

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О.І. Дрозденко, К.С. Дрозденко, С.О. Козерук

АКУСТИЧНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ-1

НАВЧАЛЬНИЙ НАОЧНИЙ ПОСІБНИК

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний наочний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент: *Лазебний В.С., канд. техн. наук, доц.*

Відповідальний
редактор: *Найда С.А., д-р техн. наук, проф.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 01.04.2019 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 02/2019 від 25.02.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Дрозденко Олександр Іванович, канд. техн. наук, доц.

Дрозденко Катерина Сергіївна, канд. техн. наук

Козерук Сергій Олександрович, канд. техн. наук, доц.

АКУСТИЧНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ-1

НАВЧАЛЬНИЙ НАОЧНИЙ ПОСІБНИК

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. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,68 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 154 с.

Навчальний наочний посібник узгоджений з навчальною програмою кредитного модуля «Акустичні прилади та системи», що викладається студентам спеціальності «171 Електроніка», та забезпечує проведення лекційних занять з цієї дисципліни. Мета посібника – організація ефективного викладання і сприймання студентами навчальної інформації.

У навчальному посібнику інформація наведена у вигляді ілюстрацій, діаграм, таблиць, тез, які дозволяють скоротити час на викладення матеріалу, підвищити інтерес до дисципліни, розширити і поглибити уявлення студентів про питання, що розглядаються, привернути увагу до найбільш важливих або складних для сприйняття аспектів.

Студенти, навчаючись за даним посібником, матимуть можливість краще орієнтуватися в навчальному матеріалі, легше його засвоювати, а також розуміти складні явища і процеси.

© О.І. Дрозденко, К.С. Дрозденко, С.О. Козерук 2019

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

<i>Вступ.....</i>	<i>4</i>
<i>Розділ 1. Акустотехнічні методи отримання інформації.....</i>	<i>5</i>
<i>Лекція 1. Вступ. Узагальнена структура АПС.....</i>	<i>5</i>
<i>Лекція 2. Імпульсний метод вимірювання відстані</i>	<i>17</i>
<i>Лекція 3. Фазовий метод вимірювання відстані.....</i>	<i>28</i>
<i>Лекція 4. Частотний метод вимірювання відстані.....</i>	<i>33</i>
<i>Лекція 5. Допплерівський метод вимірювання швидкості рухомих об'єктів.....</i>	<i>39</i>
<i>Лекція 6. Акустотехнічні методи вимірювання кутових координат.....</i>	<i>46</i>
<i>Лекція 7. Фазовий та кореляційний методи вимірювання кутових координат.....</i>	<i>51</i>
<i>Розділ 2. Акустичні методи неруйнівного контролю.....</i>	<i>61</i>
<i>Лекція 8. Історія розвитку дефектоскопії. Класифікація акустичних методів контролю матеріалів і виробів.....</i>	<i>61</i>
<i>Лекція 9. Фізичні основи поширення акустичних хвиль у твердих тілах (ч.1).....</i>	<i>71</i>
<i>Лекція 10. Фізичні основи поширення акустичних хвиль у твердих тілах (ч.2).....</i>	<i>80</i>
<i>Лекція 11. Акустичне поле перетворювача.....</i>	<i>90</i>
<i>Лекція 12. Ехо-імпульсний метод дефектоскопії.....</i>	<i>99</i>
<i>Лекція 13. Метод наскрізного прозвучування (тіньовий).....</i>	<i>109</i>
<i>Лекція 14-15. Огляд методів акустичного контролю</i>	<i>120</i>
<i>Лекція 16. Метод акустичної емісії.....</i>	<i>133</i>
<i>Лекція 17-18. Особливості практичного застосування активних методів неруйнівного контролю.....</i>	<i>142</i>

ВСТУП

Акустичні прилади та системи (АПС) - дисципліна, яка вивчає практичне застосування пружних хвиль в техніці та технологіях.

Властивість акустичних хвиль малої інтенсивності поширюватися в пружних тілах без їх руйнування, накопичувати інформацію про досліджуваний об'єкт зумовило розвиток акустичних інформаційно-вимірювальних приладів і систем. Неруйнівний контроль, ультразвукова діагностика і інтроскопія є складовою частиною контролю в процесі виготовлення та експлуатації матеріалів у металургійній та будівельній промисловості. Застосування неруйнівних методів контролю дозволяє прогнозувати довговічність і надійність використання обладнання та механізмів, оперативно реагувати на критичну ситуацію і попереджати аварії в промисловості і транспорті.

Навчальний наочний посібник узгоджений з навчальною програмою кредитного модуля «Акустичні прилади та системи-1», що викладається студентам напряму підготовки 6.050803 Акустотехніка (спеціальності «171 Електроніка»), та забезпечує проведення лекційних занять з цієї дисципліни. Мета посібника – організація ефективного викладання і сприймання студентами навчальної інформації.

