довжина хвилі	40
2.5 Акустичний імпеданс.....	41
2.6 Контактне середовище.....	46
2.7 Заломлення та розділення хвиль на межі розділу середовищ.....	46
2.8 Затухання акустичного коливання	56
2.9 Зміна амплітуди коливань в матеріалі від зміни частоти	58
3 Розроблення структурної схеми приладу та моделювання розробленого методу	62
3.1 Розроблення функціональної схеми.....	62
3.2 Методика роботи із розробленим приладом для контролю дефектів	65
3.3 Моделювання розробленого методу програмним засобом MatLAB.....	67
4 Метрологічний аналіз	73
4.1 Аналіз існуючих невизначеностей	73
4.2 Аналіз похибок при застосуванні розробленого методу	80

ВСТУП

Актуальність теми. Задачі ультразвукового неруйнівного контролю полягають як у визначенні геометричних розмірів (товщини, довжини), так і у знаходженні дефектів об'єктів контролю.

Ультразвукова (УЗ) дефектоскопія — один із розповсюджених методів неруйнівного контролю, в якому використовуються ультразвукові хвилі для виявлення прихованих дефектів (тріщин, непроварів, пор, розшарувань) усередині матеріалів та виробів. Як і ультразвукова товщинометрія, цей метод традиційно ґрунтується на луно-імпульсному принципі, що передбачає аналіз часу проходження та відбиття ультразвукових коливань від неоднорідностей у контрольованому об'єкті. Ультразвукова дефектоскопія активно розвивалася спочатку для контролю металевих конструкцій, проте зараз набула широкого розповсюдження для багатьох видів матеріалів, а також широко застосовується і в медичній діагностиці.

Основні напрями розвитку УЗ дефектоскопії визначається фізико-механічними властивостями металів і включає:

- створення різноманітних типів перетворювачів (прямих, похилих, фокуруючих), оптимізованих для виявлення різних орієнтацій дефектів;
- удосконалення апаратурної реалізації приладів для підвищення точності та надійності;
- розроблення нових способів вимірювання та аналізу параметрів і характеристик відбитих сигналів (амплітуди, часу проходження, форми).

Значний внесок у розвиток ультразвукової дефектоскопії зробили відомі українські та закордонні вчені, багато з яких також відзначилися у товщинометрії та загалом у сфері неруйнівного контролю: Альошин Н. П., Білокур І. П., Гурвіч А. К., Доммаркас В. І., Єрмолов І. М., Карпаш О. М., Карпельсон А. Є., Кісіль І. С., Ключев В. В., Корольов М. В., Крауткремер Г.,

Крауткремер Й., Луценко Г. Г., Мозговий О. В., Сухоруков В. В., Троїцький В. О. та інші.

Останнім часом стрімко зростає номенклатура нових конструкційних матеріалів, таких як композиційні матеріали (вуглепластики, склопластики), багат шарові матеріали, високотехнологічні сплави. Ці матеріали, порівняно з традиційними металами, мають низку особливостей, що ускладнюють ультразвукову дефектоскопію. Енергія хвилі швидше втрачається при поширенні, що знижує чутливість до дефектів на великих глибинах. Неоднорідна структура (наприклад, волокна в композитах, межі зерен) призводить до сильного розсіювання ультразвуку, зменшуючи відношення сигнал-шум. Це ускладнює виявлення дрібних дефектів та досягнення високої чутливості та роздільної здатності. Наявність різних властивостей у різних напрямках вимагає складніших алгоритмів контролю та спеціалізованих перетворювачів. У багат шарових та структурно складних матеріалах можуть виникати численні відбиття від внутрішніх меж, що накладаються одне на одне, ускладнюючи інтерпретацію дефектограм.

Метою досліджень є розроблення приладу для контролю дефектів акустичним імпедансним методом.

Об'єкт дослідження – процес поширення та відбиття ультразвукових сигналів в об'єктах із внутрішнім дефектом.

Предметом дослідження є ультразвукові методи виявлення дефектів об'єкта контролю. Методи дослідження включають: теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю, методи цифрової обробки сигналів, теорії сигналів, спектрального аналізу та теорії інформаційно-вимірювальних систем. Експериментальні дослідження виконувались шляхом комп'ютерного моделювання з використанням сучасних інформаційних технологій.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні методу ультразвукової дефектоскопії, який ґрунтується на визначенні та аналізі фазових характеристик сигналів акустичних коливань і виявленні стрибків амплітуди в моменти суміщення в часі відбитих сигналів, що необхідно для визначення наявності та розміщення дефектів об'єкта контролю.

Практичне значення одержаних результатів.

За допомогою запропонованого приладу можна визначати наявність дефектів в об'єкті контролю та їх розміщення.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИЛАДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

Ультразвукові методи набули широкого застосування в неруйнівному контролі завдяки своїй безпечності як для фахівця, так і для об'єкта контролю. Це робить їх популярним вибором серед інших методів неруйнівного контролю.

Вони широко застосовуються для контролю таких об'єктів, як трубопроводи, крани, мости, рейки, несучі частини автомобільного та залізничного транспорту, кораблі тощо. За допомогою ультразвуку можна виявляти внутрішні дефекти в матеріалах, такі як тріщини, пори, включення та інші неоднорідності, не пошкоджуючи сам об'єкт контролю. [1]

Ультразвукові методи знайшли також широке застосування в медицині.

Прилади такого типу використовуються для контролю стану внутрішніх органів людини, що дозволяє виявляти захворювання на ранніх стадіях.

Ультразвук застосовують для проведення операцій на очах, що дозволяє виконувати точні та малотравматичні втручання, а також для руйнування каменів у нирках, що дозволяє уникнути хірургічного втручання.

1.1 Аналіз методів ультразвукового контролю

Методи акустичного контролю поділяються на дві основні групи: активні та пасивні. [2]

Активні методи передбачають цілеспрямоване випромінювання акустичних сигналів в об'єкт контролю. Після взаємодії цих сигналів з матеріалом (відбиття або проходження), їх приймають та аналізують. Джерело акустичних хвиль у цьому випадку є зовнішнім і контрольованим.

При пасивних методах контролю акустичні сигнали не випромінюються, натомість реєструються та аналізуються власні акустичні сигнали (шуми), які генеруються самим об'єктом контролю в процесі його експлуатації, руйнування або при протіканні певних фізичних процесів. Класифікація пасивних методів базується на характері цих сигналів та джерелі їх виникнення. Прикладом є

акустична емісія, яка реєструє "тріск" матеріалу при його навантаженні та розвитку дефектів.

Активні методи, у свою чергу, класифікуються за принципом взаємодії хвилі з об'єктом або за типом коливань:

- методи відбиття: аналізується акустичний сигнал, що відбивається від внутрішніх структур або дефектів об'єкта. Прикладом є традиційна ультразвукова дефектоскопія та товщинометрія за луно-імпульсним методом.
- методи проходження: аналізується сигнал, який пройшов крізь об'єкт контролю.
- комбіновані методи: використовують як відбите, так і пройдене випромінювання для більш комплексного аналізу.
- методи власних коливань базуються на аналізі власних (резонансних) частот об'єкта, які змінюються при наявності дефектів.
- імпедансні методи: зосереджуються на вимірюванні зміни акустичного (механічного) імпедансу поверхні об'єкта або його коливальних характеристик під впливом дефекту, як ми обговорювали раніше.

Методи проходження (рис. 1.1) використовують випромінюючі та приймаючі перетворювачі, розташовані по різні чи по одну сторону контрольованого виробу. Застосовують імпульсне або (рідше) безперервне випромінювання і аналізують сигнал, що пройшов через контрольований об'єкт. До методів проходження відносять [2]:

- 1) амплітудний тіньовий метод;
- 2) часовий тіньовий метод;
- 3) велосиметричний метод.

Амплітудний тіньовий метод, оснований на реєстрації зменшення амплітуди наскрізного сигналу під впливом дефекту (рис. 1.1.а).

Часовий тіньовий метод, що базується на вимірюванні запізнення імпульсів, викликаного огинанням дефекту (рис. 1.1.б) .

Велосиметричний метод ґрунтується на аналізі зміни швидкості пружних хвиль, яка виникає через наявність дефекту. Наприклад, якщо у тонкому виробі

поширюється хвиля, то поява розшарування призводить до зниження її швидкості. Це зниження швидкості (яке може бути пов'язане з переходом на моду з меншою швидкістю, що іноді позначається штриховою лінією на графіках дисперсії) виявляється шляхом вимірювання зсуву фази хвилі, яка пройшла крізь матеріал. (рис. 1.1.в) [2].

У методах відбиття (рис. 1.2) використовують як один, так і два перетворювачі, застосовують імпульсне випромінювання. До цієї підгрупи відносять такі методи [2]:

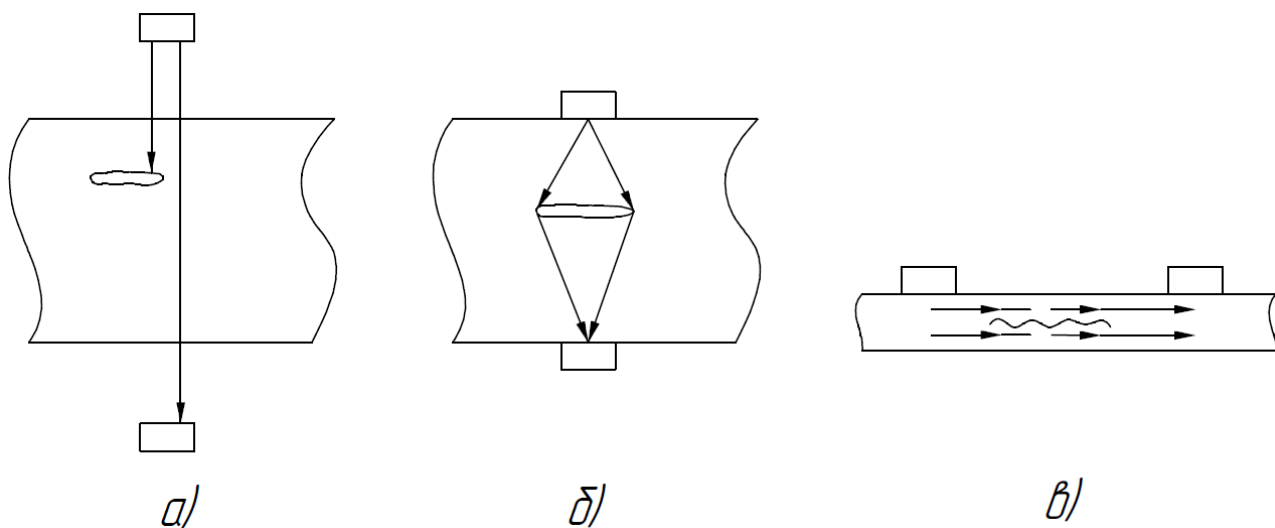
- 1) луно-метод;
- 2) луно-дзеркальний метод;
- 3) дельта-метод;
- 4) дифракційно-часовий метод;
- 5) ревербераційний метод.

У методах відбиття використовують один або два перетворювачі, застосовують, як правило, імпульсне випромінювання.

Луно-метод оснований на реєстрації луно-сигналів від дефекту (рис. 1.2.а). На екрані індикатора зазвичай спостерігають посланий (зондуєчий) імпульс, відбитий від протилежної – донної поверхні виробу (донний сигнал), і луно-сигнал від дефекту. Час приходу відбитого і донного імпульсів пропорційний глибині залягання дефекту і товщині виробу [4].

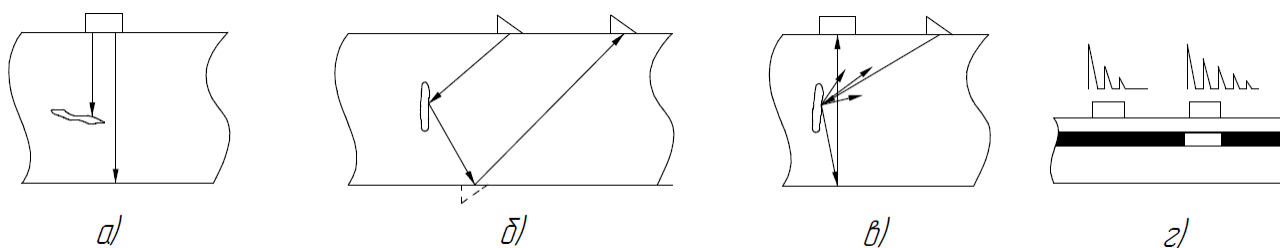
Дзеркальним луно-методом аналізують сигнали, дзеркально відбиті від донної поверхні виробу і дефекту (рис. 1.2.б).

Дельта-метод (рис. 1.2.в) оснований на використанні дифракції хвиль на дефекті. Частина падаючої на дефект поперечної хвилі від випромінювача відбивається дзеркально, а інша частина дифрагує у вигляді поперечної та трансформованої поздовжньої хвилі. При відбитті хвиля також частково трансформується в поздовжню хвилю. Дифрагована поздовжня хвиля надходить на приймач поздовжніх хвиль, який дещо пізніше бере також поздовжню хвилю, відбиту від нижньої поверхні виробу [4].



а – амплітудний тіньовий; б - часовий тіньовий; в – велосиметричний.

Рисунок 1.1 – Ультразвукові методи проходження



а - луно-метод; б - дзеркальний луна-метод; в - дельта-метод;

г - ревербераційний метод.

Рисунок 1.2 – Ультразвукові метод відбиття

Ревербераційний метод оснований на аналізі часу об'ємної реверберації в контрольованому об'єкті. Наприклад, при контролі двошарової конструкції час реверберації в шарі, з яким контактує перетворювач, менший в разі якісного з'єднання шарів, так як частина енергії переходить в інший шар (рис. 1.2, г).

Комбіновані методи (рис. 1.3) використовують принципи як проходження, так і відбиття акустичних хвиль [3]:

- 1) дзеркально-тіньовий метод;
- 2) луно-тіньовий метод;
- 3) луно-наскрізний метод.

Дзеркально-тіньовий метод заснований на вимірюванні амплітуди донного сигналу. На рис. 1.3.а відбитий промінь умовно зміщений у бік. За технікою виконання (фіксують луно-сигнал) його відносять до методів відображення, а з фізичної сутності контролю (вимірюють ослаблення сигналу, двічі минулого виріб в зоні дефекту) він близький до тіньового методу [3].

Луно-тіньовий метод заснований на аналізі як хвиль, які пройшли об'єкт контролю, так і відбитих хвиль (рис. 1.3.б).

Луно-наскрізним методом фіксують наскрізний сигнал I, сигнал II, дворазово відбитий у виробі, а у разі появи напівпрозорого дефекту і луно-наскрізні сигнали III, IV. Великий непрозорий дефект виявляють за зникнення або сильного зменшення сигналу I, тобто тіньовим методом, а також сигналу II. Напівпрозорі або невеликі дефекти виявляють за появою сигналів III і IV [3].

Від інших акустичних методів, які фокусуються на відбитих або прохідних хвилях, значно відрізняється імпедансний метод. Його суть полягає в аналізі зміни механічного або вхідного акустичного імпедансу ділянки поверхні контрольованого об'єкта, з якою безпосередньо взаємодіє перетворювач.

Як перетворювач у низькочастотних імпедансних дефектоскопах служить коливальний стрижень, що спирається на поверхню виробу, забезпечуючи сухий контакт (рис. 1.4.а). Між ними немає контактної рідини (сухий контакт) [4]. Наявність дефекту під поверхнею у вигляді розшарування робить ділянку поверхні над дефектом більш піддатливою, тобто знижує її механічний імпеданс. В результаті змінюється режим коливань самого стрижня-перетворювача,

зокрема зменшуються механічні напруги на приймачі, що служить індикатором дефекту. У високочастотних імпедансних дефектоскопах коливним елементом є п'єзопластина перетворювача звичайного типу, що генерує ультразвукові коливання. Поява дефекту типу розшарування поблизу поверхні виробу змінює вхідний акустичний імпеданс ділянки, що прозвучується. Це, у свою чергу, впливає на режим коливань генератора (або резонансної системи "перетворювач-матеріал"), тобто зміна амплітуди і фази вихідного сигналу свідчить про наявність дефекту. Застосовують також імпульсний варіант методу і спосіб, оснований на використанні поздовжніх хвиль. Даний метод також застосовують для контролю дефектів з'єднань в багатошарових конструкціях і для вимірювання твердості та інших фізико-механічних властивостей матеріалів [1].

Методи акустичного контролю, що базуються на власних коливаннях, працюють шляхом збудження в об'єкті контролю коливань (вимушених або вільних) та подальшого вимірювання їхніх параметрів, таких як власні частоти та величина втрат (демпфування) [1].

Для збудження вільних коливань об'єкт короткочасно піддається зовнішньому впливу, наприклад, удару. Після цього об'єкт вільно коливається на своїх власних резонансних частотах, а прилад фіксує та аналізує ці коливання, що згасають. Це схоже на дзвін, який продовжує звучати після удару.

Методи вимушених коливань передбачають постійний зв'язок об'єкта контролю з генератором, який збуджує коливання. Частота цього генератора поступово змінюється (розгортка за частотою). Прилад відстежує реакцію об'єкта, шукаючи піки амплітуди, що відповідають резонансним частотам матеріалу.

Основними інформаційними параметрами для обох типів методів є частоти вільних коливань та частоти резонансів вимушених коливань (для постійного збудження). Ці частоти, хоч і подібні, можуть дещо відрізнитися через вплив збуджувачого генератора у випадку вимушених коливань. Будь-які зміни в структурі матеріалу (наприклад, поява дефектів, зміна щільності або пружних властивостей) призводять до зміни цих власних (резонансних) частот або

величини затухання коливань, що і є ознакою дефекту або структурної неоднорідності.

Розрізняють інтегральні і локальні методи. В інтегральних методах аналізуються власні частоти об'єкта контролю як єдиного цілого, в локальних – окремі його ділянки.

Інтегральні методи вільного чи вимушеного коливання передбачають збудження коливань у всьому виробі або принаймні у значній його частині. Ці методи ідеально підходять для контролю фізико-механічних властивостей матеріалів, таких як бетон, кераміка, чавунне лиття, та інші. Їх також часто використовують для сортування деталей, що мають схожу форму, але відрізняються розмірами або матеріалом.

Величезною перевагою цих методів є їхня висока продуктивність, оскільки вони не вимагають сканування поверхні. Однак, у них є важливий недолік: вони не надають інформації про точне місце розташування чи характер конкретних дефектів. Вони дають загальну оцінку стану виробу.

На відміну від інтегральних, локальний метод вимушених коливань, який часто називають резонансним методом, фокусується на конкретній ділянці. У цьому випадку ультразвукові хвилі збуджуються в стінці виробу за допомогою п'єзоелектричного перетворювача (рис. 1.4, б). Прилад постійно змінює (модулює) частоту коливань і фіксує ті частоти, на яких виникають резонанси. Аналізуючи ці резонансні частоти, можна точно визначити товщину стінки виробу та наявність дефектів у цій конкретній ділянці. Це дозволяє отримувати більш деталізовану інформацію про локальні дефекти, ніж інтегральні методи.

На рис. 1.4, в подано схему контролю локальним методом вільних коливань. У цьому підході коливання в багатосаровій панелі збуджують ударами молоточка або вібратора. Після удару панель вільно коливається, а спектроаналізатор аналізує частотний спектр цих коливань. У виробих із дефектами спектр коливань, як правило, зміщується у бік вищих частот. Це свідчить про те, що дефектна ділянка стає "жорсткішою" або має меншу ефективну масу для коливань, змінюючи її резонансні характеристики.

При використанні акустичних методів контролю, дефекти можуть суттєво впливати на результати:

- дефекти, паралельні поверхні виробу (наприклад, розшарування або порожнини), можуть призвести до відхилень при вимірюванні товщини, оскільки ультразвукова хвиля буде відбиватися від дефекту, а не від справжньої задньої стінки;

- дефекти, розташовані під кутом до поверхні, часто призводять до зникнення резонансних явищ. Це відбувається тому, що вони розсіюють або відхиляють ультразвукові хвилі, заважаючи формуванню стабільних резонансів у матеріалі.

Серед методів вимушених коливань виділяють акустико-топографічний метод, що базується на реєстрації розподілу амплітуд пружних коливань на поверхні контрольованого об'єкта. Для цього на поверхню виробу наносять спеціальний порошок. На дефектних ділянках (особливо при резонансі) амплітуда коливань може збільшуватися. Це відбувається тому, що дефект змінює локальні акустичні властивості, викликаючи резонансні явища.

Внаслідок збільшення амплітуди коливань, на дефектній ділянці осідає менша кількість нанесеного порошку. Це створює візуальний "слід" дефекту на поверхні, дозволяючи його виявити.

Цей метод надає можливість візуалізувати дефекти на поверхні, що є значною перевагою для швидкого виявлення аномалій.

Пасивні акустичні методи контролю, на відміну від активних, не передбачають генерації власних акустичних сигналів. Натомість, вони зосереджені на реєстрації та аналізі природних пружних хвиль або коливань, що виникають в об'єкті контролю під час його роботи, навантаження або зміни структури. До цієї групи належать вібраційно-діагностичний, шумо-діагностичний та акустико-емісійний методи.

Вібраційно-діагностичний метод полягає в аналізі параметрів вібрації окремих частин або вузлів механізму, таких як ротори, підшипники або лопатки турбін. За допомогою контактних приймачів (датчиків вібрації) реєструються коливання, що передаються безпосередньо з поверхні об'єкта. Зміни в амплітуді, частоті або формі вібрації можуть вказувати на несправності, знос або дефекти.

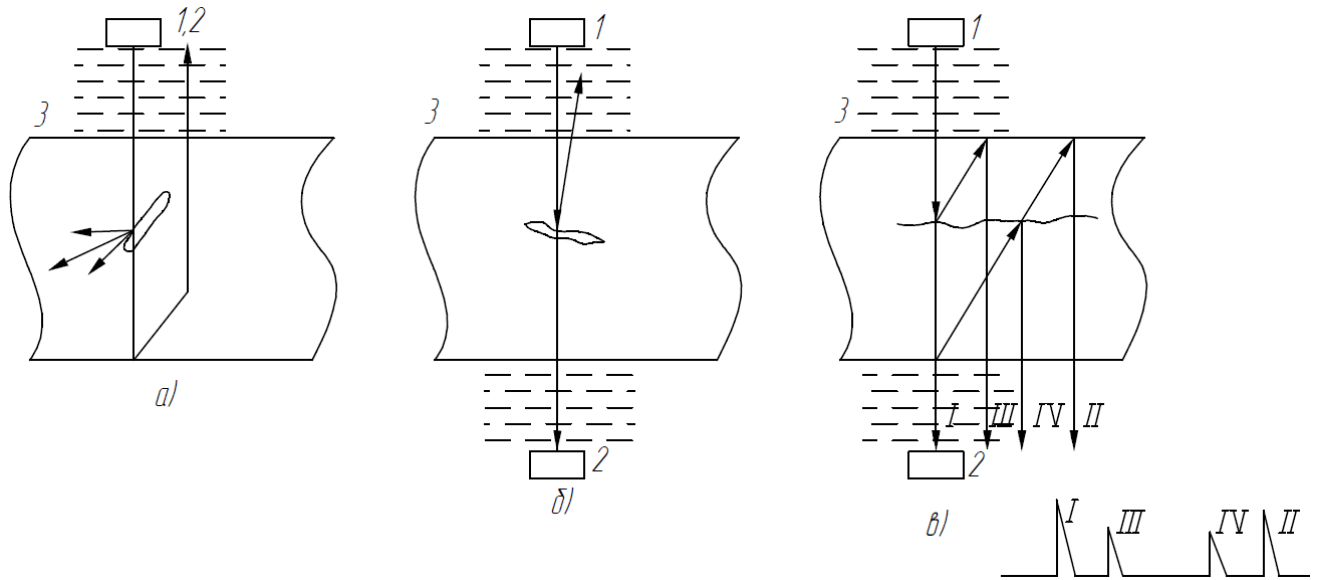
Шумо-діагностичний метод вивчає спектр шумів від працюючого механізму. Це може відбуватися на слух (для попередньої оцінки) або, що значно точніше, за допомогою мікрофонних приймачів, які перетворюють звукові коливання повітря в електричні сигнали. Аналіз характеру, інтенсивності та частотного складу шумів дозволяє виявити аномалії в роботі обладнання, спричинені, наприклад, тертям, ударами або зміною зазорів.

Акустико-емісійний метод (рис. 1.4, г) базується на реєстрації пружних хвиль, що виникають внаслідок явища акустичної емісії.

Акустична емісія — це виникнення акустичних хвиль (т. зв. "звуків") у матеріалі в результаті його динамічної внутрішньої перебудови структури. Ці хвилі генеруються у таких випадках, коли:

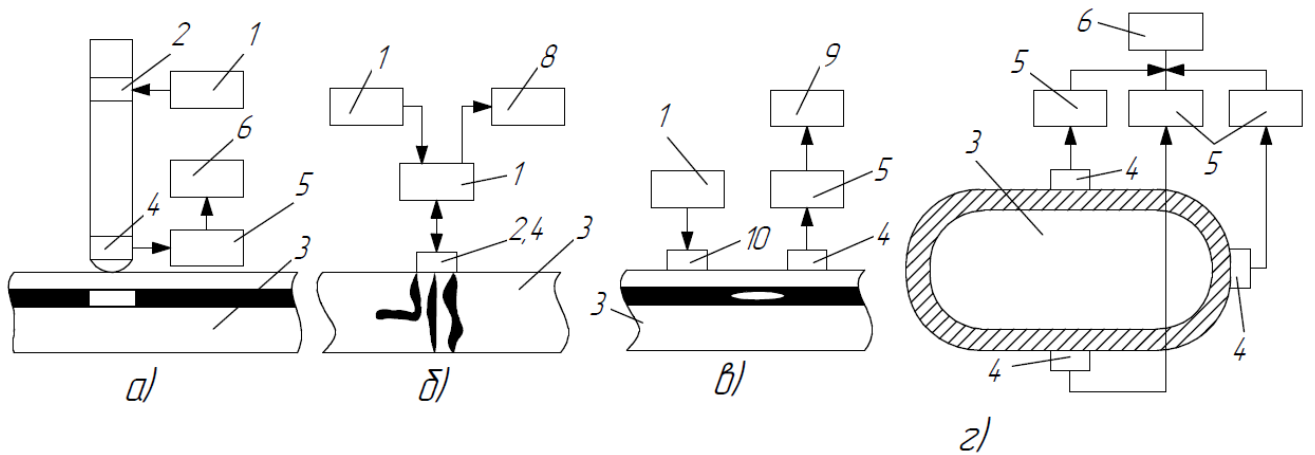
- виникають і розвиваються під навантаженням мікро- та макротріщини;
- відбувається перебудова кристалічної структури, наприклад, фазові перетворення;
- виникають локальні деформації;
- відбуваються такі процеси, як тертя, удари інших тіл об поверхню об'єкта контролю або руйнування внутрішніх зв'язків.

Зареєстровані акустико-емісійні сигнали аналізуються за їхньою інтенсивністю, частотою, формою та кількістю. Це дозволяє не тільки виявити дефект, а й часто відстежувати його розвиток у реальному часі та навіть визначати його тип. АЕ-метод є дуже чутливим і часто використовується для моніторингу цілісності конструкцій, таких як резервуари під тиском, трубопроводи, мости та авіаційні елементи.



а - дзеркально-тіньовий; б - луно-тіньової; в - луно-наскрізний.

Рисунок 1.3 – Ультразвукові комбінаційні методи



а - імпедансний; б - резонансний; в - вільних коливань; г - акустико-емісійний.

Рисунок 1.4 – Ультразвукові пасивні методи

Розглянуті акустичні методи діляться за частотною ознакою на низькочастотні і високочастотні. У низькочастотних методах коливання відбувається в звуковому і низькочастотному ультразвуковому діапазонах частот, а у високочастотних – коливання у високочастотному ультразвуковому діапазоні частот (від декількох сотень кілогерц до 50 МГц) . Для контролю металів переважно використовують високочастотні (ультразвукові) методи.

1.2 Прилади акустичного контролю

За призначенням акустичні прилади поділяють на:

- дефектоскопи, призначені в основному для виявлення дефектів типу неоднорідностей;
- товщиноміри, розраховані на вимірювання товщини стінок виробів при доступі з одного боку або для контролю товщини шарів покриттів на поверхні виробів;
- аналізатори фізико-механічних характеристик матеріалів, наприклад структуроскопи (для визначення середніх розмірів зерен металу, форми графітових включень в чавунах), – твердоміри (для вимірювання твердості поверхонь матеріалів акустичними способами), тензometri (для вимірювання напружень і деформацій у виробі по зміні швидкості акустичних коливань), вимірювачі пружних властивостей, міцності та інші. Часто всі прилади цього призначення об'єднують назвою "структуроскопи".

В ультразвуковій дефектоскопії для виявлення прихованих дефектів матеріалів здебільшого використовуються два типи пружних хвиль: поперечні та поздовжні. Швидкість поширення ультразвукових хвиль є однією з ключових характеристик, оскільки вона безпосередньо залежить від властивостей матеріалу або середовища, через яке вони проходять.

Ультразвукова хвиля несе певну енергію у напрямку свого руху, яка описується її інтенсивністю. Однак, у міру поширення ця інтенсивність поступово зменшується. Це явище називається загасанням. Інтенсивність загасання характеризується коефіцієнтом загасання, який дозволяє оцінити,

наскільки далеко хвиля може поширитися у матеріалі. У твердих тілах загасання складається з двох основних компонентів:

поглинання (перетворення акустичної енергії на тепло);

розсіювання (відхилення хвилі від прямолінійного шляху через неоднорідності структури матеріалу (наприклад, межі зерен, пори).

Для створення ультразвукових коливань використовується п'єзоелектричний ефект. Суть цього явища полягає в тому, що при механічній деформації (розтягуванні або стисненні) деяких кристалів (наприклад, кварцу або п'єзокераміки) у певному напрямку на їхніх поверхнях виникає електричний заряд. І навпаки, якщо на такі кристали подати електричні коливання від високочастотного генератора, вони починають деформуватися і вібрувати, перетворюючи електричну енергію на механічні (ультразвукові) коливання. Саме завдяки п'єзоелектричному ефекту стає можливим ефективно генерувати та приймати ультразвукові хвилі для неруйнівного контролю [5].

Якщо до поверхні деталі прикласти п'єзо пластину, яка підключена до генератора високої частоти, то в металі почнуть поширюватися ультразвукові хвилі, які потрапляючи на іншу п'єзо пластину, викликають в ній п'єзоелектричні заряди. Ці заряди можуть бути подані на підсилювач і відтворені індикатором. [5]

Для введення ультразвукових коливань і прийому відбитих від дефектів, а також захисту п'єзопластини від механічних пошкоджень і зносу останню поміщають в спеціальній пристрої, які називаються ультразвуковими п'єзоелектричний перетворювачами.

П'єзоелектричні перетворювачі діляться на кілька типів: суміщений, роздільний та роздільно-суміщений. Хвилі можуть поширюватися безперервно або у вигляді імпульсів. Це залежить від режиму роботи генератора.

Для проведення ультразвукового контролю застосовуються спеціальні ультразвукові дефектоскопи, які забезпечують випромінювання ультразвукових коливань, прийом і реєстрацію відбитих сигналів і визначення координат виявлення дефектів. [5]

Одними з кращих, в Україні, на даний час є наступні дефектоскопи.

Ультразвуковий дефектоскоп A1550 IntroVisor (рис. А.1) – універсальний портативний ультразвуковий дефектоскоп-томограф з цифровим фокусуванням антенної решітки і томографічною обробкою даних для контролю металів і пластмас. A1550 IntroVisor забезпечує візуалізацію внутрішньої структури об'єкта контролю у вигляді наочного зображення перетину в режимі реального часу, що істотно спрощує і робить більш доступною інтерпретацію отриманої інформації в порівнянні зі звичайним дефектоскопом. Крім наочності сприйняття, перевагами контролю із застосуванням ультразвукової томографії є швидкість, достовірність і простота налаштування приладу. [6]

Процес контролю з використанням дефектоскопа A1550 зводиться до сканування антенною решіткою області вздовж зварного шва і спостереження за екраном приладу. У разі, коли зварний шов не містить дефектів, на томограмі відсутні сигнали в контрольованій області. При появі дефектів на екрані виникають плями різної яскравості і кольору. При цьому оператор повинен знизити швидкість сканування, домогтися образу з найкращого чіткістю і яскравістю і зафіксувати картинку. Після цього виконують вимірювання координат відбивача і рівня сигналу і роблять висновки про тип дефекту і його розміри відповідно до використовуваних методичних рекомендацій [6].

Дефектоскоп A1550 відрізняється набором унікальних властивостей і особливостей, які на думку розробників, виділяють його з ряду аналогічних приладів і дозволяють краще вирішувати поставлені завдання і впроваджувати в масове застосування даний клас ультразвукових приладів. Щоб реалізувати фізичне фокусування, елементи антенної решітки генерують імпульси по черзі з певним інтервалом. Час затримки розрахований так, що б всі імпульси виявилися одночасно в заданій точці фокусу. При цьому дефекти поза зоною фокусу відображають уже не єдиний хвильовий фон а більш-менш розрізнені імпульси. В результаті чітка, достовірна картинка виходить лише у відносно невеликій області, куди фізично був сфокусований ультразвуковий пучок. Таким чином, чим далі дефект знаходиться від зони фокусу, тим гірше якість його візуалізації. Зрозуміти як орієнтовані відбивачі не потрапили в зону фокусування практично не можливо, проблематично встановити і їх реальний розмір [6].

Принциповою відмінністю дефектоскопа A1550 IntroVisor є відмова від фізичного підсумовування ультразвукових променів в тілі контрольованого матеріалу і перехід до віртуального підсумовування і формування образу перетину відповідно до принципу лінійної суперпозиції. Це означає що в окремий момент часу відбувається випромінювання і прийом сигналу тільки від однієї пари елементів. Методом перебору всіх пар виходить повний набір векторів луно-сигналів, і далі комп'ютером виконується взаємна обробка цих сигналів за певним алгоритмом що еквівалентно фізичному фокусуванню ультразвукових променів на кожній частоті. [6]

Додатковим удосконаленням томографа A1550 є розміщення комутаторів в корпусі антенної решітки. За рахунок використання сучасних компонентів і технологій, габарити решітки виходять такими за розмірами як перетворювач типового похилого ультразвукового дефектоскопа. При цьому спрощуються і здешевлюють кабель і роз'єм, що з'єднує антенну решітку з електронним блоком, що збільшує надійність цих елементів. Число елементів самої, A1550 обмежується лише міркуваннями фізичної та конструктивної доцільності а та ж продуктивністю обчислювальної системи. Для розробленого варіанту приладу допустимо використання антенної решітки з числом елементів від 16 до 64 і більше при можливості обробки даних від всіх сполучень елементів, що при оптимальному виборі параметрів системи охоплює більшість практичних завдань і забезпечує необхідну якість роботи томографа в цілому. Фактором що підвищує якість реконструювання зображення, є можливість оптимальної обробки кожної реалізації луна-сигналу до її підсумовування з іншими. Це дозволяє за рахунок спеціальних алгоритмів обліку діаграми спрямованості мінімізувати мертву зону, розширити кут огляду, працювати з використанням декількох типів хвиль, оптимізувати кількість елементів і розмір окремого елемента антенної решітки.

Ультразвуковий дефектоскоп A1214 Експерт (рис. А.2) – універсальний ультразвуковий дефектоскоп загального призначення, що забезпечує проведення типового і спеціального контролю високої точності. Поєднання основних сучасних функцій, оптимальної ціни і високої продуктивності роблять

дефектоскоп А1214 ЕКСПЕРТ оптимальним приладом для пошуку дефектів металу та інших промислових матеріалів. Даний прилад готовий до роботи, як в лабораторних умовах, так і на об'єктах схильних до агресивної дій навколишнього середовища, такої як температура, бруд і опади. [6]

Маючи сучасний функціонал, дефектоскоп А1214 Експерт досить простий, надійний і не дорогий. На сучасному рівні розвитку приладів, таке поєднання характеристик, зустрічається досить рідко. Серед технічних особливостей А1214 Експерт варто відмітити [6] :

- можливість ручного вимірювання рівня і координат прийнятих сигналів за допомогою екранного курсора;
- автоматичне визначення рівня сигналу і координат дефекту;
- програмована форма і регульована частота посилки зондуючих імпульсів;
- додаткові режими: "стоп - кадр" і "електронна тимчасова лупа";
- можливість роботи в режимі товщиноміра;
- сумісність з широким спектром перетворювачів різних виробників;
- можливість запису коментарів до збережених результатів;
- можливість синхронізації з персональним комп'ютером через USB-порт;
- ударостійкий корпус;
- зручний інтерфейс з клавішами швидкого доступу до функцій і налаштувань;
- діапазон робочих температур від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- час безперервної роботи без підзарядки 8-12 годин, в залежності від яскравості екрану. [6]

Ультразвуковий низькочастотний дефектоскоп DIO1000LF (рис А.3) використовується для досліджень пористих матеріалів, таких як бетон, камінь і т.п., а також для інших матеріалів з високою швидкістю загасання хвилі, таких як вуглепластик, пластмаси, композитні матеріали. Дефектоскоп DIO1000LF дозволяє знаходити в досліджуваних об'єктах порожнини, тріщини і сторонні включення, проводити товщинометрію і повністю дослідити структуру. [7]

Принциповою особливістю даного обладнання є його низька робоча частота від 20 кГц до 2 МГц. У комплект входить пара низькочастотних імпедансних перетворювачів. Зручний мультифункціональний інтерфейс.

Управління дефектоскопом відбувається за допомогою зручних клавіш. Висока чутливість кнопок дозволяє використовувати дефектоскоп в герметичному захисному чохлі. Інтерфейс приладу повністю русифікований.

Для перенесення даних на комп'ютер до дефектоскопії підключається флеш-нагромаджувач. Також є можливість підключення відео-, фотокамери для знімання об'єктів, з подальшим переглядом знімків. [7]

Ультразвукові товщиноміри часто використовуються в ситуаціях, коли є доступ тільки до однієї сторони поверхні виробу, товщина якого повинна бути визначена, наприклад: трубопроводи або в тих місцях, де прості механічні вимірювання неможливі або недоцільні з інших причин, таких як, розмір виробу або обмежений доступ, факт того, що вимірювання товщини може бути зроблено легко і швидко з одного боку, без необхідності вирізання будь-якої частини, є головною перевагою використання ультразвукового товщиноміра. Практично будь-який конструкційний матеріал може бути визначений за допомогою ультразвуку. Ультразвуковий товщиномір може бути використаний для металів, пластмас, композитів, скловолокна, кераміки і скла.

Було проаналізовано сучасні товщиноміри, доступні на ринку України. Опис кращих з них на даний час подано нижче.

Ультразвуковий товщиномір А1209 (рис. А.4). Прилад служить для вимірювання товщини стінок труб, посудин, котлів, обшивок суден, листового прокату та інших виробів з чорного і кольорового металу.

Головною особливістю А1209 є володіння запатентованою системою автоматичної адаптації до шорсткості і кривизни виробів. Завдяки особливості, зазначеній вище, користувач А1209 може здійснювати вимірювання стінок труб з корозією, а також плоских виробів, що мають гладку поверхню. Значно спростити і прискорити процес контролю дозволяє перетворювач без додаткових налаштувань. А1209 має можливість зберігати інформацію до 8000 вимірювань, при цьому пам'ять можна ділити на групи, що дуже зручно для систематизації

даних, отриманих в результаті контролю. Згодом ці дані можна переносити на комп'ютер для подальшої обробки та архівації. А1209 може мати в комплекті високотемпературний датчик, що дозволяє працювати при температурі від -20 до $+200$ градусів.

Ультразвуковий товщиномір ТУЗ-2 (рис. А.5) використовується для вимірювання товщини різних виробів з металів і неметалів, включаючи вироби, доступ до яких є тільки з одного боку. Прилад ТУЗ-2 може бути використаний у всіх галузях промисловості. За допомогою ультразвукового товщиноміра ТУЗ-2 вимірюється товщина стінок трубопроводів, посудин тиску, котлів та інших відповідальних і особливо небезпечних об'єктів, в тому числі для визначення ступеня корозійного і ерозійного зносу по залишковій товщині. [8]

Основні технічні характеристики ультразвукового товщиноміра ТУЗ-2:

- діапазон вимірювання (по сталі) $0,6...300$ мм робочі частоти перетворювача $5...10$ МГц;

- похибка вимірювання $\pm (0,1 + 0,005 \cdot H)$;

- роздільна здатність $0,1$ мм;

- діапазон установки швидкості ультразвуку $100 \dots 9999$ м/с;

- діапазон робочих температур $-30 \dots + 50$ °С;

- електричне живлення акумуляторне $2,4$ В;

- час безперервної роботи, не менше 20 годин;

- ступінь захисту корпусу IP 65;

- габарити електронного блоку, не більше $126 \times 85 \times 35$ мм;

- габарити перетворювача, не більше 25×40 мм;

- маса з акумулятором, не більше $0,5$ кг. [8]

Ультразвуковий товщиномір UTG-8 (рис. А.6) здатний вимірювати товщину різних матеріалів з точністю до або $\pm 0,01$ міліметра. Застосовується в різних галузях промисловості для вимірювання товщини стінок ємностей, труб, корпусних деталей, листів і т.п., в тому числі з кородуючими поверхнями при односторонньому доступі до контрольованого матеріалу.

Ультразвукові структуроскопи — це інноваційні прилади неруйнівного контролю, що дозволяють оцінювати фізико-механічні та структурні властивості матеріалів, не пошкоджуючи їх. Ця технологія кардинально змінює підхід до контролю якості: замість вибіркового випробування на спеціальних зразках, ми можемо проводити стовідсотковий контроль вже готових виробів. Це значно підвищує достовірність оцінки якості продукції та допомагає суттєво скоротити витрати, пов'язані з руйнівними випробуваннями.

Основа роботи ультразвукових структуроскопів лежить у взаємозв'язку між акустичними характеристиками та фізико-механічними, технологічними й структурними властивостями матеріалів. Ультразвукові хвилі, проходячи крізь матеріал, поведуться по-різному залежно від його внутрішньої структури. Таким чином, аналізуючи параметри цих хвиль, ми можемо отримати цінну інформацію про матеріал.

Акустичні методи, які використовуються в ультразвукових структуроскопах, дозволяють оцінювати ті властивості матеріалу, що впливають на поширення, відбиття та заломлення пружних хвиль, наприклад, пружність та міцність матеріалу; його щільність та пластичність; вміст окремих компонентів (наприклад, графітних включень у чавуні); розміри, форма та вміст різних включень (наприклад, пор або інших дефектів) [3].

Прилади вимірюють та аналізують такі акустичні параметри, як:

- швидкість поширення різних типів ультразвукових хвиль (поздовжніх, поперечних);
- хвильовий опір матеріалів;
- коефіцієнти поглинання та розсіювання пружних хвиль;
- власні частоти коливань конструкцій;
- механічний імпеданс та рівень зворотного розсіювання [3].

Було проаналізовано кращі структуроскопи в Україні, опис яких подано нижче.

Структуроскоп ИПСМ-У (рис. А.7) дозволяє здійснює контроль міцності і однорідності бетону (ГОСТ 17624, Рекомендації НИИЖБ МДС 62-2.01), цегли (ГОСТ 17624) та інших матеріалів при наскрізному і поверхневому прозвучанні

у виробках і конструкціях, на будівельних об'єктах, при технологічному контролі, обстеженні будівель, споруд. Дозволяє проводити контроль міцності бетонів невідомого складу. Має функцію визначення глибини тріщин при поверхневому прозвучуванні, виявлення порожнеч, тріщин і дефектів, що виникли в процесі виробництва і експлуатації конструкцій, визначення щільності і модуля пружності вугле-графітів й склопластику, визначення звукового індексу абразивів і будівельної кераміки, оцінки пористості, тріщинуватості і анізотропії матеріалів, оцінки ступеня зрілості бетону при монолітному бетонуванні.

Структуроскопи ІСП-12М (рис. А.8) є пристроєм спеціального призначення і призначений для контролю якості термічної обробки при виробництві металопродукції, для оцінки структурних змін в процесі експлуатації металовиробів, для оцінки накопичення мікродефектів експлуатованих металовиробів, для оцінки залишкового ресурсу металовиробів за встановленими залежностями між вимірюваними характеристиками і структурою металу. Застосовують для технологічного контролю промислових виробів, для вихідного контролю термооброблених деталей машинобудування, для періодичного контролю технічних пристроїв виробничих об'єктів.

1.3 Постановка задачі дослідження

Сучасне машинобудування, авіабудування, вітроенергетика та інші високотехнологічні галузі дедалі ширше використовують нові конструкційні матеріали, такі як композити, багатошарові панелі та тонкі покриття. Ці матеріали забезпечують унікальні експлуатаційні властивості (легкість, міцність), але водночас створюють нові виклики для неруйнівного контролю (НК). Зокрема, критичними дефектами для таких матеріалів є розшарування, непроклеї, дефекти адгезії та приповерхневі пустоти, які можуть значно знизити надійність та безпеку конструкцій.

Традиційні методи ультразвукової дефектоскопії, переважно луно-імпульсний метод, були розроблені та оптимізовані для контролю металевих виробів. Вони базуються на аналізі відбитих імпульсів від об'ємних дефектів або

задньої стінки. Однак, при контролі сучасних матеріалів ці методи стикаються з низкою обмежень, таких як:

- високе затухання ультразвуку. Багато композитів та полімерів сильно поглинають ультразвукові хвилі, що зменшує проникаючу здатність та співвідношення сигнал/шум, ускладнюючи виявлення дефектів на значній глибині;

- розсіювання хвилі. Неоднорідна структура композитів спричиняє значне розсіювання ультразвуку, що також погіршує якість сигналу;

- проблеми з тонкошаровими структурами. Ультразвукові імпульси можуть накладатися, ускладнюючи розрізнення дефектів у тонких шарах або між ними;

- низька чутливість до дефектів адгезії. Традиційні методи часто погано виявляють тонкі розшарування або непростеї між шарами, оскільки такі дефекти можуть не створювати достатньо сильного відбиття для надійної реєстрації.

Таким чином, виникає гостра необхідність у розробці спеціалізованих приладів НК, здатних ефективно виявляти характерні дефекти нових конструкційних матеріалів, долаючи обмеження традиційних методів.

Ультразвуковий імпедансний метод у багатьох випадках є доцільним доповненням до інших методів ультразвукової дефектоскопії. Зокрема, при контролі багатошарових матеріалів та композитів (особливо при наявності розшарувань та непростеїв) імпедансний метод безпосередньо аналізує зміну локального механічного (акустичного) імпедансу поверхні об'єкта. Дефекти, такі як розшарування або непростеї, призводять до значного зменшення жорсткості або підвищення "піддатливості" ділянки матеріалу над ними. Прилад реєструє цю зміну опору коливанням, що дозволяє надійно виявляти навіть дуже тонкі дефекти адгезії, які можуть бути "невидимими" для луно-імпульсного методу.

Також даний метод є високоефективним для виявлення приповерхневих дефектів, розташованих безпосередньо під поверхнею або на невеликій глибині (кілька міліметрів/сантиметрів). Це критично для багатьох застосувань, де саме приповерхневі дефекти є найбільш небезпечними (наприклад, відшарування покриттів, дефекти склеювання).

Оскільки імпедансний метод не вимагає глибокого проникнення ультразвуку та аналізу відбитих сигналів від далеких меж, він менш чутливий до високого затухання в матеріалі. Це дозволяє ефективно контролювати матеріали, які є "акустично непрозорими" для традиційних методів.

У низькочастотних варіантах імпедансного методу можливе використання перетворювачів із сухим контактом, що усуває необхідність у контактній рідині, спрощує процес контролю та робить його більш зручним та швидким.

Таким чином, **метою** бакалаврської роботи є розроблення концепції та функціональної моделі приладу для контролю дефектів акустичним імпедансним методом, здатного ефективно виявляти приховані розшарування та дефекти адгезії у багатошарових та композитних матеріалах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) Провести аналіз фізичних основ акустичного імпедансного методу та його застосування для контролю дефектів у матеріалах.
- 2) Розробити структурну схему приладу для реалізації імпедансного методу, включаючи генератор сигналів, вимірювальний блок, п'єзоелектричний перетворювач та блок обробки даних.
- 3) Проаналізувати ефективність запропонованої методики та приладу за допомогою спрощеної математичної моделі, що демонструє принцип виявлення дефектів акустичним імпедансним методом, показавши зміну імпедансу при наявності дефекту.
- 4) Проаналізувати переваги та обмеження запропонованого підходу у порівнянні з традиційними методами ультразвукової дефектоскопії.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

Звукові хвилі - це коливання елементарних частинок середовища навколо своєї осі [9]. Як і всі коливання, вони характеризуються частотою, амплітудою та фазою. В загальному їх можна описати величиною механічної енергії. Коливання можуть відбуватись в твердих тілах, рідинах та газах. У вакуумі акустичних коливань не існує.

Механічна хвиля являє собою коливання окремих частинок речовини. Коливанням називають рух, який здійснює тіло невеликої маси на пружині якщо її відтягнути вниз і відпустити [1]. Це тіло буде коливатися щодо положення рівноваги вгору і вниз. Цей вид коливань особливо важливий, так як він є синусоїдальним, оскільки залежність шляху від часу задається синусоїдальною кривою. Окремі частинки речовини, з яких за нашими уявленнями складається тверде тіло, прикріплені до своїх місць пружними силами. Дуже спрощено тверде тіло можна зобразити у вигляді моделі, показаної на рис. 2.1, але тільки просторової. До тих пір поки тіло навантажено на розтягнення або стиснення не більше ніж до межі пружності, воно поводить себе аналогічно моделі пружини. Окремі точкові маси можуть здійснювати в ньому пружні коливання.