Студенти, навчаючись за даним посібником, матимуть можливість краще орієнтуватися в навчальному матеріалі, легше його засвоювати, а також розуміти складні явища і процеси.

Акустичні прилади та системи -1

Лекція 1

Вступ

Завдання курсу

Класифікація АПС.

Узагальнена структурна схема АПС і ТАЗ.

1

Акустичні прилади та системи (АПС)

дисципліна, яка вивчає практичне застосування пружних коливань і пружних хвиль (переважно ультразвукового діапазону) в техніці та технологіях.

2

Мета дисципліни

- вивчення принципів побудови та функціонування приладів, систем та апаратів, які використовують акустичні методи спостереження, візуалізації, вимірювання, контролю, діагностики та генерації потужного ультразвуку у типових задачах інженерної діяльності

3

Задачі дисципліни

- Вивчення фізичних явищ які лежать в основі роботи інформаційних приладів і систем;
- Ознайомлення з принципом побудови та роботи акустичних технологічних пристроїв і установок;
- Вивчення, на структурному рівні, принципів побудови та функціонування АПС;
- Вивчення акустичних методів, які використовуються в інформаційних системах вимірювання, контролю, діагностики, телеметрії та управління;
- Ознайомлення з комп'ютерними технологіями синтезу та обробки сигналів, а також моделювання акустичних інформаційних систем.

4

Розподіл навчального часу

Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з кредитного модуля згідно з робочим навчальним планом:

Семестр	Навчальний час		Розподіл навчальних годин				Контрольні заходи		
	кредити	акад. год.	Лекції	Практ.	Лаб.	СРС	МКР	РГР	Семестрова атестація
7	4	120	36	18	18	48	1	1	залік

5

Рейтингова система оцінювання

Рейтинг студента з кредитного модуля складається з балів, які він отримує за:

- дві відповіді на практичних заняттях ($5б. \times 2 = 10б.$)
- виконання 2-х (одногодинних) контрольних робіт ($20б. \times 2 = 40б.$)
- виконання та захист 5-ти лабораторних робіт ($6б. \times 5 = 30б.$);
- виконання та захист розрахунково-графічної роботи (РГР) (20 б.);

6

Оцінювання

Бали	Залікова оцінка
95-100	Відмінно
85-94	Дуже добре
75-84	Добре
65-74	Задовільно
60-64	Достатньо
Менше 60	Не зараховано
РГР або лабораторні роботи не зараховано	Не допущено

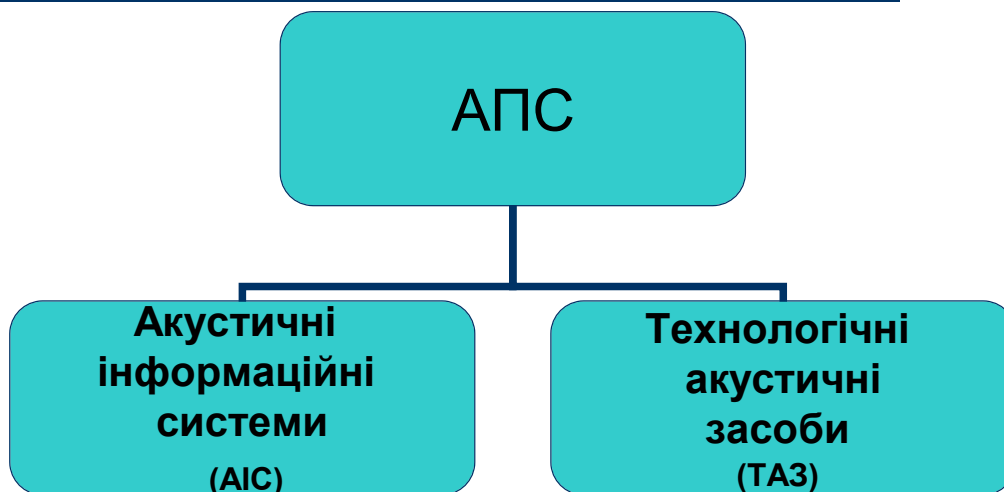
7

Деякі визначення та поняття

- **Акустика** (розділ механіки) – наука, яка вивчає хвильові процеси малої інтенсивності що поширюються в пружній середовищі.
- **Ультразвук** – пружні коливання та хвилі з частотою від 20кГц до 1ГГц.
- **Прилади** – технічні засоби, призначені для отримання кількісної та якісної інформації про досліджуваний об'єкт.
- **Акустичні прилади** – технічні засоби вимірювання, контролю, пристрої розвідки, регулювання та управління, які використовують, як правило, один інформаційний акустичний канал і реалізують одну задачу.
- **Інформаційні системи** – технічні засоби, призначені для вирішення декількох інформаційних задач і використовують, як правило, декілька інформаційних каналів.
- **Технологічний апарат** – технічний пристрій, що використовує акустичні коливання високої інтенсивності в технологічних або медичних цілях.
- **Технологічна установка** – система технологічних апаратів у сукупності з іншими технічними засобами які використовують у технологічних або медичних цілях.