Якщо на лівій стороні моделі одночасно збуджуються синусоїдальні коливання в однаковому такті, наприклад завдяки їх зв'язку з мембраною, яку ми електрично приводимо в коливальний рух. У такому випадку всі частинки першої площини будуть коливатися з однаковою амплітудою (максимальним відхиленням від положення рівноваги) і частотою (числом коливань в секунду). Пружні сили передають коливання частинок до другої площини. Коли ці частки почнуть коливатися, коливання передаються третій площині і т.д. Якщо б частинки були з'єднані одна з одною жорстко, то всі вони прийшли б в рух одночасно і знаходилися б постійно в однаковому стані руху, тобто залишалися б в однаковій фазі. В пружних матеріалах інша справа. Для передачі руху потрібно деякий час, і площини, до яких рух дійшов пізніше, відстають по фазі від передніх.

У той час як частки будь-якої площини проходять через положення рівноваги при коливаннях справа наліво, частинки, розташовані в площинах правіше, тільки починають свій шлях зліва направо. Вони запізнюються якраз на $1/2$ коливання.

На рис. 2.2 показаний процес коливання елементарних частинок такої моделі, в якій хвиля біжить зліва направо, але ще не досягла правого краю.

За частотою акустичні коливання діляться на три діапазони. Звуковий діапазон частот складає від 16 Гц до 20 000 Гц. Акустичні коливання в цьому діапазоні може чути людина і тому він називається звуковим. Частоти, нижчі від 16 Гц, називаються субзвуковими або інфразвуковими, а вищі 20 000 Гц - ультразвуковими. У звуковому діапазоні акустичних коливань частоти розрізняють, використовуючи поняття висоти звуку або висоти тону. Чим більша частота акустичних коливань, тим буде вищий тон і навпаки, із зменшенням тону звуку частота коливань менша. Для порівняння, клавіша піаніно із “середньою нотою Сі” відповідає частоті 260 Гц.

В ультразвуковому контролі найбільш поширеним є використання ультразвукового діапазону частот у межах 0.5 ... 25 МГц.

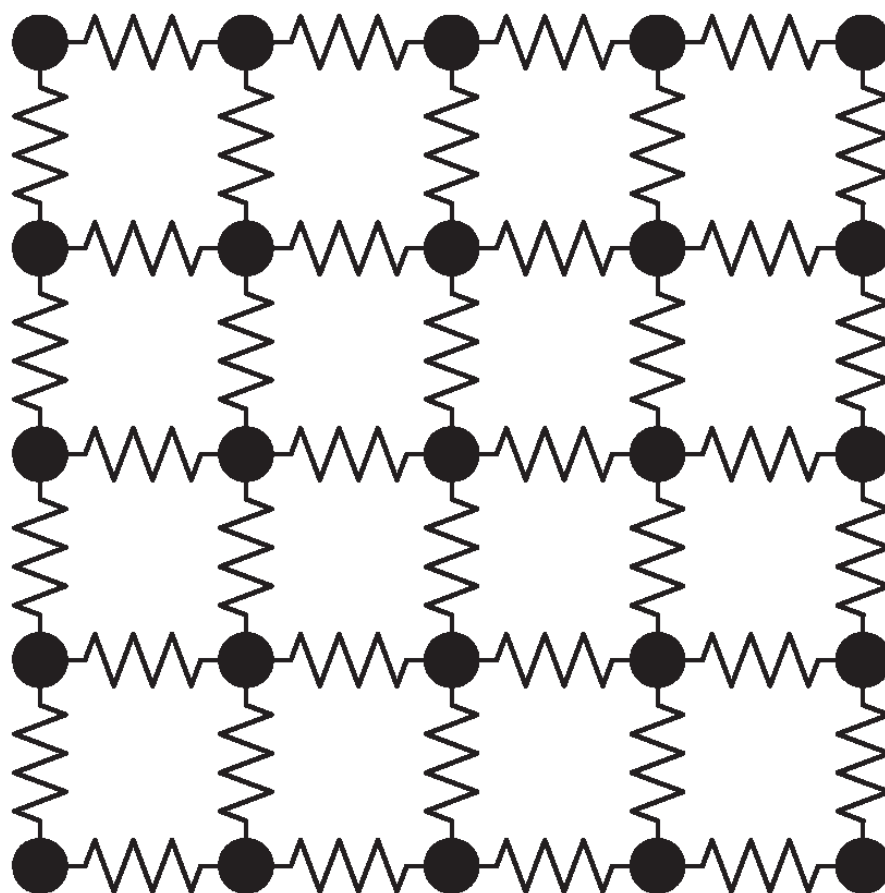


Рисунок 2.1 – Схематична модель пружного тіла

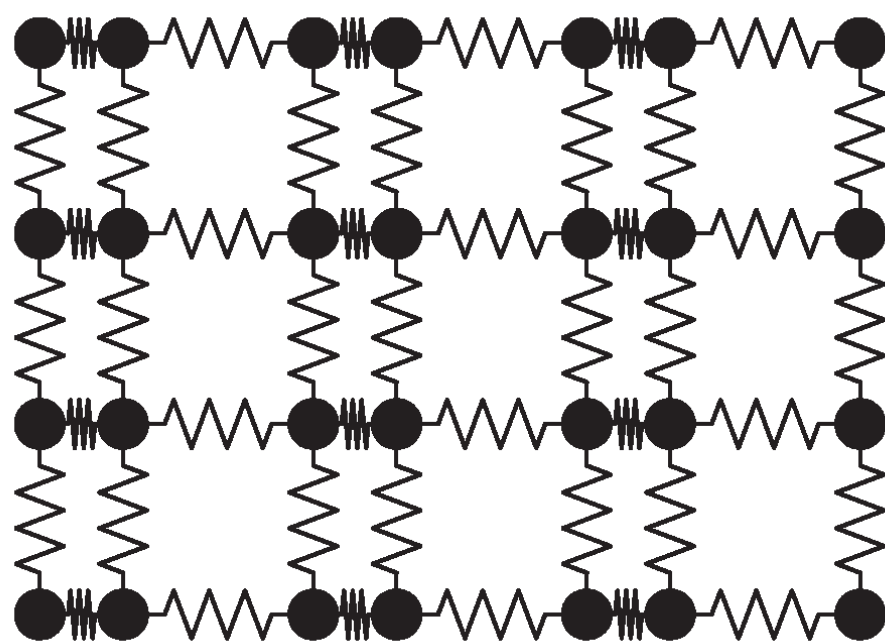


Рисунок 2.2 – Схематична модель коливання елементарних частинок

2.1 Математичний опис пружних хвиль у твердих тілах

Для розуміння фізичних явищ, на основі яких базуються результати ультразвукового контролю твердих пружних тіл, необхідно математично описати їх хвильові властивості.

Розглянемо поширення акустичних хвиль невеликої амплітуди в ізотропному середовищі. Це означає, що залежність між деформаціями та напруженнями, що створює хвиля, є лінійними. Нехай $u\{u_1, u_2, u_3\}$ - вектор деформацій в Декартові системі координат, який створений коливанням акустичної хвилі в пружному середовищі. Додатково введемо позначення:

а) симетричного тензора розтягу e_{ij} [10]:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} \right), \quad (2.1)$$

де x_i – координатні осі; індекси i, j – набувають значень 1, 2, 3;

б) антисиметричного тензора кручення r_{ij} [10]:

$$r_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_i}{dx_j} - \frac{du_j}{dx_i} \right). \quad (2.2)$$

Три незалежні компоненти тензора кручення можна представити як вектор кручення $r\{r_1, r_2, r_3\}$. Слід підкреслити, що вектор кручення не є вектором місцеположення в Декартові системі координат.

Зміна елементарного об'єму пружного середовища описується таким рівнянням [10]:

$$\Delta = e_{ij} = \frac{du_1}{dx_1} + \frac{du_2}{dx_2} + \frac{du_3}{dx_3}. \quad (2.3)$$

Залежність між деформаціями та напруженнями є такою [10]:

$$\sigma_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij},$$

(2.4)

де σ_{ij} – симетричний тензор напружень; λ, μ – коефіцієнти Ляме; $\delta = \{0, i \neq j, 1, i = j\}$ – символ Кронекера.

Для розуміння фізичної суті констант Ляме приведемо співвідношення між ними, модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона ν , які були виведені на основі опису видовження і подальшого звуження циліндра під одновісним навантаженням:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (2.5)$$

Для сталі типові значення цих констант є такими:

$$E \approx 200 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2, \nu \approx 0.26,$$

$$\lambda = 8.6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}, \mu \approx 7.9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2.$$

Загальне рівняння поширення коливання в твердому пружному тілі без зовнішніх зусиль є таким:

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \frac{d\sigma_{ij}}{dx_i}, \quad (2.6)$$

де ρ – густина середовища.

В загальному вважається, що при поширенні хвиль малої амплітуди густина середовища не змінюється.

Співставляючи (2.6) і (2.4), отримуємо:

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \lambda \delta_{ij} \frac{de_{kk}}{dx_j} + 2\mu \frac{de_{ij}}{dx_j} = (\lambda + \mu) \frac{d}{dx_i} \left(\frac{du_i}{dx_i} \right) + \mu \frac{d^2 u_i}{dx_j dx_{ji}}, \quad (2.7)$$

Більш компактно (2.7) можна представити у векторній нотації (у вигляді рівняння Нав'є):

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u, \quad (2.8)$$

де $\nabla = \frac{d}{dx_1} + \frac{d}{dx_2} + \frac{d}{dx_3}$ – оператор, $\nabla^2 u = \nabla(\nabla \cdot u) - \nabla \times (\nabla \times u)$.

Враховуючи тотожність $\nabla \times (\nabla \times u) \equiv 0$, (2.8) можна записати у вигляді рівняння Нав'є у інваріантній формі:

$$\rho \frac{d^2}{dt^2} (\nabla \cdot u) = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 (\nabla \cdot u). \quad (2.9)$$

Для поздовжніх хвиль із (2.9) отримаємо:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \left(\frac{du_1}{dx_1} + \frac{du_2}{dx_2} + \frac{du_3}{dx_3} \right) &= \frac{1}{c_l^2} \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{du_1}{dx_1} + \frac{du_2}{dx_2} + \frac{du_3}{dx_3} \right), \\ c_l^2 &= \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де c_l – швидкість поширення поздовжніх хвиль.

При поздовжніх коливаннях компоненти зміщення будуть такими:

$$u_1 = \frac{du_1}{dx_1}, \quad u_2 = u_3 = r = 0. \quad (2.11)$$

Відповідно, компоненти тензора напружень будуть такими:

$$\sigma_{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{du_1}{dx_1}, \quad \sigma_{22} = \sigma_{33} = \lambda \frac{du_1}{dx_1}. \quad (2.12)$$

Для поперечних хвиль із (2.9), враховуючи тотожність $\nabla \times \nabla (\nabla \cdot u) \equiv 0$, отримаємо:

$$\nabla^2 r = \frac{1}{c_t^2} \frac{d^2 r}{dt^2}, \quad c_t^2 = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.13)$$

де c_t – швидкість поширення поперечних хвиль.

Компоненти зміщення поперечних хвиль будуть такими:

$$u_2 = u_2(x_1, t), \quad u_1 = u_3 = r_1 = r_2 = 0, \quad r_3 = \frac{1}{2} \frac{du_2}{dx_1}. \quad (2.14)$$

Компоненти напружень та зміщень будуть такими:

$$e_{12} = e_{21} = \frac{1}{2} \frac{du_2}{dx_1}, \quad \sigma_{12} = \sigma_{21} = 2\mu e_{12}. \quad (2.15)$$

Решта компонент зміщень та напружень дорівнюють нулю.

Поперечні хвилі поширюються значно повільніше, ніж поздовжні. Так для сталі із густиною 7800 кг/м^3 швидкість поздовжньої хвилі $c_l = 5600 \text{ м/с}^2$, а поперечної – 3180 м/с^2 .

2.2 Типи акустичних хвиль у твердих пружних тілах

Найбільш широкого застосування ультразвукові методи набули при неруйнівному контролі твердих пружних матеріалів, наприклад трубопроводів, кранів, мостів, рельс, несучих частин автомобільного та залізно-дорожнього транспорту, кораблів тощо.

У твердих, рідких і газоподібних середовищах існує пружність об'єму, тобто середовище прагне зберегти свій об'єм. У твердому тілі також існує пружність форми, тобто тверде тіло прагне зберегти не тільки свій об'єм, а й свою форму. Ця властивість твердого тіла пов'язане із зсувною пружністю. Наприклад, два шари рідини можна легко зсунути один щодо одного, а дві площини в твердому тілі пручаються зсуву. Спроба розширити або стиснути об'єм, зсунути сусідні шари ударом або змінною у напрямку силою призведе до виникнення пружних коливань.

Усі середовища, за винятком вакууму, можуть підтримувати поширення коливань. В ультразвуковій дефектоскопії ми найчастіше маємо справу з двома основними типами пружних хвиль, що поширюються у матеріалах: поздовжніми та поперечними хвилями. Крім того, у твердих тілах існують специфічні поверхневі хвилі.

Поздовжні хвилі — це хвилі розтягування-стиснення. У них частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення самої хвилі (як показано на рис. 2.3, а). Подібно до руху пружини: стиснення і розтягнення відбуваються вздовж пружини, і кожен виток коливається вперед-назад. Ці хвилі можуть поширюватися у всіх середовищах: твердих тілах, рідинах та газах.

Поперечні хвилі, або хвилі зсуву, існують лише у твердих тілах. Це пояснюється тим, що для їхнього поширення потрібна здатність середовища чинити опір зсуву. У поперечних хвилях частинки середовища коливаються

поперек (перпендикулярно) напрямку поширення хвилі (як показано на рис. 2.3.б). Наприклад, якщо хвиля рухається горизонтально, частинки коливаються вгору-вниз або з боку в бік. Хоча на малюнку можуть бути показані коливання меж шару, насправді середовище для таких хвиль вважається безмежним.

Швидкість поширення ультразвукових хвиль є фундаментальною властивістю, яка залежить від характеристик матеріалу. Швидкість поперечної хвилі завжди менша, зазвичай приблизно у 1.8–1.9 раза, ніж швидкість поздовжньої. Наприклад, у сталі поздовжні хвилі поширюються зі швидкістю близько 5995 м/с, тоді як поперечні — 3230 м/с.

У рідинах швидкість поздовжніх хвиль значно нижча, ніж у більшості твердих тіл. Наприклад, у воді при кімнатній температурі поздовжня хвиля поширюється зі швидкістю близько 1490 м/с.

Окрім об'ємних хвиль (поздовжніх і поперечних), у твердих тілах існують також специфічні хвилі, які поширюються уздовж поверхні. До них належать:

- поверхневі хвилі (хвилі Релея). Це комбінація поздовжніх і поперечних хвиль. Така комбінація дозволяє задовольнити умову, що напруження на поверхні, уздовж якої поширюється хвиля, дорівнюють нулю. Це ключова відмінність від об'ємних хвиль, які поширюються всередині матеріалу;

- головні хвилі, що також є специфічними поверхневими хвилями.

Важливо зазначити, що у рідинах поверхневих пружних хвиль не існує, оскільки вони не здатні чинити опір зсуву. Хвилі, які ми спостерігаємо на поверхні води (як, наприклад, хвилі на озері), пов'язані переважно з гравітаційними, а не пружними силами.

Хвилі Релея є критично важливими для виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів. Швидкість хвилі Релея становить приблизно 0.93 від швидкості поперечних хвиль. Наприклад, для сталі швидкість хвилі Релея становить близько 3010 м/с.

Частинки матеріалу в зоні поширення релеевської хвилі рухаються по еліптичних траєкторіях (як показано на рис. 2.4, а). Велика вісь цих еліпсів розташована перпендикулярно до поверхні, по якій поширюється хвиля. Ці

еліпси стають більш витягнутими зі збільшенням глибини від поверхні, що вказує на зменшення амплітуди коливань з глибиною.

Релеєвські хвилі здатні поширюватися на значні відстані, приблизно 1–2 метри, при цьому вони ніби "обтікають" плавні опуклості та западини на поверхні контрольованого об'єкта.

Однак, їхня поведінка залежить від кривизни поверхні: на опуклій поверхні швидкість хвилі Релея збільшується, а на ввігнутій поверхні її швидкість зменшується і водночас зростає загасання хвилі.

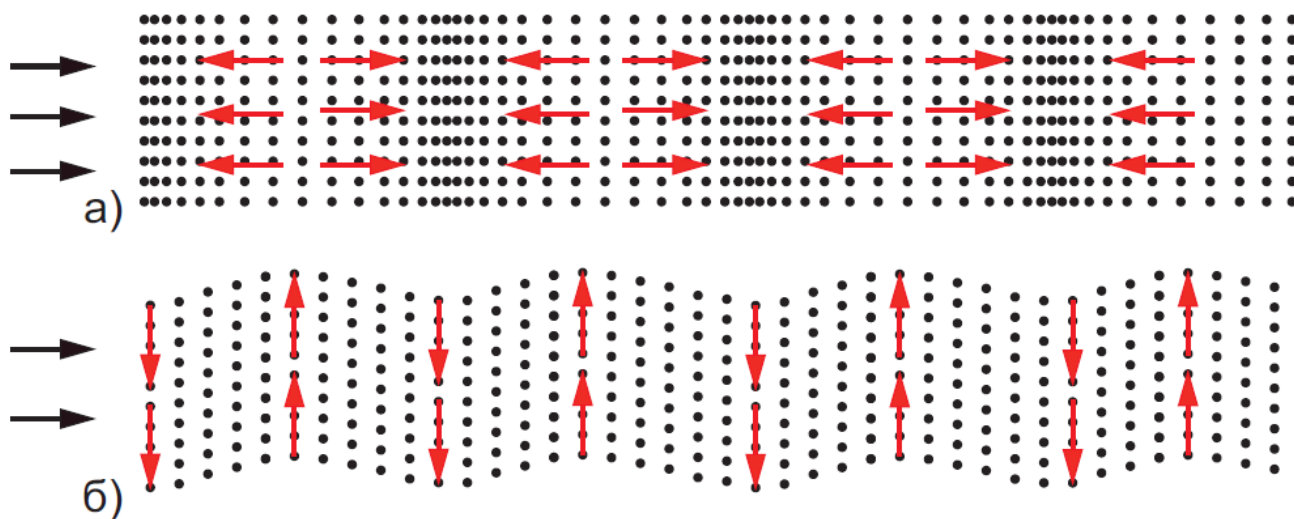
Ця особливість робить хвилі Релея дуже чутливими до змін поверхні та приповерхневих дефектів, таких як тріщини, вибоїни, а також до змін пружних властивостей матеріалу в приповерхневому шарі.

При різкій зміні профілю поверхні релеєвська хвиля частково відбивається, частково проходить через перешкоду, а частково трансформується в об'ємні хвилі.

Релеєвські хвилі розсіюються на нерівностях поверхні і добре виявляють дефекти на самій поверхні. Чутливість швидко падає з глибиною залягання дефектів. Дефекти на глибині, більшій довжини релеєвської хвилі, практично не виявляються. Релеєвські хвилі іноді застосовують для контролю виробів на поверхневі дефекти замість магнітного або капілярного методу контролю.

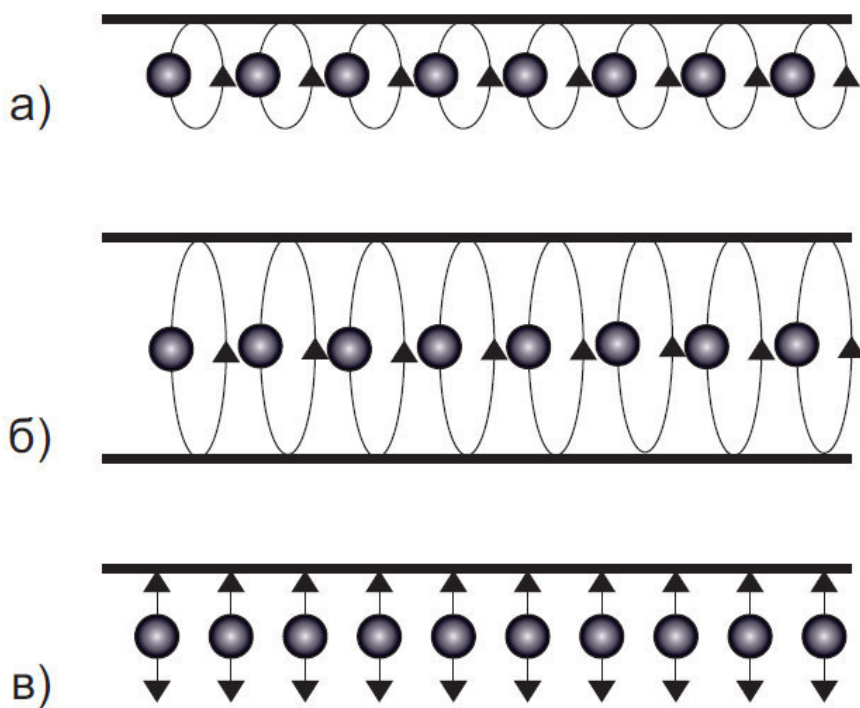
Головні (або повзучі) хвилі – це поздовжні хвилі уздовж поверхні (рис. 2.4.в). Акустики відносять її до одного з типів витікаючих хвиль [10]. Сейсмоакустики і дефектоскопісти за кордоном її називають повзучою хвилею, або бічною хвилею.

Головні хвилі не реагують на нерівності поверхні і майже нечутливі до поверхневих дефектів, але добре виявляють дефекти на глибині 2...8 мм. Нечутливі вони і до натискання на поверхню пальцем. Ці хвилі застосовують для контролю зварних швів на дефекти під валиком підсилення, виявлення дефектів під наплавленням, різбленням. Вони не "обтікають" викривлену поверхню, подібно релеєвській хвилі.



а) повздовжні, б) поперечні.

Рисунок 2.3 – Види акустичних коливань.



а) Релея, б) Лемба, в) повзучі.

Рисунок 2.4 – Види акустичних коливань

У твердих тілах обмежених розмірів, таких як пластини чи стрижні, існують унікальні типи пружних хвиль, які не можуть поширюватися у безмежних середовищах. Ці хвилі називаються нормальними хвилями.

У пластинах ці хвилі відомі як хвилі Лемба (як показано на рис. 2.4, б), а у стрижнях вони називаються хвилями Порх-Гаммера.

Їхньою особливістю є те, що у напрямку, перпендикулярному до поверхні пластини або стрижня, нормальні хвилі ніби утворюють стоячу хвилю. Це означає, що коливання частинок по товщині матеріалу розподіляються складним чином. У пластині або стрижні певної товщини може поширюватися кілька різних типів (мод) нормальних хвиль, кожна з яких має свій унікальний розподіл коливань по поперечному перерізу.

Нормальні хвилі широко застосовуються в ультразвуковому контролі завдяки їхнім специфічним властивостям:

Хвилі Лемба (у пластинах) ідеально підходять для контролю тонких листів, труб та оболонок, хвилі Порх-Гаммера (у стрижнях) використовуються для контролю дротів, стрижнів та труб.

Ключовою характеристикою цих хвиль є дисперсія швидкості: їхня швидкість поширення змінюється залежно від частоти. Крім частоти, на швидкість нормальних хвиль також впливають пружні властивості матеріалу та поперечні розміри (товщина пластини або діаметр стрижня). Це явище дозволяє використовувати їх для оцінки товщини та властивостей матеріалу, а також для виявлення дефектів.

2.3 Чинники що впливають на швидкість акустичних хвиль

Двома головними чинниками, що вносять вплив на швидкість поширення акустичних коливань будь-якого типу, є густина середовища та значення його пружних констант. Для того, щоб збагнути логіку цього фізичного явища, представимо структуру середовища поширення, його молекули, у вигляді кульок, маса яких та геометричні розміри пропорційні густині. Отже, кульки свинцю важитимуть більше, ніж алюмінію, а алюмінію, в свою чергу, будуть

важчими, аніж повітря. Також уявімо, що кульки середовища з'єднані між собою пружинами, коефіцієнт жорсткості яких буде пропорційний значенню пружних констант. Так, пружини будуть сильними для сталі, слабшими для свинцю та дуже слабкими для повітря.

Швидкість, з якою поширюються хвилі в матеріалі залежить від того, наскільки швидко одна кулька зможе вдарити іншу для передачі коливання. Для того, щоб примусити рухатись сусідню кульку, необхідно подолати її інерцію. Тепер візьмемо дві кульки однієї маси, що з'єднані сильною пружиною, та дві кульки, що з'єднані слабшою. Якщо примусити рухатись перші кульки кожної пари з однаковою швидкістю, то кулька у тій парі, що має сильнішу пружину, швидко дістане необхідну кількість енергії, щоб подолати інерцію сусідньої. У тій парі кульок, що має слабшу пружину, першій кульці потрібно більше часу, щоб набрати необхідну величину енергії для подолання інерції свого сусіда і заставити його коливатись.

Отже, в матеріалі, що має більше значення модуля Юнга, швидкість поширення акустичних коливань буде вищою.

Тепер розглянемо інший випадок з двома парами кульок, де одна пара матиме більшу вагу, а друга меншу. Коли надати першим кулькам кожної пари однакову швидкість, то легша кулька швидше подолає інерцію сусідньої. Підсумовуючи ствердимо, що із збільшенням густини матеріалу швидкість поширення акустичних коливань буде зменшуватись. Так у свинцю швидкість поширення акустичних коливань є меншою, ніж у сталі.

Параметр, який вносить другорядний вплив на величину швидкості поширення акустичних коливань, є коефіцієнтом Пуассона. Цей коефіцієнт описує, наскільки матеріал стає тоншим при його розтягуванні.

Опосередковано швидкість поздовжньої хвилі c_l можна визначити так:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.16)$$

У випадку поширення поперечних хвиль жорсткість пружини, що з'єднує кульки, буде пропорційна величині модуля зсуву, величина якого є меншою модуля Юнга. Швидкість поперечної хвилі можна обчислити так:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}}. \quad (2.17)$$

Незважаючи на те, що швидкість поширення акустичних хвиль можна обчислити, це вимагає точного знання всіх змінних, що її визначають. У реальних матеріалах такі параметри як густина, величини модулів Юнга та зсуву змінюють своє значення залежно від способу виготовлення металевих виробів, добавок, відпуску тощо. Тому фахівцю з неруйнівного контролю важко точно визначити теоретично швидкість поздовжніх чи поперечних хвиль в реальних умовах. Замість цього, в неруйнівному контролі використовується процедура калібрації ультразвукових приладів. Ця процедура полягає у визначенні швидкості поширення акустичних хвиль у зразку із наперед відомою товщиною і виготовленого із того ж матеріалу, що і досліджуваний об'єкт.

2.4 Довжина хвилі

Після завершення одного циклу коливання елементарної частинки середовища акустична хвиля пошириться на відстань вперед із швидкістю, що характерна для даного матеріалу. Звідси випливає твердження, що протягом часу одного коливання хвиля пройде певну відстань в залежності від швидкості в цьому матеріалі. Ця відстань для даного матеріалу і певного значення частоти коливання називається довжиною хвилі.

Довжину хвилі λ обчислюють так [6]:

$$\lambda = c/f,$$

(2.18)

де c – швидкість поширення хвилі, f – частота.

Для ультразвукового діапазону довжина хвиль у металах є доволі малою, тому прийнято її представляти в міліметрах. Так, довжина поздовжньої хвилі в сталі частотою 5 МГц із швидкістю поширення 5960 м/с складає 1.192 мм.

Параметр довжини хвилі часто використовується в неруйнівному контролі. По перше, найменша неоднорідність, яку можна виявити, складає половину довжини хвилі на заданій частоті. Якщо відома критична величина тріщини, яка має бути виявлена в конкретному об'єкті через параметр довжини хвилі, можна вибрати ефективну частоту контролю. Довжина хвилі використовується при визначенні форми акустичного променя і величини ближньої зони.

2.5 Акустичний імпеданс

Дві великі відмінності між повітрям та сталлю – густина та сила пружності матеріалу, що визначається модулями Юнга та зсуву. Ці чинники визначають, скільки хвильової енергії відіб'ється від границь розділу двох середовищ, а яка її кількість пройде через розділ. Кожному матеріалу надається характеристика, яка визначає ступінь відбиття на його границі розділу, який називається акустичним.

Акустичним імпедансом \tilde{Z} є відношення комплексної амплітуди усередненого по поверхні тиску акустичної хвилі \tilde{P} до комплексної амплітуди її об'ємної швидкості \tilde{C}_V [6]:

$$\tilde{Z} = \frac{\tilde{P}}{\tilde{C}_V}. \quad (2.19)$$

Одиницями вимірювання у системі СІ є $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^5$, у неруйнівному контролі їх називають акустичними омами. Об'ємну швидкість обчислюють як інтеграл по поверхні від швидкостей елементарних об'ємів, що напрямлені по нормалі до цієї поверхні. За фізичною інтерпретацією акустичний імпеданс визначає ступінь опору середовища до коливань із певним значенням акустичного тиску. Одиницю акустичного імпедансу спершу створили за аналогією до електричного опору. Фаза акустичного імпедансу означає різницю між акустичним тиском і об'ємною швидкістю.

Специфічний акустичний імпеданс \tilde{Z}_s визначають як добуток акустичного імпедансу \tilde{Z} та площі поверхні, на яку падає хвиля S :

$$\tilde{Z}_s = \tilde{Z} \cdot S = \frac{\tilde{P}}{\langle \tilde{C}_{SV} \rangle}, \left[\frac{Hc}{M^3} \right], \quad (2.20)$$

де $\langle \tilde{C}_{SV} \rangle$ – комплексне усереднене значення швидкості акустичної хвилі у напрямку нормалі до поверхні.

Характеристичний акустичний імпеданс Z для плоскої хвилі, що поширюється в пружному середовищі, є таким:

$$Z = \rho \cdot c, \quad (2.21)$$

де c – швидкість акустичної хвилі в матеріалі, ρ – густина.

Одиницями вимірювання акустичного імпедансу є *Rayl*. Так акустичний імпеданс сталі складає 46.7 *MRayl*, води 1.48 *MRayl* та повітря 400 *MRayl*.

Акустичний імпеданс має комплексну форму і складається із реальної та уявної частини.

Як правило, акустичний імпеданс представляють у такому вигляді:

$$\tilde{Z} = R_Z + iX_Z, \quad (2.22)$$

де R_Z – акустичний опір, X_Z – акустичний реактивний опір.

Величини реальної та уявної частин акустичного імпедансу можна інтерпретувати по аналогії із механічною системою (рис. 2.5). В цьому випадку акустичний імпеданс $Z_{\text{мех}}$ буде таким:

$$Z_{\text{мех}} = \frac{f(t)}{V(t)} = C_d + i \left(\omega \cdot M - \frac{K}{\omega} \right), \left[\frac{Hc}{M^3} \right], \quad (2.23)$$

де C_d – коефіцієнт демпферування, K – жорсткість пружини, ω – частота акустичних коливань, M – маса, f – сила, V – швидкість.

Згідно механічної інтерпретації акустичний імпеданс діє як механічний амортизатор, в якому прикладені зусилля пропорційні швидкості, а реактивний імпеданс – масі чи жорсткості пружини, в залежності від його знаку.

Як приклад, приведемо значення акустичного імпедансу у випадку поширення хвилі нормально до круглої форми поверхні із густиною ρ . Припустимо, що швидкість поширення акустичної хвилі c є константою, а радіус поверхні є меншим за довжину хвилі. Акустичний імпеданс буде таким:

$$\begin{aligned} R_Z &= \rho c \frac{1}{2} \cdot \frac{(k\alpha)^2}{\pi\alpha^2}, \text{ при } (k \cdot \alpha)^4 \ll 1, \\ X_Z &= \rho c \frac{3}{8\pi} \cdot \frac{k\alpha}{\pi\alpha^2}, \text{ при } (k \cdot \alpha)^2 \ll 1, \end{aligned} \quad (2.24)$$

де $k = \omega/c$ – хвильове число.

Найбільш широко акустичний імпеданс використовується для оцінювання кількості хвильової енергії коливань, яка відбивається при проходженні хвилі через границю розділу середовища. Кількість хвильової енергії, що відбивається від границь розділу двох середовищ $E_{\text{відб}}$ [10]:

$$E_{\text{відб}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot 100\%, \quad (2.25)$$

де Z_1, Z_2 – відповідно акустичний імпеданс середовища, в якому поширюється хвиля та на яке вона падає.

Коефіцієнт відбиття на границі сталь – вода складає 88.09 %, а на границі сталь – повітря 99.998 %, в таблиці 2.1 наведені акустичні властивості деяких речовин.

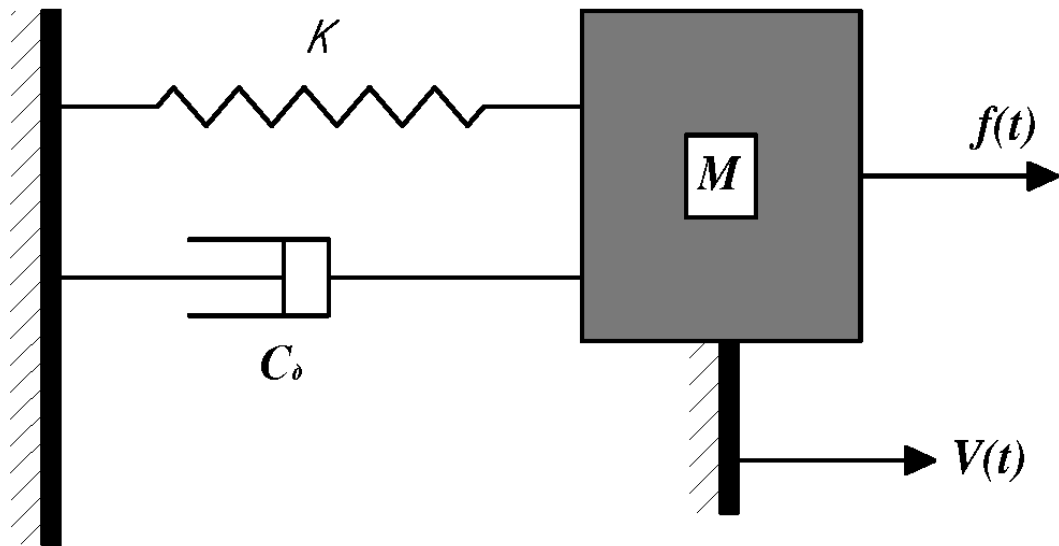


Рисунок 2.5 – Механічна інтерпретація акустичного імпедансу

Коли акустична хвиля поширюється в металі і взаємодіє із неоднорідністю, наприклад, тріщина, делямінація, розшарування, неметалічне включення тощо відбуваються те ж саме, що і на границі розділу середовищ. Частина енергії відбиватиметься від неоднорідності, а частина проходитьиме границю розділу. Цю властивість акустичних хвиль покладено в основу дефектоскопії неруйнівного контролю.

Таблиця 2.1 – Акустичні властивості деяких речовин

Речовина	Швидкість хвилі с, 10 ³ м/с		Густина, ρ 10 ³ кг/м ³	Акустичний опір z, 10 ⁶ Па·с/м	Коефіцієнт затухання на 2,5 МГц δ , Нп/м
	Повздо- жньої	Попереч- ної			
Метали					
Алюміній	6,36	3,13	2,7	17,2	0,1-1
Берилій	12,8	8,6	1,82	23,3	-
Бронза	3,5...3,8	2,3...2,5	8...9	30...34	-
Вольфрам	5,32	2,77	19,3	102,7	-
Дюралюміній	6,2...6,4	3...3,2	2,7...2,8	19...20	0,1...1
Залізо	5,92	3,23	7,8	46,3	0,...5
Латунь	4,3...4,7	3,1...3,5	8,4...8,5	33...40	-
Магній	5,74	3,1	1,74	9,98	0,1...2
Мідь	4,72	2,4	8,9	42	2,5...20
Нікель	5,7	3,0	8,9	50,7	-
Олово	3,32	1,65	7,3	24,2	-
Свинець	2,16	0,87	11,4	24,6	-
Срібло	3,65	1,65	10,5	38,3	-
Сталь вуглецева	5,9...5,94	3,22...3,25	7,7...7,9	45,9...46,3	0,1...10
Сталь аустенітна	5,77...6,14	3,2...3,31	7,6...8	44...48	0,3...40
Титан	6,1	3,13	4,5	27,5	-
Цинк	4,17	2,41	7,1	29,6	-
Чавун	3,5...5,6	2,2...3,2	7,2...7,6	26...42	0,3...50
Неметали					
Бетон	2,1...5,2	-	1,8...2,8	6...9,5	-
Пластик	1,1...2	0,6...1	1,6...2,2	10...20	30...50
Резина	1,4...2,3	-	0,9...1,6	2...3	30...60
Органічне скло	2,7...2,75	1,12...1,13	1,19	3,0...3,3	20...30
Текстоліт	2,4...2,8	1,1...1,4	2,3...2,5	6...6,4	80...120
Фарфор	5,2...6,8	3,1...4	2,3...2,6	15...20	0,1...0,4
Фторопласт	1,35	-	2,2	30	160
Рідини, гази					
Вода	1,49	-	0,998	1,49	0,156
Гліцерин	1,92	-	1,27	2,43	10,6
Етиловий спирт	1,18	-	0,79	0,93	0,34
Повітря	0,33	-	0,0013	0,00043	10...12

2.6 Контактне середовище

Властивість акустичних хвиль відбиватись від границь розділу двох різних матеріалів може стати проблемою при їх введенні та реєстрації в досліджуваний об'єкт. Якщо поставити ультразвуковий первинний перетворювач на поверхню металевого об'єкта, між ним та металом буде малий шар повітря. Оскільки акустичні коливання практично повністю відбиваються від границі розділу тверде пружне тіло - повітря, то ввести їх в метал буде неможливо і вся хвильова енергія залишиться в матеріалі чутливого елемента первинного перетворювача. Для вирішення цієї проблеми необхідно використати якийсь інший матеріал для виключення шару повітря та узгодження імпедансу чутливого елемента та металу. Іншою вимогою до такого матеріалу є забезпечення можливості пересування первинного перетворювача по досліджуваній поверхні, тому він має бути у вигляді рідини, змазки чи пасти. Додатково, контактне середовище не повинне вступати в хімічну реакцію із матеріалом чутливого елемента перетворювача та досліджуваного об'єкта.

Більшість контактних матеріалів лише частково відповідають всім вимогам. Наприклад, при імерсійному контролі в якості контактного середовища використовується вода, проте вона дозволяє передати в метал досліджуваного об'єкта лише 12 % хвильової енергії і так само тільки 12 % енергії луно-сигналів досягне чутливого елемента перетворювача. Більшість контактних середовищ дозволяє передавати хвильову енергію в межах 10...15%. Найкращою речовиною серед них є гліцерин, що забезпечує передавання до 15 % хвильової енергії.

Як контактні речовини використовують: воду, керосин, олію, мастило, клей для шпалер, гліцерин, спеціальні гелі, що виготовляються для контакту.

2.7 Заломлення та розділення хвиль на межі розділу середовищ

При взаємодії акустичної хвилі із границями розділу двох середовищ під кутом, який називається "кут падіння", параметри хвилі змінюються по-різному

в залежності від величини кута. Кут падіння θ визначається від напрямку поширення хвилі до нормалі границі розділу середовищ (рис. 2.6).

Нехай швидкість хвилі в першому середовищі буде c_1 , а в другому середовищі – c_2 . При проходженні хвилі через межу частина хвилі, що пройшла в друге середовище, буде поширюватись із швидкістю c_2 , проте частина хвилі в першому середовищі поширюється з швидкістю c_1 . Оскільки хвильове поле не переривається на границі розділу, змінюється його кут поширення в другому середовищі, який називається кутом заломлення t (рис. 2.6). Зміна кута поширення акустичної хвилі залежить від різниці швидкостей і описується законом Снеліуса:

$$\frac{\sin i}{c_1} = \frac{\sin t}{c_2}. \quad (2.26)$$

Явище заломлення відноситься до тієї кількості хвильової енергії, що пройшла в друге середовище. Кількість енергії акустичної хвилі, що відбивається від границі розділу двох середовищ, залишається такою самою, як і у випадку перпендикулярного її падіння на цю границю (рис. 2.7).

Кут відбиття акустичної хвилі дорівнює куту падіння.

При введенні акустичної хвилі у тверде пружне середовище крім заломлення має місце ще одне явище – розділення заломленої хвилі на поздовжню та поперечну. Так, при падінні на сталь поздовжньої ультразвукової хвилі, після проходження границі розділу падаюча хвиля у сталі розділиться, частина енергії перейде до поздовжньої хвилі, а інша частина енергії утворить поперечну хвилю. Частота коливань заломлених поперечної та поздовжньої хвиль буде дорівнювати частоті падаючої хвилі. Для малих значень кута падіння амплітуда поперечної хвилі буде малою, проте при збільшенні кута збільшуватиметься і її амплітуда (рис. 2.8).

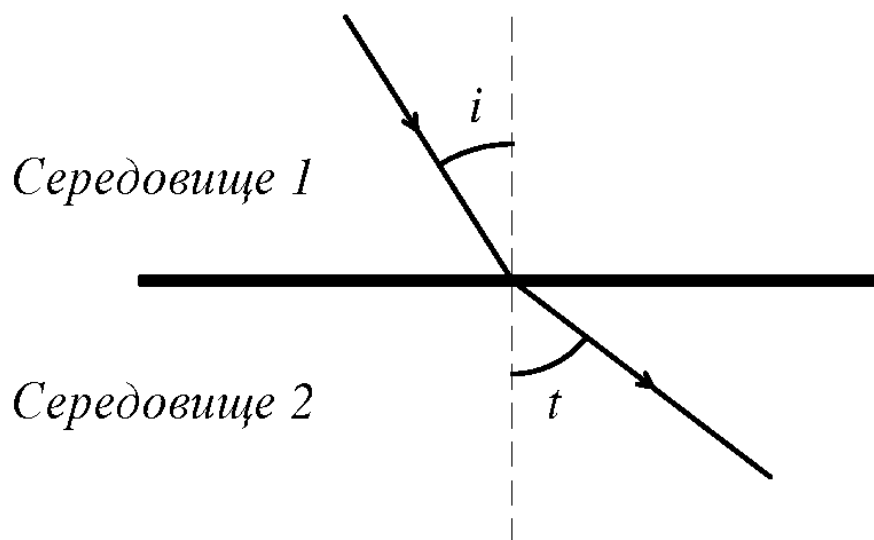


Рисунок 2.6 – Заломлення акустичної хвилі на межі розділу двох середовищ

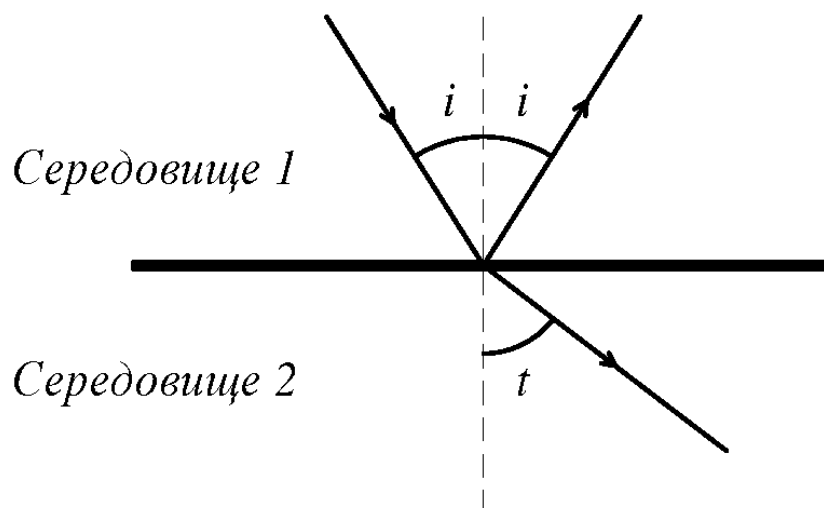


Рисунок 2.7 – Відбиття акустичної хвилі на межі розділу двох середовищ

Згідно закону Снеліуса кути заломлення поперечної t_t та поздовжньої t_l хвиль будуть відрізнятись, оскільки їх швидкість різна. Наприклад, кут заломлення поперечної хвилі в сталі (швидкість 3240 м/с) при падінні поздовжньої хвилі з кутом 10° складає 22.34° .

Таке явище розділення хвиль створює труднощі при неруйнівному контролі. Вперше цю проблему було вирішено Струлом в 1947 р. Він запропонував збільшити кут падіння акустичної поздовжньої хвилі до такої величини, що кут заломленої поздовжньої хвилі складатиме 90° . Будь-яке подальше збільшення кута падіння залишає у другому середовищі тільки поперечну хвилю. В такому випадку говорять про повне внутрішнє відбиття у першому середовищі.

Кут падіння, що дає кут заломленої поздовжньої хвилі величиною 90° , називається першим критичним кутом. Перший критичний кут для границь розділу вода - сталь складає приблизно 15° , а для границь розділу плексиглас - сталь 28° .

При кутах падіння акустичної хвилі більших, ніж перший критичний, у середовищі буде існувати тільки поперечна хвиля, причому регулюванням кута падіння можна досягти будь-якого значення кута її заломлення. При ручному неруйнівному ультразвуковому контролі первинний перетворювач поміщають на кутовий плексиглас для досягнення бажаного кута падіння (рис. 2.9).

При збільшенні кута падіння хвилі, більше від першого критичного, у поперечної хвилі кут заломлення доходить до 90° . Цей кут, при якому поперечна хвиля утворює кут заломлення 90° , називається другим критичним кутом. При другому критичному куті поперечна хвиля перетворюється на хвилю Релея. При збільшенні кута більше величини другого критичного в середовище не вводиться жодної хвилі. В такому випадку говорять про повне внутрішнє відбиття в першому середовищі. Для прикладу величина другого критичного кута для середовищ вода - сталь складає 27° , а для середовищ плексиглас - сталь 58° .

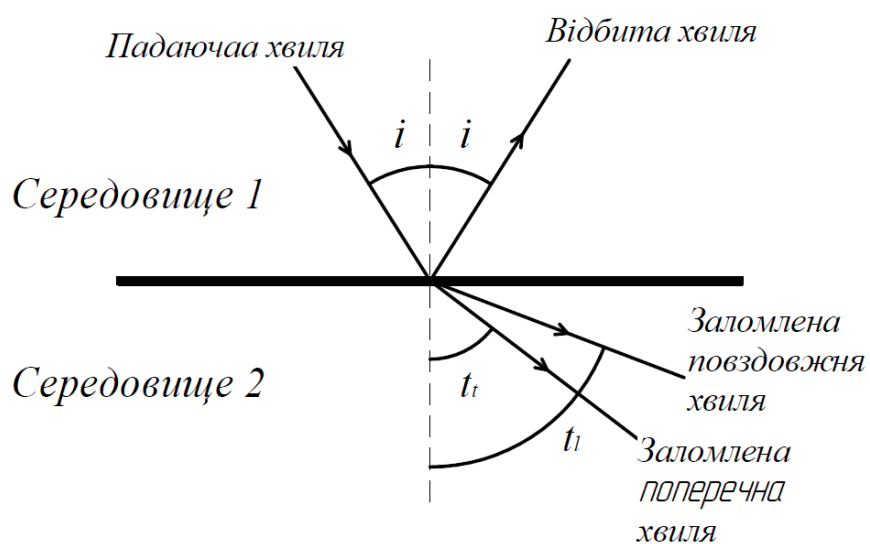


Рисунок 2.8 – Розділення заломленої хвилі

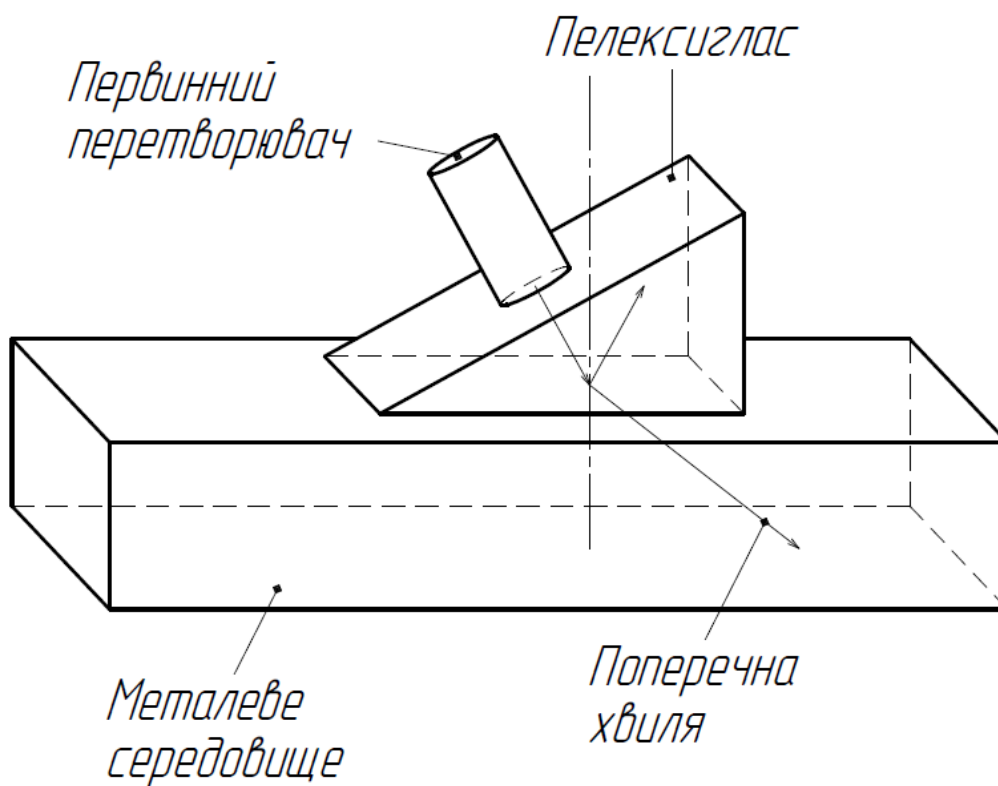


Рисунок 2.9 – Кутове введення хвилі

На рис. 2.10 представлено зміну кута заломлення акустичного коливання в сталі при зміні його кута падіння (границя розділу середовищ плексиглас-сталь).