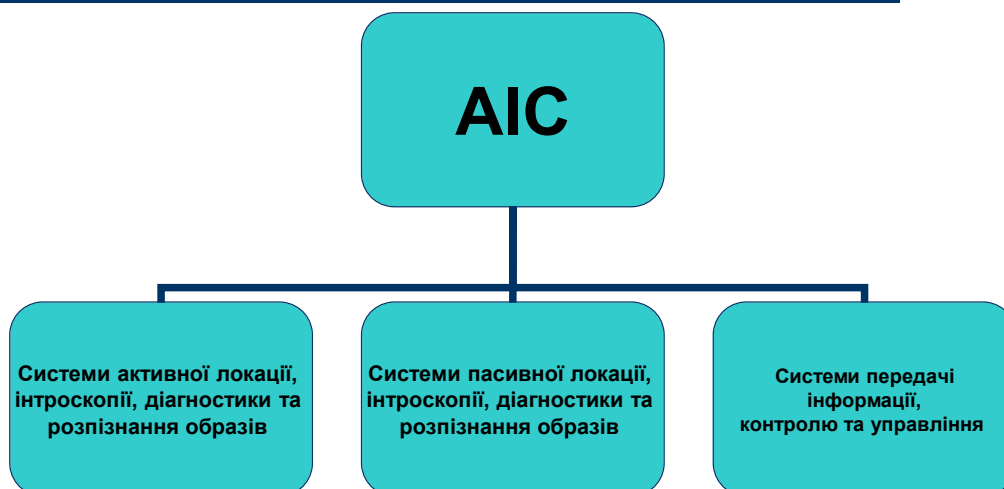
8

Класифікація АПС



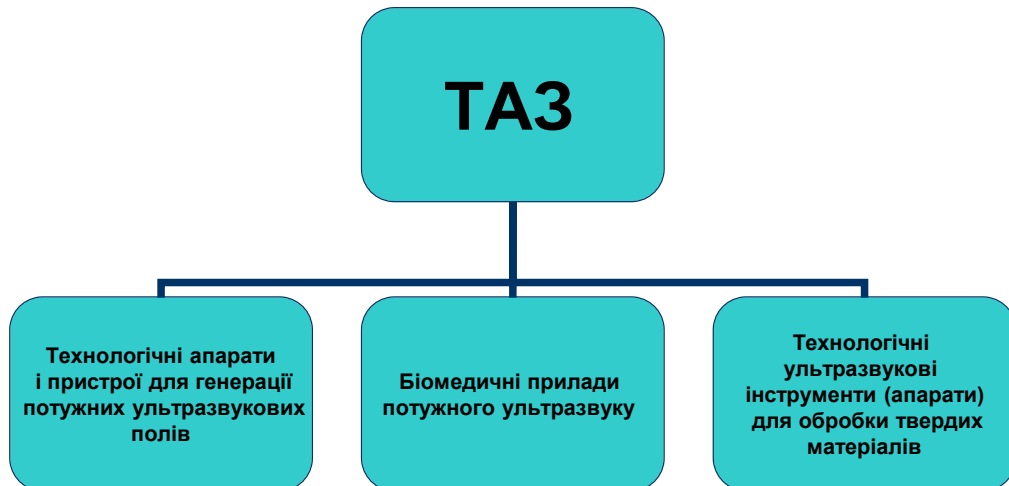
9

Класифікація акустичних інформаційних систем



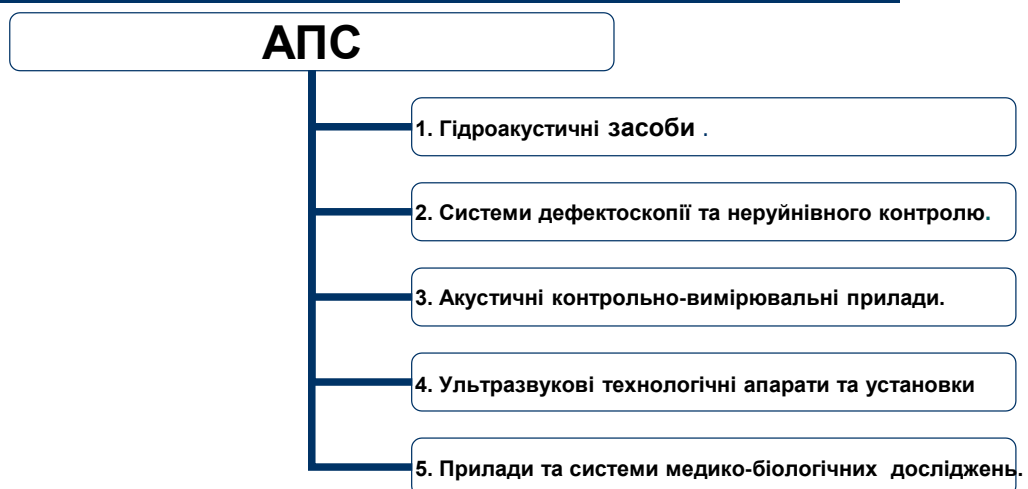
10

Класифікація технологічних акустичних систем



11

Приклади АПС

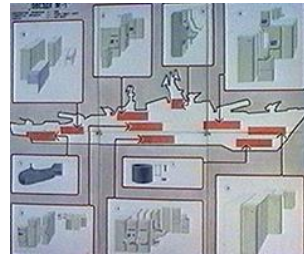


12

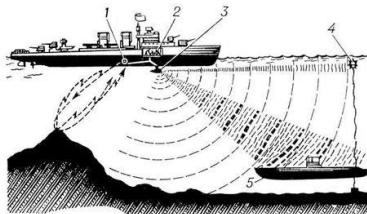
Гідроакустичні засоби



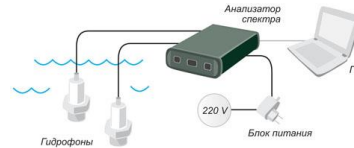
Ехолоти



Гідроакустичне озброєння корабля



Гідроакустична станція



Елементи гідроакустичної станції

13

Ультразвукові системи дефектоскопії



Ультразвуковий дефектоскоп УД3-71



Ультразвуковий дефектоскоп УД2-70



Дефектоскоп імпедансний ІД-401

14

Акустичні контрольні-вимірювальні прилади



Ультразвуковий товщиномір A1209



Ультразвуковий витратомір US -800



Ультразвуковий тестер УК1401М

15

Ультразвукові технологічні апарати та установки



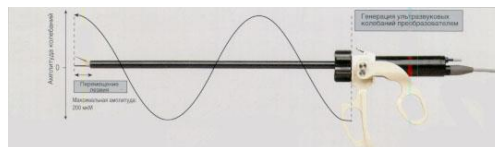
УЗ установка для мікрозварювання HB12



УЗ апарат МОД. МЭФ 372



Ультразвукова ванна ProsKit SS-802F



УЗ хірургичний інструмент SONOSURG

16

Прилади та системи медико-біологічних досліджень



Ехокардіограф IMAGIC SIGMA 5000



УЗ сканер DIXION Partner 2060



УЗ кістковий денситометр Aloka AOS-100

17

Характеристика АІС

- АІС призначені для отримання акустичними методами якісної та кількісної інформації про матеріальні об'єкти довкілля.
- Основними діями що дозволяють отримати таку інформацію є процеси виявлення, вимірювання, контролю, інтроскопії, діагностики та розпізнавання образів.
- *Вимірювання* - це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом, за допомогою спеціальних технічних засобів.