Явище розділення хвиль має місце також і всередині твердого пружного тіла при падінні акустичної хвилі під кутом на границю розділу (рис. 2.11). Величина кута заломлення відповідає закону Снеліуса.

В ультразвуковому неруйнівному контролі таке розділення хвиль може викликати труднощі із інтерпретацією результатів луно-сигналів. Особливо це має місце при дефектоскопії. Вихід із цього складного становища можна знайти, якщо взяти до уваги амплітуди розділених хвиль (рис. 2.12).

З рисунка можна побачити, що при малих та великих (близьких до 90°) кутах нахилу енергія поперечної хвилі є малою і нею можна знехтувати. При куті падіння біля 70° енергія поздовжньої хвилі є малою і нею нехтують.

Залежність кута заломлення поперечної хвилі на границі розділу сталь-повітря, що утворився внаслідок розділення падаючої поздовжньої хвилі, показана на рис. 2.13.

Коли падаючою хвилею на розділ середовищ із кутом, що відрізняється від 90° , є поперечна, то вона також розділяється на дві хвилі – відбиту поперечно та відбиту поздовжню. В цьому випадку розрізнити хвилі можна за допомогою їх амплітуд. На рис. 2.14 представлено криві амплітуд акустичних хвиль, відбитих від границі розділу сталь - повітря при падаючій поперечній хвилі. Як можна побачити із рис. 2.14, при куті падіння поперечної хвилі до 20° амплітуда відбитої поперечної хвилі є значно більшою, ніж поздовжньої.

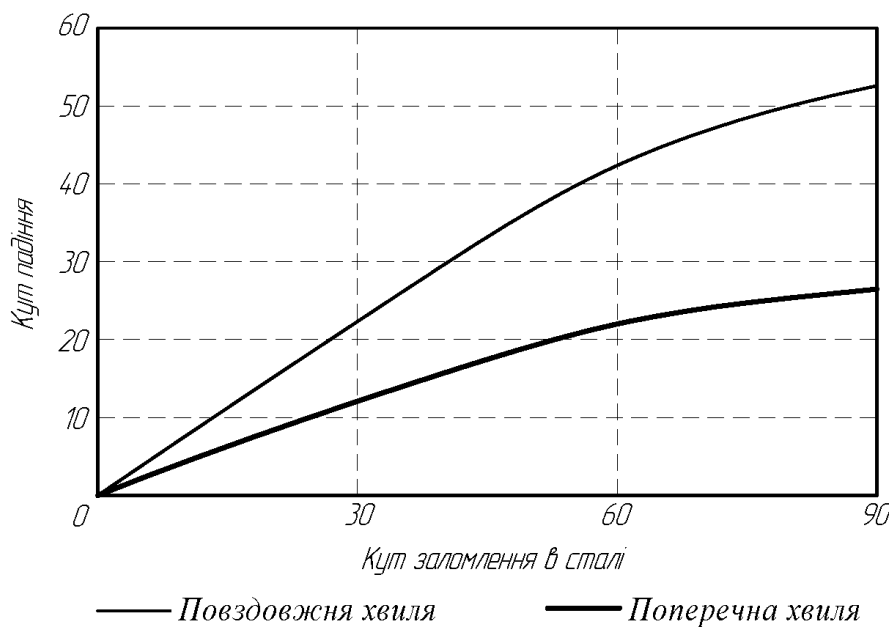


Рисунок 2.10 – Залежність кута заломлення акустичного коливання в сталі

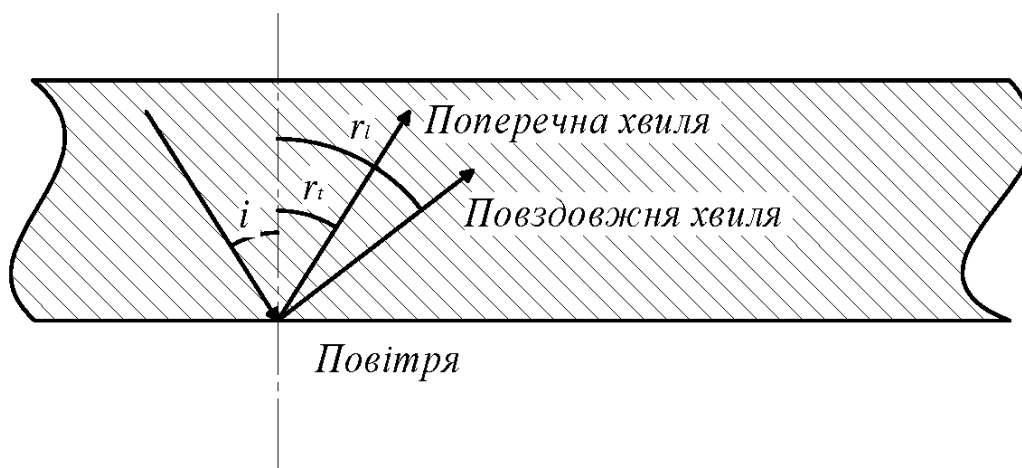


Рисунок 2.11 – Розділення хвиль в середині твердого тіла.

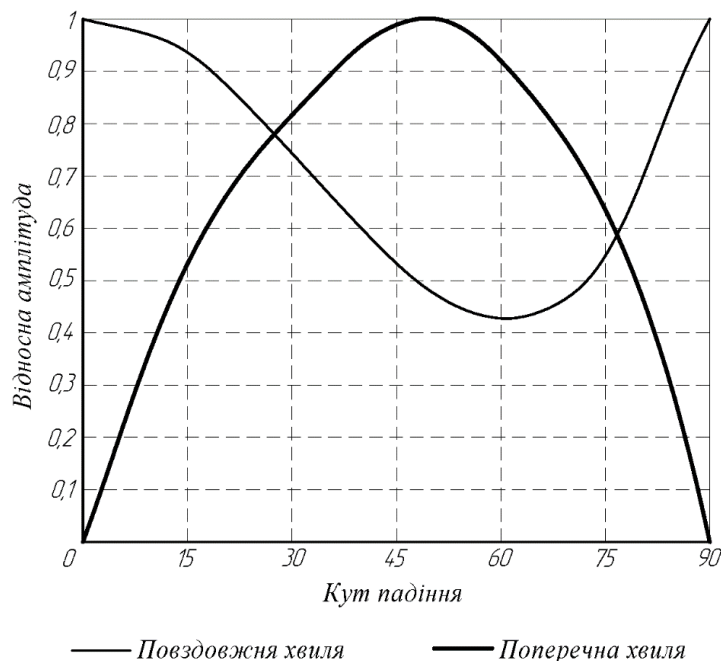


Рисунок 2.12 – Залежність амплітуди розділених акустичних хвиль у випадку падаючої поздовжньої хвилі на границю розділу сталь – повітря від кута падіння

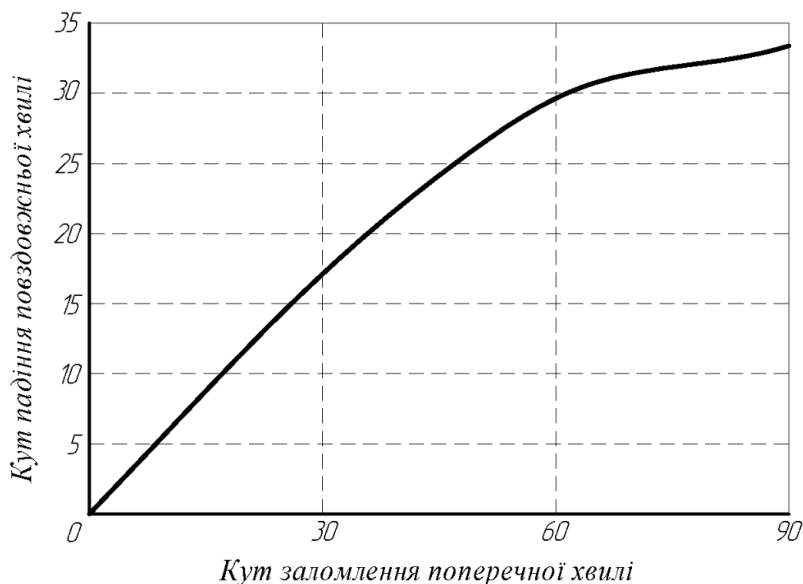


Рисунок 2.13 – Залежність кута заломлення поперечної хвилі на границі розділу сталь – повітря від кута падіння поздовжньої хвилі

Проілюструємо практичне застосування теорії розділення хвиль. Нехай для контролю зварного вертикального з'єднання сталевієї пластини вводиться поперечна ультразвукова хвиля із кутом падіння 60° (рис. 2.15). При взаємодії

поперечної хвилі із неоднорідністю, наприклад, не проваром, кут падіння складатиме 30° . Із рис. 2.16 видно, що падаюча поперечна хвиля розділиться на заломлену поперечну, енергія якої складатиме менше 10 % від падаючої хвилі, а практично вся хвильова енергія перейде у поздовжню хвилю із кутом поширення біля 65° (рис. 2.13).

На нижній границі розділу середовищ заломлена поздовжня хвиля збереже свою енергію (рис. 2.12). Як результат, на первинний перетворювач прийде поздовжня ультразвукова хвиля, що має швидкість поширення більшу, ніж поперечна. Це приведе в свою чергу до невірної інтерпретації місцеположення неоднорідності. Очевидно, що вибір поперечної ультразвукової хвилі із кутом падіння 60° для контролю вертикальних зварних з'єднань був помилкою.

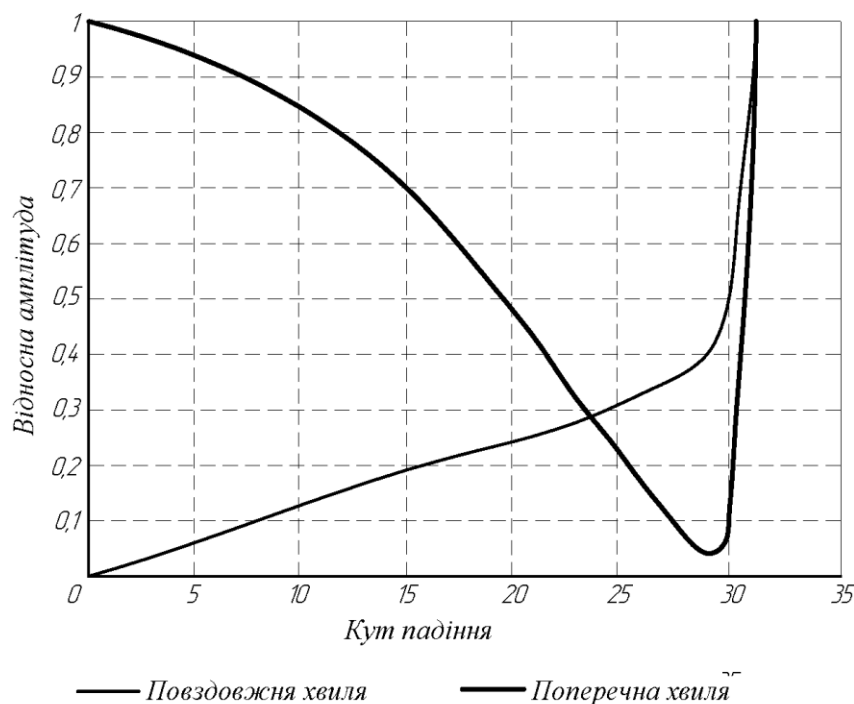


Рисунок 2.14 – Залежність амплітуди розділених акустичних хвиль у випадку падаючої поперечної хвилі на границю розділу сталь-повітря від кута падіння

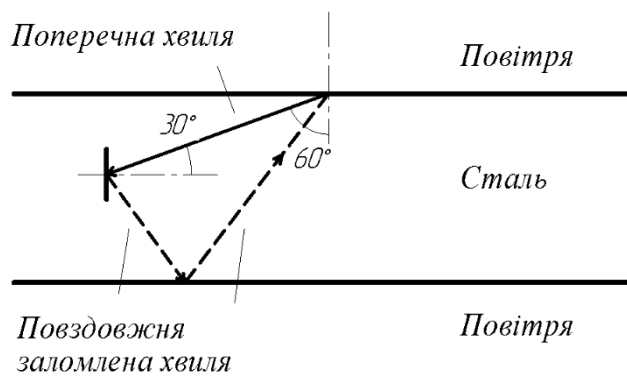


Рисунок 2.15 – Розділення хвилі

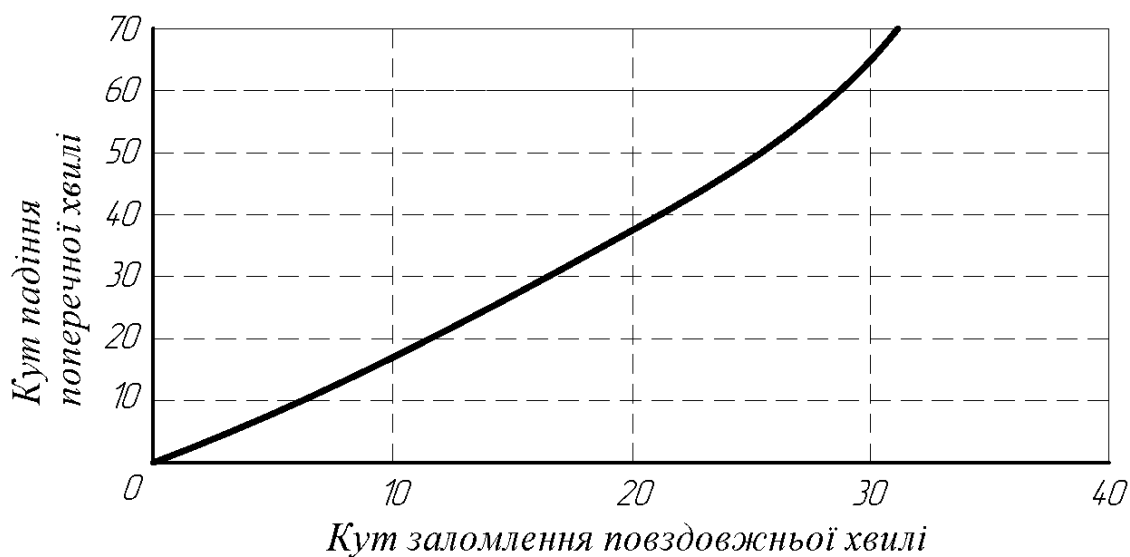


Рисунок 2.16 – Залежність кута заломлення повздожньої хвилі на границі розділу сталь-повітря від кута падіння поперечної хвилі

2.8 Затухання акустичного коливання

Акустичні хвилі поширюються в речовинах внаслідок коливання елементарних частинок середовища, рух цих частинок викликає тертя і абсорбує частину коливної енергії. Величина абсорбування коливної енергії залежить від механічних властивостей матеріалу та частоти акустичної хвилі. В загальному, із збільшенням частоти акустичних коливань збільшується величина поглинання коливної енергії.

Розсіювання акустичної енергії стосується відбиття хвиль від гранул та неоднорідностей в середовищі поширення. Як результат, відбита акустична енергія поширюється у різних напрямках. Матеріал із малими гранулами не створює великого розсіювання, проте великогранульний матеріал створює значне розсіювання хвильової енергії. Розсіяна акустична енергія, що поширюється у напрямку, відмінному від напрямку поширення хвилі, не досягає приймаючого первинного перетворювача і “губиться” в середовищі поширення. Розсіяна хвильова енергія, що досягає первинного акустичного перетворювача, створює завади для загальної хвилі.

У всіх практичних випадках загасання величини енергії підлягає експоненціальному закону. Загасання хвиль при поширенні визначають через коефіцієнт загасання δ , що входить в формулу [11]:

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot r},$$

(2.27)

де A – амплітуда в точці вимірювання, r – відстань яку прийшла хвиля, A_0 – початкова амплітуда хвилі. Рідше використовується механічна добротність Q_M , яка зв'язана з δ такою залежністю [11]:

$$\delta = \pi/\lambda \cdot Q_M.$$

(2.28)

Вимірюють δ в 1/м. Щоб підкреслити, що він входить у вказівник степеню числа Непера $e = 2.7185 \dots$, часто пишуть Нп/м чи Нп/мм. Коли відношення амплітуд вимірюють в децибелах, користуються $\langle \square \rangle$ в дБ/мм [11]:

$$\langle \square \rangle = 20 \cdot \delta \cdot \lg \lg e = 8.686 \cdot \delta, \quad (2.29)$$

Тоді $\langle A/A_0 \rangle = \langle \square \rangle r$.

Для рідин і газів δ пропорційний квадрату частоти:

$$\delta = \delta' \cdot f^2,$$

(2.30)

Значення δ' для деяких речовин вказано в табл. 2.2. Там же приведений температурний коефіцієнт K_δ для розрахунку зміни коефіцієнта затухання з температурою за формулою [11]:

$$\delta = \delta_0 [1 + K_\delta (t - t_0)],$$

(2.31)

де δ_0 – коефіцієнт затухання при температурі t_0 .

Для твердих матеріалів коефіцієнт загасання складається з коефіцієнтів поглинання і розсіяння:

$$\delta = \delta_n + \delta_p.$$

(2.32)

Коефіцієнт δ_n найчастіше пропорційний частоті: співвідношення δ_n/f рівне для поздовжніх хвиль для стали 0,1...1,5 Нп/МГц · м; для алюмінію 0,05...0,06; для магнію 0,1.

Коефіцієнт $\delta_p = 0$ для аморфних речовин (скло, однорідні пластмаси). Для полікристалічних речовин (в тому числі металів) δ_p збільшується з ростом пружної анізотропії, середнього розміру кристалітів \underline{D} і частоти: $\delta \sim f^n$ ($n = 2 \dots 4$). В області $\lambda/\underline{D} = 4 \dots 10$ значення $\delta \sim \underline{D} \cdot f^2$, а при $\lambda > 10 \cdot \underline{D}$ значення $\delta_p \sim \underline{D}^3 \cdot f^4$.

Наприклад, в цій області в маловуглецевої сталі для поздовжніх і поперечних хвиль:

$$\delta_l = 0.12 \cdot f + 20 \cdot \underline{D}^3 \cdot f^4, \quad (2.33)$$

$$\delta_t = 0.1 \cdot f + 105 \cdot \underline{D}^3 \cdot f^4, \quad (2.34)$$

\underline{D} – в мм, f – в МГц, δ – в Нп/м.

Значення коефіцієнтів загасання на частоті 2,5 МГц для деяких рідин і деяких твердих тілах наведено в таблиці 2.1. Використовуючи наведені вище закономірності, за цими значеннями можна наближено розрахувати коефіцієнти затухання для інших частот.

Таблиця 2.2 – Затухання ультразвуку в деяких рідинах і газах

Речовина	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Частота, МГц	δ' , Нп · с ² /м = 10 ⁶ Нп/МГц ² · мм	K_δ , 1/град
Вода	20	0,1...250	25	-0,031
Гліцерин	20...27	0,15...4	2500	-0,069
Масло трансформаторне	20	1...5	1300	-0,035
Ртуть	20..25	0,5...1000	61	-0,015
Повітря	20	1,1...1,4	17500	-

2.9 Зміна амплітуди коливань в матеріалі від зміни частоти

Розглянемо зміну амплітуди акустичних коливань в двошаровому матеріалі який складається з металу і пластику. Метал має такі характеристики: товщина $H_m = 0.06$ м, з середній розмір зерна $\underline{D} = 0.05$ мм, швидкість поширення повздовжніх коливань $c_{l_m} = 6000$ м/с, акустичний імпеданс $Z_m = 46 \cdot 10^6$ Па · с/м. Шар пластику має такі характеристики: товщина

$H_p = 0.02$ м, швидкість поширення повздовжніх коливань $c_{l_p} = 1500$ м/с , акустичний імпеданс $Z_p = 15 \cdot 10^6$ Па · с/м.

Акустична хвиля досягне дна за час τ_m :

$$\tau_m = \frac{H_m}{c_{l_m}} = \frac{0.06}{6000} = 0.00001 \text{ с.} \quad (2.35)$$

Досягнувши дна, на переході метал-пластик, частина енергії, що відіб'ється назад в метал згідно з формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$E_{\text{відб}} = \frac{Z_m - Z_p}{Z_m + Z_p} = \frac{46 - 15}{46 + 15} = 0.51. \quad (2.36)$$

Амплітуда відбитих коливань буде рівна амплітуді вхідного коливання з врахуванням затухання та товщини матеріалу формула (2.27) помножена на коефіцієнт відбиття на переході метал-пластик формула (2.36):

$$A_{\text{відб}} = A_0 \cdot e^{-\delta_m \cdot H_m} \cdot E_{\text{відб}},$$

(2.37)

де δ_m – коефіцієнт затухання для металу який знаходиться підставивши відповідні значення в формулу (2.33).

Амплітуда вхідного сигналу змінюється за законом:

$$A = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0).$$

(2.38)

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Кут зміщення відбитих коливань відносно вхідних буде дорівнювати арккосинусу амплітуди вхідного коливання, в момент часу коли перше коливання досягне дна, до початкового значення A_0 :

$$\varphi_{\text{відб}} = \left(\frac{A(\tau_m)}{A_0} \right). \quad (2.39)$$

Взявши до уваги вищесказане побудуємо залежність кута відбитого сигналу від частоти коливань (рис 2.17).

Як видно з рисунка 2.17 на частоті 400 кГц відбиті і падаючі коливання будуть мати однакову фазу і загальна амплітуда коливань ростиме. Теж саме буде при кожному зростанні частоти на 100 кГц.

Виконавши аналогічні розрахунки для шару пластику отримаємо залежність кута відбитих коливань від частоти (рис 2.18).

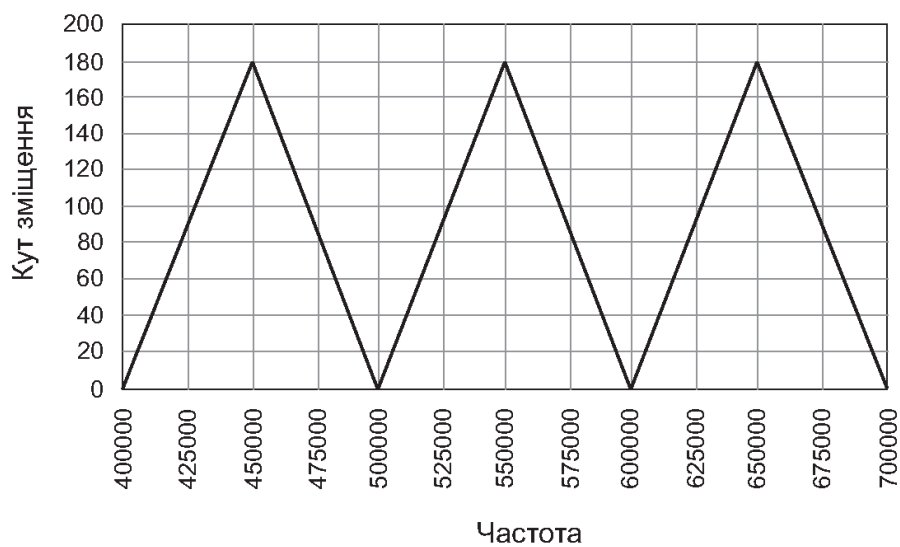


Рисунок 2.17 – Залежність кута відбитого сигналу від частоти в шарі металу

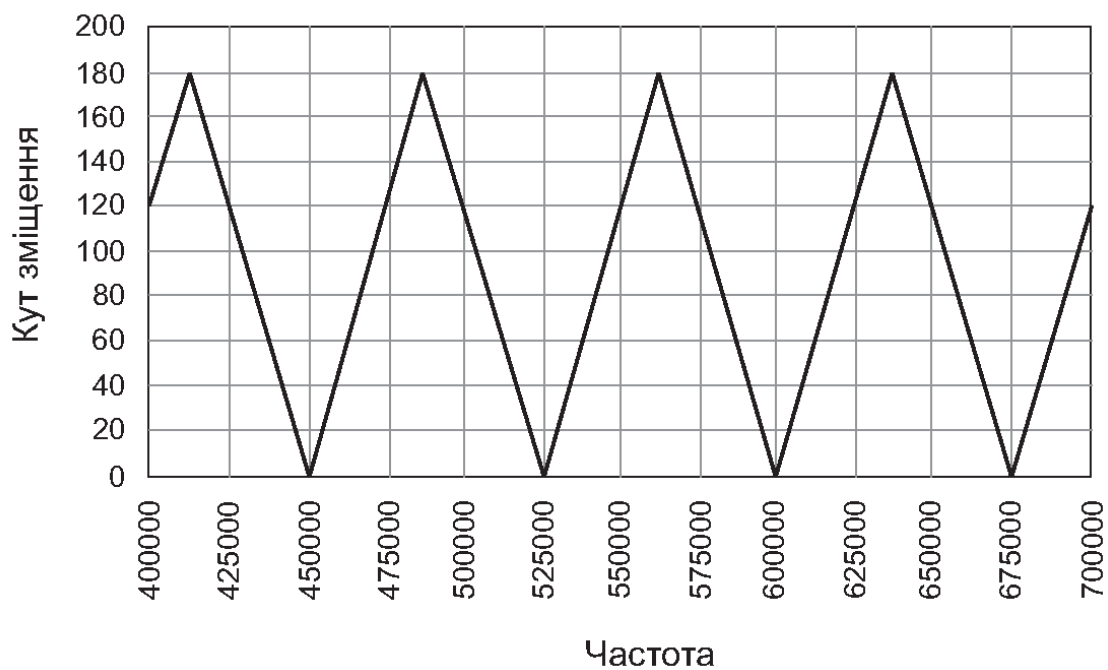


Рисунок 2.18 – Залежність кута відбитого сигналу від частоти в шарі пластмаси

Як видно з цих рисунків максимальна амплітуда коливань буде на частоті 450 кГц і при кожному зростанні частоти на 75 кГц. Взевши до уваги частоти максимуму для металу і для пластику бачимо що вони обоє досягнуть максимуму коливань на частоті 600 кГц, отже ця частота буде резонансною і на виході ми отримаємо значне зростання амплітуди.

Таким чином з отриманих результатів видно що при певних частотах будуть виникати резонансні явища, а оскільки ці частоти залежать від товщин шарів багат шарового матеріалу то таким методом можна контролювати відповідність цих товщин встановленим нормам, а також відповідність загальної товщини багат шарового матеріалу.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

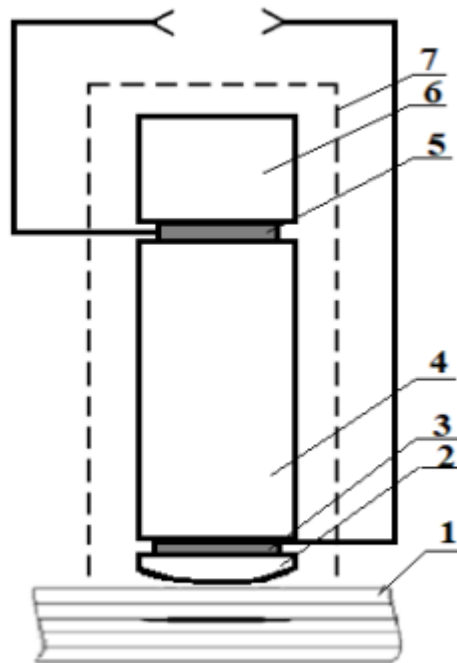
Традиційний ультразвуковий тіньовий метод з двостороннім доступом до об'єкта контролю має ряд істотних недоліків. Нестабільний акустичний контакт поверхневого контрольованого виробу, що залежить від шорсткості поверхні корпусу з композиційних матеріалів, швидкості пересування перетворювача, зусилля притиску, орієнтації датчика, його геометрії та інших факторів, призводить до зниження достовірності контролю та зменшення продуктивності контролю [12].

Одним з найбільш перспективних шляхів вирішення проблем контролю якості є акустичний імпедансний метод. Він належить до класу спеціальних низькочастотних акустичних методів. Його головна перевага полягає в тому, що він заснований на фіксації зміни величини механічного імпедансу на поверхні об'єкта контролю над дефектом. На відміну від інших методів, які шукають відбиття або тіні, імпедансний метод "відчуває" зміну "жорсткості" поверхні. Це дозволяє отримувати інформацію про розмір та приблизне залягання дефекту.

На відміну від ультразвукового контролю, що базується на поширенні об'ємних хвиль, акустичний імпедансний метод заснований на збудженні в контрольованому виробі огинаючих пружних коливань у звуковому та ультразвуковому діапазонах частот. Далі відбувається аналіз зміни механічного імпедансу або повного механічного опору виробу. [12]

3.1 Розроблення функціональної схеми

Імпедансний перетворювач - пристрій, чутливий до зміни механічного імпедансу виробу. Може бути виконаний у вигляді давача дефектоскопа суміщеним або роздільно суміщеним. Конструктивна схема імпедансного суміщеного датчика наведена на рис. 3.1.



1 – об'єкт контролю, 2 – контактний наконечник, 3 – приймальний п'єзоелемент, 4 – хвилевід, 5 – пакет випромінюючих п'єзоелементів, 6 – тильна маса, 7 – корпус перетворювача

Рисунок 3.1 - Конструктивна схема імпедансного перетворювача [12]

Виявлення дефектів та особливості імпедансного методу полягають в наступному. При наявності дефекту ($Z_{\text{деф}}$) у контрольованому об'єкті, що розташований під перетворювачем, його механічний імпеданс буде значно менше, ніж у бездефектній ділянці ($Z_{\text{бездеф}}$), яка, по суті, є напівнескінченим середовищем.

Дефектоскопи, що використовують цей метод, як правило, мають широкосмуговий приймач збуджених коливань або суміщений перетворювач.

Для виявлення дефекту використовується відношення між комплексними значеннями напруги на генеруючому п'єзоелементі та напруги на приймальному п'єзоелементі (або вхідний імпеданс самого перетворювача).

Прилад є дуже чутливим до зміни механічного імпедансу виробу (датчик дефектоскопа реагує на зміну імпедансу). Завдяки цій чутливості можна теоретично знайти гіпотетичний дефект на будь-якій глибині, оскільки зміна імпедансу на поверхні буде пропорційною (але, можливо, дуже малою) величині

дефекту та глибині його залягання. Це особливо стосується дефектів, що розташовані близько до поверхні.

Функціональна схема приладу за допомогою якого можна було б реалізувати розроблений метод зображена на рисунку 3.2.

У імпедансному дефектоскопі, генератор звукових частот (позначений як 1) відповідає за збудження випромінюючого п'єзоелемента (2), який є частиною датчика дефектоскопа. Синусоїдальна напруга, що виробляється генератором, далі проходить через фазообертач (3), а потім надходить на підсилювач-обмежувач (4). З виходу цього підсилювача-обмежувача знімається сигнал прямокутної форми з незмінною амплітудою. Це забезпечує стабільний сигнал для подальшої обробки та контролю. Вимірювальний п'єзоелемент (позначений як 5) датчика підключений до входу селективного підсилювача (6). Особливістю цього підсилювача є те, що його налаштування та налаштування генератора (який збуджує коливання) здійснюються однією ручкою. Це забезпечує постійне співпадіння резонансної частоти підсилювача з частотою генератора, що є важливим для точного вимірювання. [13]

Обробка сигналу відбувається таким чином. З виходу підсилювача (6) сигнал надходить на два окремі канали - амплітудний канал та фазовий.

При амплітудному каналі сигнал проходить через підсилювач (позначений як 7), далі він надходить на лінійний діодний детектор (8), який виділяє амплітуду сигналу. Вимірювання амплітуди продетектованого сигналу здійснюється стрілковим індикатором А, позначеним як 9.

Сигнали з виходів підсилювача-обмежувача (позначеного як 4) та детектора (8) амплітудного каналу через схему співпадіння (13) безпосередньо надходять на схему "АБО" (15). Ця схема відповідає за управління вихідним пристроєм (16).

Вихідний пристрій (16) працює в релейному режимі. Він керує сигнальною лампочкою (17), яка починає світитися, якщо стрілка індикатора А відхиляється нижче певного заданого рівня. Це служить візуальним індикатором виявлення дефекту, оскільки зміна амплітуди (її зменшення) може бути ознакою несправності. [13]

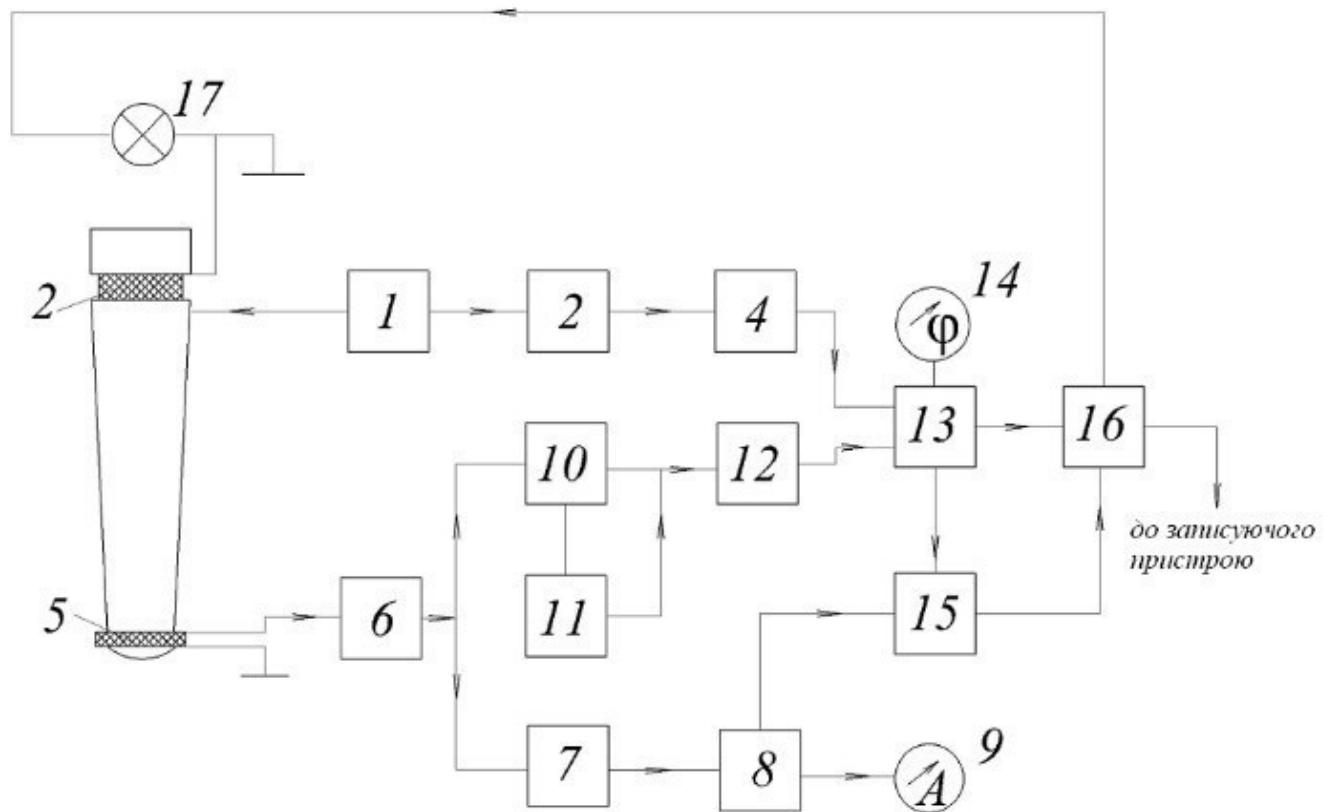


Рисунок 3.2 - Структурна схема акустичного дефектоскопа з імпедансним давачем

3.2 Методика роботи із розробленим приладом для контролю дефектів

1. Підготовка приладу та об'єкта контролю

- увімкнути генератор звукових частот 1 та п'єзоелемент 2 давача.
- переконатися, що випромінюючий п'єзоелемент 2 і вимірювальний п'єзоелемент 5 справні.
- підготувати поверхню об'єкта контролю – вона має бути чистою та, якщо потрібно, мати належний акустичний контакт (хоча для імпедансного методу часто використовується сухий контакт).

2. Налаштування частоти

- за допомогою ручки налаштувати частоту генератора 1 та селективного підсилювача 6. Ця функція гарантує, що резонансна частота підсилювача завжди співпадає з частотою генератора.

- обрати частоту в залежності від типу матеріалу пластини та її товщини.

Після чого генератор 1 збуджує випромінюючий п'єзоелемент 2, який передає коливання в об'єкт контролю. Синусоїдальна напруга від п'єзоелемента (яка відображає реакцію матеріалу) проходить через фазообертач (3) та підсилювач-обмежувач (4), де формується сигнал прямокутної форми з незмінною амплітудою.

З виходу селективного підсилювача (6) сигнал надходить на амплітудний канал. Підсилювач (7) та лінійний діодний детектор (8) обробляють сигнал, виділяючи його амплітуду. Індикатор 9 відображає виміряну амплітуду сигналу.

3. Встановлення порогу відбраковування:

- визначити на бездефектній ділянці об'єкта контролю рівень амплітуди, який буде відображатися індикатором А (9) і відповідає ділянці без дефекту.
- встановити певний пороговий рівень, що визначає мінімально допустиму амплітуду сигналу.

4. Сканування та індикація дефектів:

- перемішувати датчик дефектоскопа по поверхні об'єкта контролю згідно певної схеми. При цьому сигнали з підсилювача-обмежувача (4) та детектора (8) амплітудного каналу надходять на схему співпадіння (13), а потім на схему "АБО" (15). Ці схеми керують вихідним пристроєм (16), який працює в релейному режимі та контролює сигнальну лампочку (17).

- якщо стрілка індикатора А (9) відхиляється нижче заданого порогового рівня, це означає, що амплітуда коливань на цій ділянці зменшилася (внаслідок наявності дефекту, що робить поверхню "гнучкішою" та змінює імпеданс). У відповідь на це, сигнальна лампочка (17) починає світитися, вказуючи на виявлення дефекту.

Таким чином, даний прилад дозволяє оператору швидко ідентифікувати дефектні зони за зміною амплітуди коливань, що візуалізується на стрілочному індикаторі та сигналізується лампочкою.

3.3 Моделювання розробленого методу програмним засобом MatLAB

Розроблено MATLAB-скрипт, що моделює спрощений процес акустичного імпедансного методу для виявлення дефектів, таких як розшарування під шаром матеріалу (у даному випадку пластина).

Для спрощеного моделювання поширення ультразвукової хвилі було взято пластину товщиною L , що розміщена між двома середовищами - джерелом (з якого генерується хвиля) та нижнім середовищем (підкладкою, це може бути, наприклад, стіл чи конвеєр).

У середині матеріалу контрольованої пластини поширюються дві хвилі:

- пряма хвиля поширюється від джерела до середовища підкладки;
- відбита хвиля поширюється від підкладки назад до джерела.

Тиск ($P(x)$) та коливальна швидкість частинок ($V(x)$) у будь-якій точці x всередині шару можуть бути виражені як суперпозиція цих двох хвиль:

$$p(x) = A e^{-ikx} + B e^{ikx}, \quad (3.1)$$

$$v(x) = \frac{1}{\rho_{\text{пласт}}} (A e^{-ikx} - B e^{ikx}), \quad (3.2)$$

де A та B – амплітуди прямої та відбитої хвиль відповідно.

У точці $x=L$, фактично на межі між пластиною та підкладкою, граничні умови - тиск та коливальна швидкість частинок - мають бути неперервними. Також, вхідний імпеданс середовища підкладки ($Z_{\text{підкл}}$) визначається як відношення тиску до коливальної швидкості на цій межі:

$$\rho_{\text{підкл}} = \frac{p(L)}{v(L)} = \frac{A e^{-ikL} + B e^{ikL}}{\frac{1}{\rho_{\text{пласт}}} (A e^{-ikL} - B e^{ikL})}. \quad (3.3)$$

З цього рівняння можна виразити відношення амплітуд B/A :

$$\frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} (A e^{-ikL} - B e^{ikL}) = A e^{-ikL} + B e^{ikL}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} (A e^{-ikL} - \frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} A e^{ikL}) = A e^{-ikL} + \frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} A e^{ikL}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} A e^{ikL} \left(\frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} + 1 \right) = A e^{-ikL} \left(\frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} - 1 \right), \quad (3.6)$$

$$\frac{\rho_{\text{підкл}}}{\rho_{\text{пласт}}} = \frac{\rho_{\text{підкл}} - \rho_{\text{пласт}}}{\rho_{\text{підкл}} + \rho_{\text{пласт}}} e^{-2ikL}. \quad (3.7)$$

Вхідний імпеданс Z_{in} на передній поверхні шару (при $x=0$) визначається так:

$$\rho_{плст} \frac{v(0)}{p(0)} = \frac{\rho_{плст}^{-\theta} + \rho_{плст}^{\theta}}{1 - (\rho_{плст}^{-\theta} - \rho_{плст}^{\theta})} = \frac{\rho_{плст} + \rho_{плст}}{1 - (\rho_{плст} - \rho_{плст})} = \rho_{плст} \frac{1 + \rho_{плст}}{1 - \rho_{плст}}. \quad (3.8)$$

Далі підставимо вираз для V/A , отриманий у (3.7), у рівняння для Z_{in} і домножимо чисельник і знаменник на $(Z_{підкл} + Z_{плст})$:

$$\rho_{плст} \frac{v(0)}{p(0)} = \rho_{плст} \frac{(\rho_{підкл} + \rho_{плст}) + (\rho_{підкл} - \rho_{плст}) \rho_{плст}^{-2\theta}}{(\rho_{підкл} + \rho_{плст}) - (\rho_{підкл} - \rho_{плст}) \rho_{плст}^{-2\theta}}. \quad (3.9)$$

Використовуючи формули Ейлера $\rho_{плст}^{\theta} = \cos(\theta) + i \cdot \sin(\theta)$, $\rho_{плст}^{-\theta} = \cos(\theta) - i \cdot \sin(\theta)$ та тригонометричні перетворення, отримаємо:

$$\rho_{плст}^{-2\theta} = \cos(2\theta) - i \sin(2\theta), \quad (3.10)$$

$$\cos(2\theta) = 2 \cos^2(\theta) - 1 = 1 - 2 \sin^2(\theta), \quad (3.11)$$

$$\sin(2\theta) = 2 \sin(\theta) \cos(\theta). \quad (3.12)$$

Після підстановки та алгебраїчних перетворень отримаємо кінцевий вигляд:

$$\rho_{плст} \frac{v(0)}{p(0)} = \rho_{плст} \frac{\rho_{підкл} \cos^2(\theta) + \rho_{плст} \cos^2(\theta)}{\rho_{плст} \cos^2(\theta) + \rho_{підкл} \cos^2(\theta)}. \quad (3.13)$$

Ця формула є ключовою для аналізу акустичної поведінки тонких шарів та використовується для моделювання імпедансного методу, оскільки вона дозволяє розрахувати, як "відчувається" шар ззовні, враховуючи його власні властивості та властивості матеріалу, на якому він лежить. Зміна $Z_{підкл}$ (наприклад, з твердої підкладки на повітряний прошарок дефекту) безпосередньо впливає на Z_{in} .

У формулі (3.13) $\rho_{плст}$ – вхідний акустичний імпеданс на поверхні шару, куди надходить хвиля; $Z_{плст}$ – власний (характеристичний) акустичний імпеданс матеріалу самої пластини ($\rho_{плст} \cdot c_{плст}$); $Z_{підкл}$ – акустичний імпеданс середовища, що знаходиться під пластиною (підкладки або дефекту, наприклад, повітря); k – хвильове число у матеріалі шару ($k = \frac{\omega}{c_{плст}} = \frac{2\pi f}{c_{плст}}$), де ω – кутова частота, f – частота, $c_{плст}$ – швидкість звуку у пластині; L – товщина контрольованої пластини; i – уявна одиниця ($\sqrt{-1}$).

На початку моделювання було визначено вхідні дані (параметри матеріалів та геометрії) (дод. Б). Задавалися властивості контрольованої пластини (ρ_{layer} , c_{layer} , Z_{layer}): густина, швидкість звуку та, відповідно, акустичний імпеданс основного матеріалу, який ми прозвучуємо (наприклад, пластик). У прикладі задано $\rho_{\text{layer}} = 1200 \text{ кг/м}^3$ і $c_{\text{layer}} = 2000 \text{ м/с}$.

Властивості підкладки без дефекту ($\rho_{\text{substrate}}$, $c_{\text{substrate}}$, $Z_{\text{substrate}}$): параметри матеріалу, на якому лежить контрольований шар, коли дефекту немає. У прикладі: $\rho_{\text{substrate}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ і $c_{\text{substrate}} = 2500 \text{ м/с}$.

Для моделювання властивостей "дефектного" матеріалу (ρ_{defect} , c_{defect} , Z_{defect}) (параметри середовища, яке імітує дефект, що знаходиться під контрольованим шаром), наприклад для розшарування, використовувались властивості повітря, оскільки воно має дуже низький акустичний імпеданс і сильно відрізняється від твердого матеріалу. У прикладі: $\rho_{\text{defect}} = 1.225 \text{ кг/м}^3$ і $c_{\text{defect}} = 343 \text{ м/с}$.

Товщина контрольованого шару ($L_{\text{control_layer}}$): Це фіксована товщина пластини, в якій ми шукаємо дефект. У даному прикладі: 0,003 м (3 мм).

Діапазон частот (f_{req}): Задається діапазон частот, на яких буде проводитись моделювання. Це імітує "розгортку" частоти випромінювання. У прикладі: від 100 кГц до 1.5 МГц.

Програма використовує аналітичну формулу для розрахунку вхідного акустичного імпедансу шару. Ця формула враховує акустичний імпеданс самого шару (Z_{layer}), його товщину ($L_{\text{control_layer}}$) і хвильове число (k_{layer}), а також акустичний імпеданс середовища, на якому лежить цей шар (або підкладка, або дефект).

Було здійснено два випадки розрахунку.

1. Без дефекту ($Z_{\text{input_no_defect}}$): Розраховується вхідний імпеданс шару, коли він лежить на бездефектній підкладці ($Z_{\text{substrate}}$).
2. З дефектом ($Z_{\text{input_with_defect}}$): Розраховується вхідний імпеданс шару, коли він лежить на "дефектному" середовищі (Z_{defect} – повітрі).

Для кожного випадку обчислюються модуль та фаза комплексного вхідного імпедансу. Результати подано на двох графіках і на різних діапазонах частот.

Графік на рис. 3.3, *a* показує модуль вхідного акустичного імпедансу ($|Z|$) як функцію частоти для обох випадків (з дефектом і без).

На рис.3.3, *б* графік показує фазу вхідного акустичного імпедансу (аргумент(Z)) як функцію частоти для обох випадків.

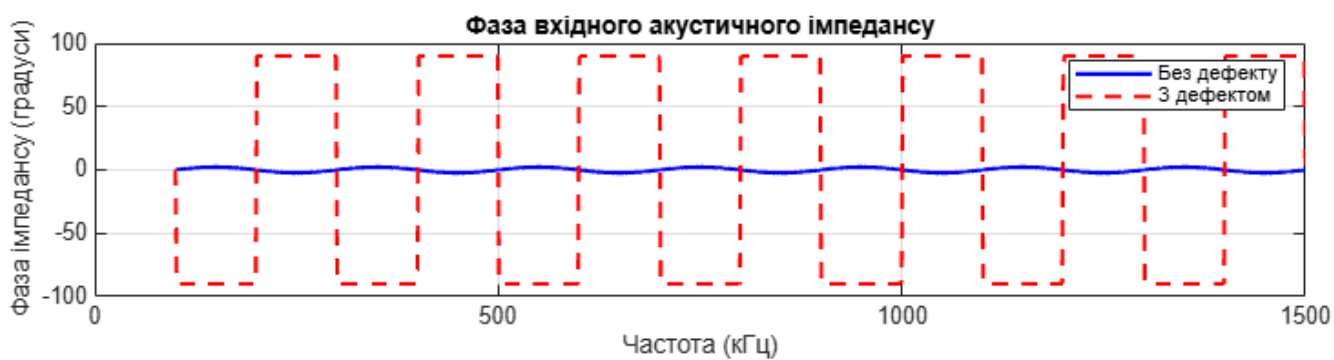
На рис. 3.4 подано модуль та фазу вхідного акустичного імпедансу, але в іншому діапазоні частот.

Виявлення дефекту: На графіках видно, що наявність дефекту (наприклад, повітряного прошарку) суттєво змінює як модуль, так і фазу вхідного акустичного імпедансу шару порівняно з бездефектним випадком. Ці відмінності є "сигнатурою" дефекту, що дозволяє його виявити.

Таким чином програма демонструє, що акустичний імпедансний метод заснований на тому, що дефект, який знаходиться близько до поверхні, змінює локальну "жорсткість" ділянки матеріалу. Ця зміна проявляється у вимірюваних амплітудно-фазових характеристиках (модулі та фазі) вхідного акустичного імпедансу, що дозволяє ідентифікувати дефекти.



a



б

Рисунок 3.3 - Модуль (*a*) та фаза (*б*) вхідного акустичного імпедансу ($|Z|$) як функція від частоти для випадків з дефектом і без в діапазоні високих частот 100-1500кГц

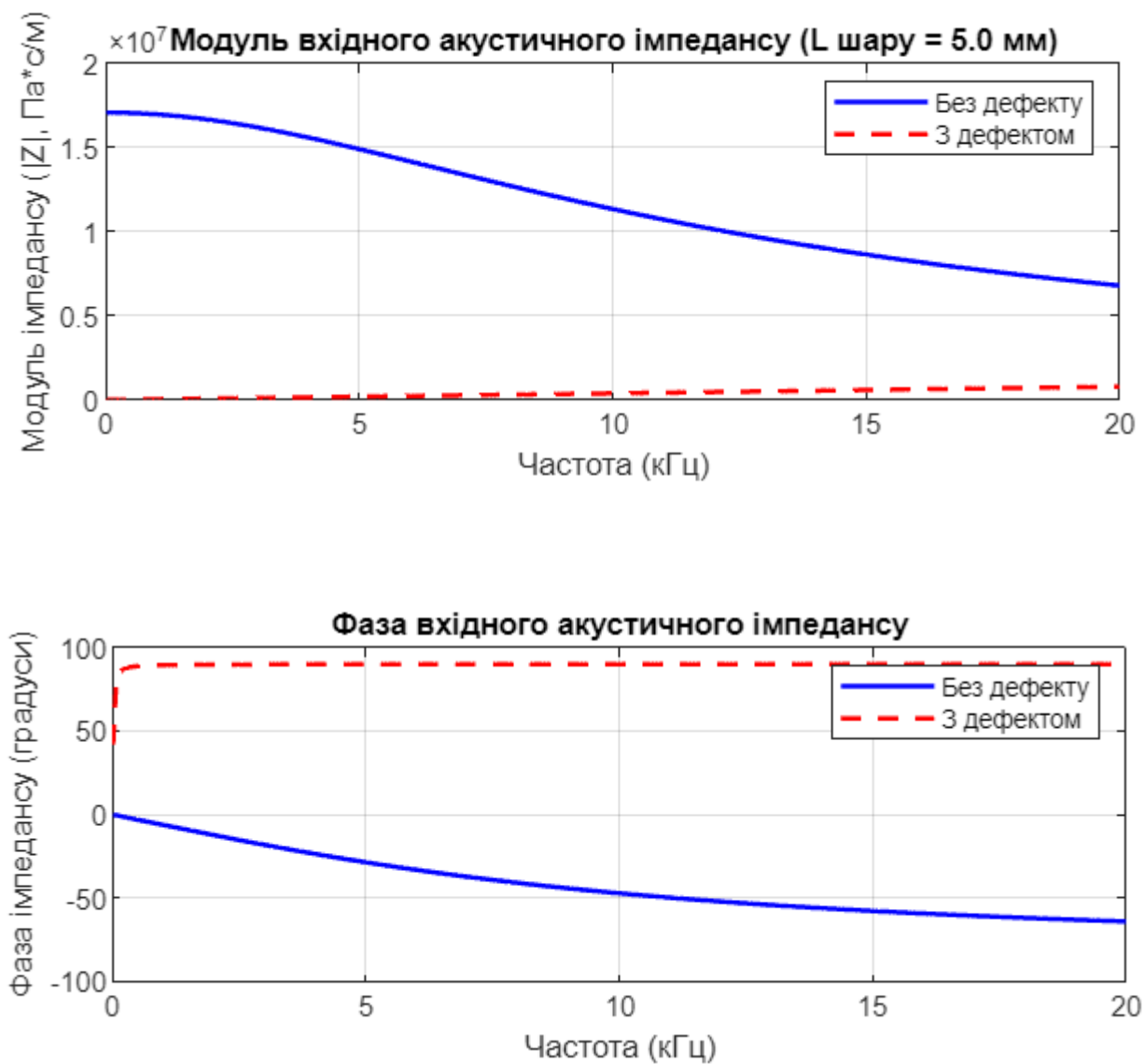


Рисунок 3.4 - Модуль (а) та фаза (б) вхідного акустичного імпедансу ($|Z|$) як функція від частоти для випадків з дефектом і без в діапазоні низьких частот 0-20 кГц

4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

Якість засобів вимірювання і результатів вимірювання прийнято характеризувати її невизначеностями. Так як характер проявлення і причини виникнення невизначеностей як засобів, так і результатів вимірювань досить різноманітний, то на практиці встановлений поділ невизначеностей на різновидності, за кожною з яких є визначена певна назва.

4.1 Аналіз існуючих невизначеностей

Невизначеність вимірювання – параметр, що характеризує розсіяння значень, які обґрунтовано могли бути приписані вимірюваній величині. [15]

Невизначеність вимірювання виражає сумнів у достовірності отриманого результату. Вона виникає тому, що результат вимірювання завжди є лише наближенням до істинного значення фізичної величини. Це означає, що точне значення величини ніколи не є абсолютно визначеним; замість єдиного значення існує нескінченна кількість ймовірних значень, розсіяних навколо отриманого результату.

Невизначеність вимірювання складається з декількох компонентів. Деякі з них оцінюються статистично, на основі розподілу результатів повторних вимірювань (експериментальні стандартні відхилення). Інші компоненти оцінюються з передбачуваних розподілів ймовірностей, що базуються на досвіді або іншій доступній інформації.

На практиці, для визначення невизначеності необхідно:

1. Оцінити значення вхідних величин, враховуючи поправки на відомі систематичні ефекти.
2. Визначити їхні стандартні невизначеності, оцінені як зі статистичних даних, так і з апіорних розподілів.
3. Розрахувати кінцевий результат вимірювання та його комбіновану невизначеність.

Важливо, щоб вимірювана величина була визначена достатньо повно для всіх практичних цілей, аби її значення було єдиним. Припускається, що за умови правильного виконання всіх операцій та врахування значущих систематичних ефектів, отриманий результат вимірювання є надійною оцінкою вимірюваної величини.

На практиці існує багато можливих джерел невизначеностей (непевностей) при вимірюваннях, зокрема такі [15]:

- а) неповне визначення вимірюваної величини;
- б) неточна реалізація визначення вимірюваної величини;
- в) неточне відтворення умов випробування;
- г) неточні відомості про вплив навколишнього середовища на вимірювання або недосконале вимірювання умов навколишнього середовища;
- г) похибки характеристик засобу вимірювальної техніки;
- д) суб'єктивна систематична похибка оператора при знятті показань з аналогових приладів;
- е) кінцева роздільна здатність приладу або поріг чутливості;
- ж) неточні значення, приписані еталонам, що використовуються при вимірюванні, стандартним зразкам речовин і матеріалів;
- з) невідповідність фізичного об'єкта його математичній моделі (порогова невідповідність);
- и) неточні значення констант і інших параметрів, які були отримані із зовнішніх джерел та використовуються в алгоритмі опрацювання даних;
- і) не виключені систематичні похибки;
- ї) похибки введених поправок.
- й) взаємодія засобу вимірювальної техніки із об'єктом випробування (вимірювання);

к) апроксимації та припущення, що використовуються у методі вимірювання і вимірювальній процедурі;

л) зміни в повторних спостереженнях вимірюваної величини при явно однакових умовах.

Теорія невизначеності вимагає усунення систематичних похибок до вимірювання. Якщо це неможливо фізично, їх коригують математично за допомогою поправок, обов'язково враховуючи невизначеність самих поправок.

Невизначеність складається з компонентів, що оцінюються статистично (за повторними вимірюваннями) та з передбачуваних розподілів ймовірностей (на основі досвіду чи іншої інформації).

На практиці, для визначення невизначеності необхідно оцінити вхідні величини, врахувати поправки на відомі систематичні ефекти та їхні стандартні невизначеності (статистичні та апріорні), а потім розрахувати кінцевий результат та його комбіновану невизначеність.

Оцінка невизначеності, що характеризує точність методу випробування, називається апріорною. Її визначають під час розробки методики, щоб регламентувати допустиме значення невизначеності в усіх умовах випробування. Автоматизація цього процесу є актуальною задачею [15].

Важливо, щоб вимірювана величина була визначена повно, щоб її значення було єдиним для всіх практичних цілей. Припускається, що за умови правильного виконання всіх операцій та врахування значущих систематичних ефектів, результат вимірювання є надійною оцінкою вимірюваної величини [14].

Невизначеність складається з декількох компонентів, що оцінюються різними способами. Деякі з них оцінюються статистично (за повторними вимірюваннями) та з передбачуваних розподілів ймовірностей (на основі досвіду чи іншої інформації). За способами оцінювання всі невизначеності поділяються на тип А і тип В. Цей поділ слугує для зручності обговорення двох різних методів оцінювання компонентів невизначеності, а не для розмежування їхньої природи.

Обидва типи оцінювання ґрунтуються на розподілах ймовірностей, а компоненти невизначеності кількісно визначаються дисперсією або стандартним відхиленням.

За типом А оцінюються невизначеності, що підлягають повторним вимірюванням, до яких можна застосувати статистичні методи. Це, наприклад, невизначеність, отримана з серії спостережень.

За типом В оцінюються невизначеності, до яких статистичні методи безпосередньо застосувати неможливо. У таких випадках використовуються інші відомі способи, наприклад, дані з калібрувальних сертифікатів, характеристики виробників обладнання, інформація з довідників, або ж оцінки, засновані на особистому досвіді та експертному судженні [15,16].

На практиці, для визначення невизначеності необхідно оцінити вхідні величини, врахувати поправки на відомі систематичні ефекти та їхні стандартні невизначеності (як оцінені статистично, так і апіорні), а потім розрахувати кінцевий результат та його комбіновану невизначеність.

Оцінка невизначеності, що характеризує точність методу випробовування, називається апіорною. Її визначають під час розробки методики, щоб регламентувати допустиме значення невизначеності в усіх умовах випробування. Автоматизація цього процесу є актуальною задачею, спрямованою на підвищення ефективності та надійності оцінок.

Важливо, щоб вимірювана величина була визначена повно, щоб її значення було єдиним для всіх практичних цілей, пов'язаних з вимірюванням. Припускається, що за умови правильного виконання всіх операцій та врахування всіх значущих систематичних ефектів, результат вимірювання є надійною оцінкою вимірюваної величини.

Що стосується систематизації невизначеностей за формами подання, то вони поділяються на [15, 16]:

- стандартні (виражаються стандартним відхиленням);
- комбіновані (поєднують різні стандартні невизначеності);
- розширені (надають інтервал, що охоплює істинне значення з певним рівнем довіри);

- відносні стандартні, відносні комбіновані та відносні розширені (виражені у відсотках від вимірюваного значення).

Невизначеність вимірювання включає в себе багато складових. Деякі з них можуть оцінюватися невизначеністю вимірювання типу \square виходячи з статистичного розподілу значень величини, які отримані в серії вимірювань, і можуть бути охарактеризовані стандартними відхиленнями [17]. Інші складові можуть бути оцінені невизначеністю типу \square , які також можуть характеризуватися стандартними відхиленнями що включають застосування функцій щільності ймовірностей, отриманими на основі експерименту або на основі іншої інформації. Вище перераховані види складових невизначеності жорстко не пов'язані з способами розрахунків, визначеними типом A або B . Таким чином кожен з цих видів невизначеності може містити складові невизначеності типу A та типу B [17].



Рисунок 4.1 – Систематизація невизначеностей вимірювання

Оцінювання невизначеності за типом A . Експериментальну дисперсію, яка характеризує складову невизначеності, отриману в результаті оцінювання за типом A , знаходять із рядів повторних спостережень, і вона є статистичною оцінкою дисперсії. Експериментальне стандартне відхилення отримують як додатний квадратний корінь з дисперсії, позначають як u_A і для зручності називають стандартною невизначеністю типу A [16].

Оцінення компонентів стандартної невизначеності за типом A заснована на розподілах частоти. Тому для оцінювання стандартної невизначеності за типом A необхідно провести n незалежних спостережень вимірюваної величини x в умовах повторюваності [16].

У більшості випадків найкращою доступною оцінкою математичного сподівання чи очікуваного значення μ_x величини x , що змінюється випадковим чином, є середнє арифметичне або середнє значення x із n спостережень [17]:

$$\underline{x} = \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.1)$$

Експериментальне стандартне відхилення, що характеризує змінність значень x_i , або, точніше, їхню дисперсію σ^2 відносно середнього значення \underline{x} , розраховують за формулою [17]:

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2}{n - 1}}. \quad (4.2)$$

Оскільки за результат багаторазових вимірювань беруть середнє значення \underline{x} то важливо оцінити його дисперсію. Найкраща оцінка $\sigma^2(\underline{x}) = \sigma^2/n$ дисперсії середнього значення $u_A^2(\underline{x})$ виражається як [17]:

$$u_A^2(\underline{x}) = \frac{u_A^2(x_i)}{n}. \quad (4.3)$$

Експериментальна дисперсія середнього $u_A^2(\underline{x})$ і експериментальне стандартне відхилення середнього значення $u_A(\underline{x})$, що дорівнює додатному

квадратному кореню з оцінки дисперсії $u_A^2(\underline{x})$, кількісно визначають, наскільки добре \underline{x} оцінює очікування μ_i величини x [16].

З урахуванням виразів (4.2) та (4.3) експериментальне стандартне відхилення середнього значення $u_A(\underline{x})$ розраховується за формулою [17]:

$$u_A(\underline{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (4.4)$$

Оцінювання невизначеності за типом В. Для оцінювання x_i вхідної величини X_i , яка не була отримана в результаті повторних спостережень, пов'язані з ними оцінена дисперсія $u^2(x_i)$ або стандартна невизначеність $u(x_i)$ визначаються на базі наукового судження, що базується на всій доступній інформації про можливу змінність X_i . Тобто, стандартну невизначеність типу В одержують з передбачуваної функції щільності вірогідності, основаної на ступені впевненості в тому, що подія обов'язково відбудеться (ця вірогідність часто називається суб'єктивною вірогідністю).

Фонд інформації може містити [17]:

- дані про вигляд розподілу ймовірностей;
- невизначеності констант і довідкових даних;
- специфікацію виробника; дані, що наводяться у свідченнях про повірку, калібрування чи в інших сертифікатах;
- дані, отримані в результаті досвіду, або загальні знання про поведінку і властивості відповідних матеріалів та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- дані попередніх вимірювань.

Оцінка стандартної невизначеності типу В вимагає інтуїції, досвіду та загальних знань, розвиваючись з практикою. Важливо зазначити, що оцінка типу В може бути настільки ж надійною, як і оцінка типу А, особливо коли остання базується на обмежених статистичних спостереженнях.

При використанні даних зі специфікацій виробника, свідоцтв про повірку, довідників або інших джерел, де невизначеність вказана як кратне стандартного відхилення, стандартна невизначеність $\Delta(\Delta)$ розраховується шляхом ділення зазначеного значення на відповідний множник. Відповідно, оцінена дисперсія дорівнює квадрату цієї частки.

4.2 Аналіз похибок при застосуванні розробленого методу

Сумарна невизначеність має дві складові: методичну та інструментальну (рис. 4.2).

Методична може бути викликана зміною умов навколишнього середовища, в першу чергу температури та зміною властивостей матеріалів з часом під дією різних факторів. Так в діапазоні зміни температури від $+35^{\circ}\text{C}$ до -20°C швидкість поширення звуку в сталі буде змінюватися від 5750 м/с до 6150 м/с [17], а отже стандартна невизначеність буде:

$$u_V = \frac{x_{max} - x_{min}}{2\sqrt{3}} = \frac{6150 - 5750}{2\sqrt{3}} = 115 \text{ м/с.} \quad (4.4)$$

Відносна невизначеність розраховується за відношенням стандартної невизначеності до середнього значення швидкості у визначеному діапазоні зміни і рівна:

$$\delta_V = \frac{u_V}{v_{сер}} \cdot 100\% = \frac{115}{5950} \cdot 100\% = 1.9 \%. \quad (4.5)$$

Цю похибку можна усунути вводячи температурні коефіцієнти, оскільки вона є постійною і відомою, то ми не враховуватимемо її в розрахунок сумарної похибки методу.

Також акустичні властивості змінюються з часом при постійному впливі на матеріал різних умов навколишнього середовища, так зване старіння матеріалу. Так швидкість повздовжньої хвилі в сталі після тривалого часу експлуатації при температурі 20°C може змінюватися в діапазоні від 5980 м/с до 6015 м/с [17], звідси стандартна невизначеність буде:

$$u_{VM} = \frac{6015 - 5980}{2\sqrt{3}} = 10,10 \text{ м/с.} \quad (4.6)$$

Відносна невизначеність відповідно:

$$\delta_{VM} = \frac{10,10}{5997,5} \cdot 100\% = 0,17 \%. \quad (4.7)$$

Швидкість поширення повздовжньої хвилі в резині під впливом процесу старіння від 1486 до 1508 м/с звідси стандартна невизначеність буде:

$$u_{VP} = \frac{1508 - 1486}{2\sqrt{3}} = 6,4 \text{ м/с.} \quad (4.8)$$

Відносна невизначеність відповідно:

$$\delta_{VP} = \frac{6,4}{1497} \cdot 100\% = 0,42 \%. \quad (4.9)$$

Сумарна відносна методична невизначеність контролю з врахуванням некорельованості складових рівна:

$$\delta_{\Sigma \text{ мет}} = \sqrt{\delta_{VM}^2 + \delta_{VP}^2} = 0,45 \%. \quad (4.10)$$

Інструментальна невизначеність дорівнюватиме сумі невизначеностей кожного вузла вимірювального приладу.

Вузол збудження містить пристрій акустичного збудження, який згідно з паспортними даними має нерівномірність амплітудно-частотної характеристики у робочій області частот 2 дБ. Враховуючи, що діапазон зміни інтенсивності звуку пристрою при середньому значенні становить 192 дБ, відносна похибка від нерівномірності амплітудно-частотної характеристики розраховується як:

$$\delta_{АЧХ} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100\%}{192} = 0,6 \%. \quad (4.11)$$

Похибка підсилення сигналу підсилювачем потужності в діапазоні частот 0,4 – 4 МГц згідно з його паспортними даними Δ_{II} становить 1,2 % при вихідній напрузі 5 В. Тоді, розрахована аналогічно виразом (4.11) невизначеність підсилення сигналу δ_{II} становить 0,7 %.

Невизначеність визначення амплітуди через використання 8-ми бітного аналого-цифрового перетворювача буде:

$$\delta_{\text{АЦП}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100\%}{2^8} = 0,23 \%. \quad (4.12)$$

Похибка блоку дванадцятивольтового блоку живлення становить 1,1%. Відповідно розрахувавши невизначеність за (4.11) отримаємо $\delta_{\text{ж}} = 0,63 \%$.

Невизначеність генератора блоку приймання сигналу становить $\delta_{\text{Г}} = 0,03\%$ від максимальної частоти генерування.

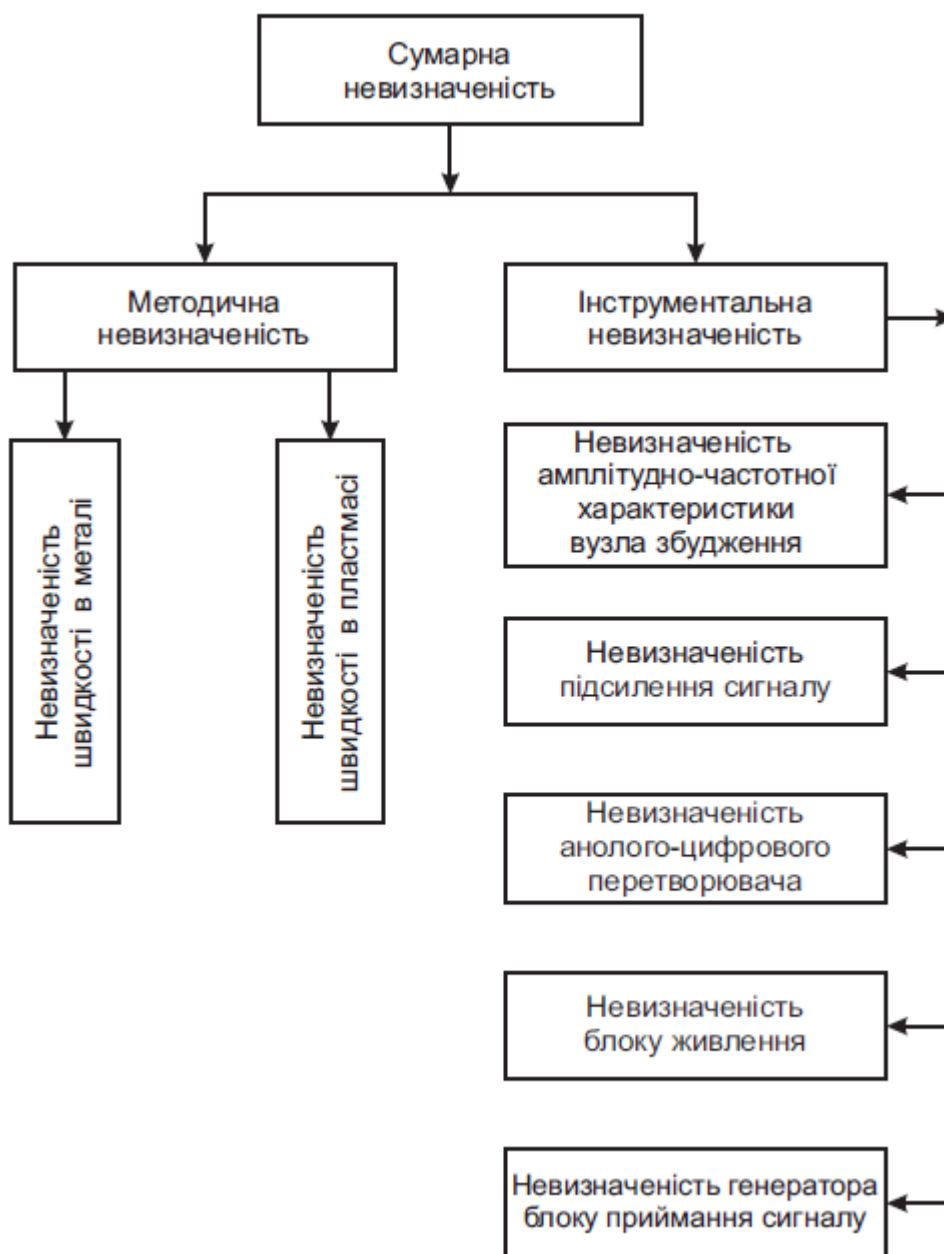


Рисунок 4.2 – Схема нагромадження сумарної невизначеності

Отже сумарна інструментальна невизначеність, з врахуванням некорельованості складових, буде мати вигляд:

$$\delta_{\Sigma \text{ інструм}} = \sqrt{\delta_{\text{АЧХ}}^2 + \delta_{\text{п}}^2 + \delta_{\text{АЦП}}^2 + \delta_{\text{ж}}^2 + \delta_{\text{г}}^2} = 1,14\% \quad (4.13)$$

Сумарна невизначеність дорівнюватиме:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\Sigma \text{ інструм}}^2 + \delta_{\Sigma \text{ мет}}^2} = 1,22\% \quad (4.14)$$

Висновки до розділу 4

У Розділі 4 було детально проаналізовано природу та методи оцінювання невизначеностей вимірювання, що є ключовим аспектом для забезпечення достовірності результатів.

Невизначеність є невід'ємною характеристикою якості вимірювальних засобів та результатів. Вона відображає сумнів у точності отриманого значення, оскільки будь-яке вимірювання є лише наближенням до істинної величини. Метою оцінювання невизначеності є кількісне визначення діапазону можливих значень.

Невизначеності поділяються за способами оцінювання (Тип А та Тип В) та формами подання (стандартні, комбіновані, розширені, відносні). Тип А базується на статистичному аналізі серії повторних вимірювань, використовуючи експериментальне стандартне відхилення середнього значення. Тип В використовується для оцінок, до яких статистичні методи не застосовуються безпосередньо, покладаючись на наукове судження, досвід, дані виробників, калібрувальних сертифікатів або довідників. Обидва типи оцінок є однаково надійними при правильному застосуванні.

Розглянуто джерела виникнення невизначеностей та розраховано сумарну невизначеність як суму методичної та інструментальної складових.

Методична невизначеність обумовлена зміною умов (наприклад, температури та старіння матеріалів). Було показано, що вплив температури на швидкість звуку можна усунути введенням температурних коефіцієнтів. Старіння матеріалу, хоч і незначне (0,17% для сталі, 0,42% для гуми), вносить свій вклад у сумарну методичну невизначеність, що склала 0,45%.

Інструментальна невизначеність визначається сумою невизначеностей окремих вузла вимірювального приладу (нерегулярність АЧХ, похибка підсилення, АЦП, блок живлення, генератор). Сумарна інструментальна невизначеність склала 0,74%.

Шляхом комбінування методичної та інструментальної невизначеностей (з урахуванням їхньої некорельованості) було розраховано загальну сумарну невизначеність розробленого методу, яка склала 1,22%.

Таким чином, детальний аналіз невизначеностей дозволив кількісно оцінити достовірність результатів вимірювання, підкресливши важливість врахування всіх джерел похибок для забезпечення надійності акустичного імпедансного методу контролю.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Ультразвукові методи набули найширшого застосування в неруйнівному контролі оскільки вони є досить безпечними, в порівнянні з іншими видами контролю, та інформативними водночас. Все ж певна негативна дія ультразвуку на організм людини є. Санітарні норми виробничого ультразвуку нормуються ДСН-3.3.6.037-99. В даному розділі буде розглянуто заходи необхідні для зменшення негативної дії ультразвуку на працівника, а також заходи необхідні для безпечної роботи в діагностичній лабораторії підприємства.

5.1 Значення охорони праці у забезпеченні безпечних і здорових умов праці і нормального екологічного стану

Охорона праці – це система законодавчих, соціально – економічних, технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально - профілактичних заходів і засобів, які безпосередньо направлені на забезпечення безпеки, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Покращення умов праці приводить до зниження виробничого травматизму, професійних захворювань, зменшує витрати на оплату лікарняних бюлетеню по непрацездатності, вирішує проблему текучості кадрів.

Охорона праці розв'язує проблеми, пов'язані із забезпеченням здорових та безпечних умов праці і відповідних їм соціально економічних, організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів. Завдання охорони праці полягає в тому, щоб звести до мінімуму ймовірність ураження або захворювання працюючого з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці. Реальні виробничі умови характеризуються, як правило, наявністю певних небезпек та шкідливостей.

Значення охорони праці визначається тим, що вона напрямлена на вирішення важливого соціального питання – збереження здоров'я людей. Покращення умов праці, підвищення її безпеки та нешкідливості має велике

екологічне значення. Воно впливає на економічні результати виробництва _ на продуктивність праці, якість, собівартість виготовленої продукції.

В ряді підприємств виділяються пари, гази, аерозолі, які по своїй дії на організм людини мають задушливі (окис вуглецю, синильна кислота), подразнюючі (фтористий водень, сірководень, сірчаний газ), наркотичні (бензол, сірководень), отруйні (фосфор, ртуть) властивості.

Крім гігієнічних, до повітряного середовища приміщень висуваються вимоги, продиктовані технологічним процесом. Тому вентиляція повинна забезпечувати не тільки санітарно - гігієнічні вимоги до приміщень, а й вимоги до повітряного середовища.

Покращення умов праці та її безпека приводять до зниження виробничого травматизму, професійних захворювань, інвалідності, що зберігає здоров'я працюючих і одночасно призводить до зменшення затрат на оплату пільг та компенсацій за роботу при шкідливих умовах праці, на оплату наслідків такої роботи, на лікування. Перепідготовку працівників виробництва у зв'язку з плінністю кадрів по причинах, що пов'язані з умовами праці.

Охорона праці виявляє та вивчає можливі причини виробничих нещасних випадків, професійних захворювань, аварій, вибухів, пожеж і розробляє систему заходів та вимог з метою усунення цих причин та створення безпечних і сприятливих для людини умов праці. Вона повинна захищати робітників від дії шкідливих та небезпечних виробничих факторів, забезпечувати найбільш сприятливі умови праці, які сприяють підвищенню продуктивності праці.

5.2 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Як відомо, умови роботи людини визначаються сукупністю різноманітних факторів, невід'ємною частиною яких є санітарно-гігієнічні умови праці. Таким чином, особливості виробничого середовища можуть і негативно впливати на стан здоров'я й працездатності працюючих. Такі особливості виробничого середовища або робочого місця мають назву професійних шкідливостей.

У комплексі цих особливостей виділяються, в основному, дві категорії: I – шкідливості, обумовлені неправильною організацією і недосконалістю трудових процесів; II – шкідливості, обумовлені умовами навколишнього середовища, або недоліками санітарно-гігієнічних умов праці.

Основною потенційною небезпекою при експлуатації приладу є електрична енергія, якою він живиться. Під час роботи з приладом можливі два характерні ураження електричним струмом:

- дотик людини до струмопровідних частин;
- дотик людини до корпусу, який нормально не знаходиться під напругою, але в разі пробією ізоляції може бути під напругою;

При замиканні на землю протікає струм та на поверхні з'являються потенціали, закон розподілу яких залежить від типу заземлення. При замиканні на землю небезпечною для людини є напруга дотику та крокова напруга.

Персонал який працює з приладом повинен знати експлуатаційні інструкції та особливості обладнання. Для захисту від ураження електричним струмом здійснюється заземлення електроприладів. На основі аналізу шкідливих факторів, які мають місце при виконанні робіт з приладом, складено таблицю 1.

Хоч ультразвукові методи не мають викиду шкідливих речовин на працюючі на виробництві в лабораторії неруйнівного контролю звичайно будуть проводитися і інші види контролю де використовуються шкідливі речовини і під час яких може попасти інженер який з ними безпосередньо не працює. Також при горінні ізоляції приладу виділятися шкідливі речовини. На основі аналізу шкідливих речовин складено таблицю 5.2.

Таблиця 5.1 – Потенційно небезпечні виробничі фактори

Об'єкт	Небезпечний фактор	Фактичне значення	Нормативне значення	Характер дії на людину
Мережа живлення	Електричний струм	$I = 15\text{A}$ $U = 220\text{В}$ $f = 50\text{Гц}$	$I = 0,1\text{A}$ $U = 220\text{В}$ $f = 50\text{Гц}$	Опіки, судорожне скорочення м'язів, електротравми різного ступеня
ЕОМ	Рентгенівське випромінювання	9-12 мкР/год	25 мкР/год	Загальна втома, головний біль

ЕОМ	УФ випромінювання	0,015 Вт/м ²	0,01 Вт/м ²	Загальна втома, головний біль
ЕОМ	Яскравість	70 кД/ м ²	Не менше 30 кД/ м ² не більше 65 кД/ м ²	Біль в очах
ЕОМ	Електростатичне поле	25 кВ/м	60 кВ/м	Загальна втома
ЕОМ	Шум	65 дБА	55 дБА	Роздратування, загальна втома, погіршення слуху

Таблиця 5.2 – Характеристика шкідливих речовин

Назва шкідливої речовини	Технологічний процес, в якому виділяються шкідливі речовини	Гранично-допустима концентрація речовини в робочій зоні, мг/м ³	Перша допомога
Оксид вуглецю	Горіння ізоляції	50	Свіже повітря, кава, 25 капель валеріани
Гідрохлорид	Горіння ізоляції	5	Інгаляції 2% розчином двовуглекислої соди. Уражене місце негайно промивають водою, потім розчином двовуглекислої соди і знову водою.

5.3 Забезпечення нормальних умов праці

Метеорологічні умови виробничих приміщень (робочої зони) визначаються сукупністю параметрів – температури (t , °C), відносної вологості (ϕ , %), швидкості руху повітря (V , м/с), атмосферного тиску (P , мм. рт. ст.), інтенсивності теплового випромінювання (E , Вт/м²). Сукупність цих величин, характерних для конкретних виробничих умов, називається мікрокліматом.

Параметри, що визначають метеорологічні умови на кожному робочому місці, як окремо, так і в різних сполученнях, впливають на функціональну діяльність людини, її самопочуття, здоров'я і є одними з найважливіших показників санітарно-гігієнічних умов праці. Так, збільшення швидкості руху повітря зменшує несприятливий вплив високих але збільшує вплив низьких

температур. Збільшення відносної вологості повітря вище нормативних значень збільшує негативну дію як зниженої, так і підвищеної температури.

При високій температурі повітря знижується увага, з'являється поспішливість і необачність, а при низькій – зменшується рухомість кінцівок внаслідок інтенсивної тепловіддачі організму. Впливає на тепловіддачу організму і вологість повітря. При температурі біля 18°C вологість повинна знаходитися в межах від 35 до 70%. При меншій відносній вологості повітря вважається сухим, при більшій – з підвищеною вологістю. Сухе повітря приводить до підвищеного випаровування, як наслідок з'являється сухість слизових оболонок і шкіри. Дуже вологе повітря послаблює випаровування.

Таким чином, сполучення різних значень параметрів мікроклімату робочої зони створює ряд метеорологічних умов, що по-різному позначаються на фізіологічних процесах протікання життєвих функцій організму людини і по-різному впливають на продуктивність праці.

Оптимальними умовами мікроклімату називають таке сполучення параметрів метеорологічних умов на робочому місці, що при тривалому й систематичному впливі на людину забезпечує збереження нормального функціонування організму без перенапруження роботи механізму терморегуляції працюючого.

Для запобігання електротравматизму важливе значення має правильна організація обслуговування приладу, проведення ремонтних робіт. При цьому під правильною організацією розуміється суворе виконання ряду організаційних та технічних заходів [22].

При роботі з ЕОМ слід, наскільки можливо, зменшити засліпленість від прямого та відбитого блищання, відмежуватись від постійної пульсації зображення, які посилюють загальну і зорову втоми. Необхідно забезпечити кількісні та якісні параметри освітлення.

Оптимальні метеорологічні умови для виробничого приміщення лабораторії та категорія робіт за важкістю представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Оптимальні значення метеорологічних умов в робочих зонах виробничого приміщення

Назва приміщення	Категорія важкості фізичних робіт	Період року	Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
діагностична лабораторія	І а	Холодний	22-24	40-60	0,1
		Теплий	23-25	40-60	0,1

Вентиляція є головним засобом створення нормальних метеоумов у робочій зоні, необхідні характеристики вентиляції для даного виробничого приміщення подано в таблиці 5.4.

Освітлення в виробничих приміщеннях є не менш важливим у забезпеченні нормальної роботи персоналу. Освітлення буває природнім, штучним та комбінованим. При недостатньому природному освітленні використовують комбінованим освітлення, при якому в денний час використовується одночасно природне і штучне освітлення. Встановлено значення мінімальної освітленості згідно відомчих нормативів (таблиця 5.5), так як специфіка роботи в лабораторії вимагає створення нормальних умов для здорової роботи працівників.

Таблиця 5.4 – Характеристика штучної вентиляції

Приміщення	Тип вентиляції	Вентиляційне обладнання	Кратність повітряного обміну, 1/год
діагностична лабораторія	Притічно-витічна	Кондиціонер повного кондиціонування Samsung 2SM	2

Таблиця 5.5 – Характеристика штучної освітленості

Назва приміщення	Розряд зорової роботи	Освітленість, лк				Тип світильників
		Загальна	Комбінована	Аварій-на	Евакуаційна	
діагностична лабораторія	III в	300	750	40	10	ЛДОР (з лампами ЛБ-20)

Ультразвук – коливання звукової хвилі з частотою більше 20 кГц (за межами чутності). Низькочастотні ультразвукові коливання поширюються повітряним та контактним шляхом; високочастотні – контактним шляхом. Ультразвук чинить шкідливий вплив на серцево-судинну, нервову і ендокринну системи; порушує терморегуляцію і обмін речовин. Місцевий вплив може призвести до оніміння.

Низькочастотні ультразвукові коливання добре поширюються в повітрі. Біологічний ефект впливу їх на організм залежить від інтенсивності, тривалості впливу та розмірів поверхні тіла, що піддається дії ультразвуку. Тривалий систематичний вплив ультразвуку, що поширюється в повітрі, викликає функціональні порушення нервової, серцево-судинної й ендокринної систем, слухового і вестибулярного аналізаторів.

У працюючих на ультразвукових установках відзначають виражену вестенію, судинну гіпотонію, зниження електричної активності серця і мозку, почуття страху в темряві, в обмеженому просторі, різкі напади з почастиванням пульсу, надмірною пітливістю, спазми в шлунку, кишечнику, жовчному міхурі. Найбільш характерні скарги на різке стомлення, головний біль і відчуття тиску в голові, труднощі при концентрації уваги, гальмування розумового процесу, безсоння.

Контактна дія високочастотного ультразвуку на руки призводить до порушення капілярного кровообігу в кистях рук, зниження больової чутливості, тобто розвиваються периферичні неврологічні порушення. Встановлено, що ультразвукові коливання можуть викликати зміни кісткової структури з розрідженням щільності кісткової тканини.

Саме тому різні ультразвукового тиску у робочих зонах не повинні перевищувати допустимі рівні (таблиця 5.6), максимальна величина ультразвуку у зонах, призначених для контакту рук оператора з робочими органами приладів та устаткування, протягом 8-годинного робочого дня не повинна перевищувати значень, вказаних у таблиця 5.7.

Таблиця 5.6 – Допустимі рівні ультразвукового тиску в робочій зоні

Середньгеометричні частоти третинооктавних смуг, кГц	12,5	16	20	25	31,5	63-100
Допустимі рівні тиску, дБ	80	90	100	105	106	110

Таблиця 5.7– Допустимі значення ультразвуку в зоні контакту рук оператора з джерелом випромінювання

Параметр що нормується	Допустима величини
Віброшвидкість	м/с
Логарифмічний рівень віброшвидкості	110 дБ
Інтенсивність	0,1 Вт/см

5.4 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу та експлуатації обладнання

З метою забезпечення технологічного процесу, монтажу та експлуатації приладу необхідно дотримуватись наступних вимог:

– до монтажу, огляду, експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і випробувань приладу допускаються особи, які досягли вісімнадцятирічного віку, зивчили технічний опис та інструкцію по техніці безпеки при роботі електротехнічними установками та радіо-електричною апаратурою, пройшли медичний огляд, пройшли навчання, інструктаж з питань охорони праці, у тому числі при виконанні робіт з підвищеною небезпекою, подання першої допомоги

потерпілим від нещасних випадків, про правила поведінки при виникненні аварій;

– Особи, що здійснюють монтаж, ремонт та експлуатацію контрольно-вимірювальних приладів і автоматики, зобов'язані уміти користуватися засобами колективного та індивідуального захисту, дотримуватися зобов'язань з охорони праці, передбачених колективним договором (угодою, трудовим договором) та правилами внутрішнього трудового розпорядку підприємства, у тому числі: своєчасно розпочинати і закінчувати роботу, дотримуватися технологічної та обідньої перерв, не виконувати роботи, непередбачені змінним завданням, не знаходитися на робочому місці у позаробочий час і без дозволу відповідного керівника.

– всі вимірювальні прилади, які використовують для знаходження полумок, огляду і інших роботах, повинні мати надійне заземлення;

– всі види технологічного обслуговування, які пов'язані з перепайкою елементів, розпайкою кабелів, проводів і іншого, приводиться тільки при відключеному приладі;

– не допускається експлуатація обладнання з нещільно вставленим роз'єднувачем і з неущільненими кабелями;

– У випадку виникнення пожежі необхідно вимкнути всі види вентиляції, включити пожежну сигналізацію, негайно розпочати гасіння наявними засобами пожежогасіння і повідомити за телефоном 101 у пожежну охорону.

– У випадку травмування (отруєння) працівник повинен вжити заходів щодо надання необхідної допомоги потерпілому при нещасних випадках до прибуття лікаря.

Безпечність експлуатації при нормальних режимах роботи електроустановок забезпечується наступними захисними заходами: застосування ізоляції, недоступність струмопровідних частин, методи орієнтації, застосування малих напруг, ізоляцією електричних мереж від землі, компенсацією ємностей складових струму замикання на землю, вирівнювання потенціалів та застосування ізолюючих ділянок.

Одним з найефективніших захистів є захисне заземлення. Захисним заземленням називають заземлюючі прилади, призначені для з'єднання металічних частин електрообладнання, які не знаходяться під напругою, з землею безпосередньо металічним провідником – заземлювачем. Призначення захисного заземлення – знизити до безпечної величини напругу відносно землі, яка виникає безпосередньо на металічних частинах електроустановки та в іншій апаратурі у випадку пробоя, або пошкодження ізоляції провідників, несучих робочий струм. Технічні засоби захисту приведені в таблиці 6.

Таблиця 5.8 – Технічні засоби захисту

Небезпечні фактори виробничого середовища	Засоби та заходи захисту	Технічна характеристика пристрою або засобу	Місце встановлення на плані або агрегаті, терміни використання
Небезпека електро-травматизму	Ізоляція	Опір ізоляції не менше 0,5 МОм	Встановлюється на струмоведучих елементах
	Захисне заземлення	Опір захисного заземлення менший або рівний 10 Ом	Заземлюється прилад та інше електрообладнання

5.4.1 Розрахунок захисного заземлення

Прилад живиться від електромережі напругою 220 В. Вимірний питомий опір ґрунту $\rho_{\text{в}} = 90 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Вимірювання відбувалось при сухому ґрунті.

Найбільший допустимий опір захисного заземлення в електроустановках з напругою до 1000 В, потужністю, що не перевищує 100 кВт (згідно ПУЕ), не перевищує 10 Ом. Заземлення виконуємо з стержнів діаметром 10 мм і довжиною 2 метри.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{роз}} = \rho_{\text{в}} \cdot \psi, \quad (5.1)$$

де $\rho_{\text{в}}$ – вимірний опір ґрунту, ψ – кліматичний коефіцієнт.

З таблиці питомих електричних опорів ґрунтів і кліматичних коефіцієнтів [20] визначаємо кліматичний коефіцієнт для сухого ґрунту $\psi = 1,4$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{роз}} = 90 \cdot 1,4 = 126 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Опір заглибленого вертикального заземлювача знаходимо за формулою:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \ln \frac{4H+l}{4H-l} \right), \quad (5.2)$$

де ρ – питомий опір ґрунтів, l – довжина стержня, d – діаметр, H – відстань від поверхні до середини заземлювача.

Підставляючи в формулу (5.2) числові значення $\rho = 126 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $l = 3 \text{ м}$, $d = 0,01 \text{ м}$, $H = 2 \text{ м}$ отримуємо опір розтікання струму одиничного заземлювача:

$$R = \frac{126}{2 \cdot \pi \cdot 3} \left(\ln \ln \frac{2 \cdot 3}{0,01} + \frac{1}{2} \ln \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 14,28 \text{ Ом.}$$

Необхідну кількість паралельно з'єднаних заземлювачів визначимо з формули:

$$n = \frac{R_1}{R_{\text{ш}} \cdot \eta_3}, \quad (5.3)$$

де R_1 – опір розтікання струму одного заземлювача, $R_{\text{ш}}$ – максимально допустимий опір усіх штучних заземлювачів, η_3 – коефіцієнт використання заземлювачів, в якому враховується їх взаємне екранування.

Для визначення коефіцієнта потрібно задати конфігурацію розташованих заземлювачів.

Розглянемо випадок, коли вертикальні стержні розташовані по контуру квадрата $6 \times 6 \text{ м}$. Якщо відстань між заземлювачами складає 2 м , то по периметру квадрата можна розмістити 8 стержнів. В якості з'єднувальної смуги використовуємо сталеву шину $30 \times 5 \text{ мм}$. Довжина з'єднувальної шини визначається периметром квадрата 6×6 метрів і рівна 24 м .

Опір розтікання струму шини визначається за формулою для обчислення опору горизонтального заглибленого заземлювача:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \ln \frac{2l^2}{bH}, \quad (5.4)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, l – довжина заземлювача, H – віддаль від поверхні до заземлювача, b – ширина заземлювача.

Опір з'єднуючої шини :

$$R = \frac{126}{2\pi \cdot 24} \ln \ln \frac{2 \cdot 24^2}{0.04 \cdot 0.7} = 8.878 \text{ Ом.}$$

Так як відношення відстані між вертикальними стержнями до їх довжини рівне одиниці, число заземлювачів $k = 8$, то коефіцієнт використання горизонтальної з'єднуючої смуги:

$$R_{\Gamma} = \frac{8.878}{0.028} = 32,881 \text{ Ом.}$$

Вертикальні стержні і горизонтальну шину розглядаємо як два паралельно з'єднаних опори. Тоді необхідний сумарний опір вертикальних заземлювачів знаходиться з умови:

$$R_{\text{вз}} \leq \frac{R_{\Gamma} \cdot R_d}{R_{\Gamma} + R_d}, \quad (5.5)$$

де $R_{\text{вз}}$ – опір розтікання струму вертикальних заземлювачів, R_{Γ} – опір розтікання струму з'єднуючої шини, R_d – максимально допустимий опір заземлюючого пристрою.

$$R_{\text{вз}} \leq \frac{32,881 \cdot 10}{32,881 + 10} = 7,68 \text{ Ом.}$$

Опір заземлювачів, розміщених по контуру квадрата 6×6 м не перевищує максимально допустимого значення 10 Ом.

5.5 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях

Пожежна безпека – це стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у разі її виникнення запобігається вплив на людей шкідливих і небезпечних факторів пожежі та забезпечується захист матеріальних цінностей.

Основними причинами пожежі в приміщенні діагностичної лабораторії можуть бути:

- займання приладу внаслідок перегрівання радіо-елементів через осідання на них пилу за час тривалої експлуатації;
- займання приладу внаслідок проливання на нього рідин;
- займання приладу внаслідок короткого замикання в ньому;
- загоряння проводки внаслідок пошкодження кабелю приладу;
- загоряння рідин (флюсу і спиртового розчину каніфолі) при проведенні ремонтних робіт приладу.

Згідно з нормами технічного проектування приміщення відноситься до категорії *B* пожежонебезпечних приміщень.

Для запобігання виникнення пожежі прилади регулярно перевіряються на цілісність кабелю живлення, на відсутність скупчення великої кількості пилуки в середині приладу, проводиться регулярне продування приладу та вентиляція приміщень, легко займисті речовини зберігаються в термостійкій герметичній посуді, яка відкривається тільки в момент проведення ремонтних робіт приладу.

На випадок виникнення пожежі в приміщенні діагностичної лабораторії знаходяться засоби пожежогасіння наведені в таблиці 5.7.

Отже приміщення відповідає вимогам пожежної безпеки і є безпечним для проведення в ньому вимірювально-діагностичних робіт.

Таблиця 5.9 – Первинні засоби пожежогасіння

Споруда, приміщення, установа	Категорія згідно з санітарними нормами та правилами	Площа, м ²	Первинні засоби пожежогасіння
Діагностична лабораторія	B	90	Вогнегасник ВВК-2, вогнегасник ОВП-5, вогнегасник ОП-10, ящики з піском, засоби індивідуального захисту

Висновки

Проаналізовано потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які присутні при роботі з спроектованим приладом, вказано способи надання першої допомоги при дії на працівника шкідливих факторів. Розроблено заходи по забезпеченню безпечних та нормальних умов роботи, що забезпечать комфортну та безпечну роботу. Для уникнення електротравматизму було розраховано захисне заземлення, також було передбачені засоби для гасіння пожежі.

Отже, проаналізувавши все, що було сказано та прийнято в даному розділі, можна зробити висновок, що проведення різного роду діагностичних робіт в даній лабораторії є безпечним.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білокур І.П. *Акустичний контроль: навч. посіб.* – К.: Либідь, 1999. – 244 с. – ISBN 978-966-346-440-4.
2. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування з використанням нейромережевого підходу): монографія / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська.– Краматорськ : ДДМА, 2017. – 110 с. ISBN 978-966-379-726-7.
3. Акустичні прилади та системи-1: навчальний наочний посібник [Електронний ресурс]: навч. наоч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації «Акустичні мультимедійні технології та системи» / О.І. Дрозденко, К.С. Дрозденко, С.О. Козерук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 154 с.
4. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с.
5. Принцип роботи ультразвукового дефектоскопа. (б.д.). *Novotest.ua*. URL: <https://novotest.ua/ua/stati/princip-raboty-ultrazvukovogo-defektoskopa> (дата звернення: 9.05.2025).
6. [Високочастотний ультразвуковий дефектоскоп]. URL: <https://xn--90anfscfbdt.com.ua/ua/p770379262-vysokochastotnyj-ultrazvukovoj-defektoskop.html> (дата звернення: 13.05.2025).
7. DIO 1000 LF: Дефектоскоп ультразвуковий. (б.д.). *Еталон Прибор*. URL: <https://etalonpribor.com.ua/dio-1000-lf-defektoskop-ultrazvukovoj.html> (дата звернення: 13.05.2025).
8. Прилади товщинометрії. (б.д.). *TÜV DIEKS*. URL: <http://www.tuev-dieks.com/services/technical-diagnosis/pribornaya-baza/priboryi-tolshhinometrii/> (дата звернення: 19.05.2025).
9. Вахненко В. О., Вахненко О. О. Хвильова динаміка структурованих середовищ. Монографія. - Київ, НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН України», 2016. 226 с. ISBN 978-966-00-1496-1

10. Механіка суцільного середовища. Конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальностей: 132 «Матеріалознавство»; / укл: Теліпка Л.П. – Кам'янське: ДДТУ, 2020. 117 с.

11. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Теорія напружень і деформацій. Методичні вказівки. – Вінниця: ВНАУ, 2017. – 129 с.

12. Кисельов, П. Г., Клименко, С. В., & Кулик, О. В. (2022). Система автоматизованого акустичного контролю виробів з полімерних композитних матеріалів. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 90–98. <https://doi.org/10.15421/452212>

13. Автоматизовані засоби акустичного неруйнівного контролю: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів приладобудівного факультету спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс] / Уклад.: Р.М. Галаган. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 65 с.

14. Кісіль, І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань : навч. посіб. / І. С. Кісіль. - Івано-Франківськ : Факел, 2002. - 400 с.

15. Васілевський, О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с.

16. Слізков А. М. Оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних вимірювань: навч. посіб./ А. М. Слізков, Л. А. Дмитренко. – К: Либідь, 2007 – 224 с.

17. Статистична обробка результатів вимірювань та експериментальних даних в текстильній промисловості: навчальний посібник / Упор.: О.Б. Демківський, С.М. Краснитський, Ю.М. Пилипенко, А.М. Слізков – К.: КНУТД, 2012.– 106 с.

23. Ткачук К. Н. Основи охорони праці: Підручник./ К. Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В. В Зацарний. – К.:Основа, 2006. – 444 с.

25. ДСН 3.3.6.042-99 – санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

26. ДБН В.25-28-2006 “Природне і штучне освітлення”.

28. ДСН 3.3.6.037-99 – санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

29. Кривенко Г.М. Охорона праці в галузі: практикум/ Г.М. Кривенко, І.І. Стеліга, О.В. Калічак, Й.І. Рошак. – Івано-Франківськ: ФАКЕЛ, 2015. – 153.

30. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум: Навч. посіб./ Л.А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Пістун. – Суми: Університетська книга, 2009.– 540 с.

32. Ткачук К.Н. Основи оохорони праці: Підручник. 3-тє видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін.. - : Основа, 2011. 480 с.