- Під *контролем* мається на увазі встановлення відповідності характеристик об'єкта контролю з заданою нормою. В результаті контролю виносяться судження про стан об'єкта.
- *Діагностика* спрямована на виявлення технічних неполадок в технологічних конструкціях, механізмах та паталогій в біологічних об'єктах.
- *Інтроскопія* акустична передбачає відтворення структури досліджуваного об'єкта за допомогою акустичних хвильових полів.
- *Розпізнавання образів* пов'язано з встановленням відповідності заданого образу і контрольованого об'єкта. Заданий образ може бути заданий сукупністю властивостей і параметрів акустичного поля.

18

Задачі АІС

1. Сканування простору і отримання акустичної інформації з довкілля.
2. Виявлення ідентифікація та розпізнання об'єкту дослідження.
3. Формування візуального зображення досліджуваного об'єкта.
4. Отримання структурно-топологічних характеристики довкілля.
5. Вимірювання відстані до об'єкта, його геометричних розмірів.
6. Визначення динамічних характеристик руху об'єкта.
7. Аналіз і зберігання отриманої інформації.

19

Узагальнена структурна схема АІС



20

Спільні риси АІС

- Наявність технічних засобів випромінювання та прийому акустичних хвиль.
- Перетворення первинної акустичної інформації в електричний еквівалент.
- Первинна обробка електричного сигналу з використанням процедур фільтрації, підсилення, затримки, коригування, підсумовування, нормування, детектування і т.п.
- Вторинна обробка, що включає перетворення аналогового сигналу в цифрову послідовність дискретних імпульсів, використання програмного представлення математичних алгоритмів цифрової фільтрації, коригування, формування і видачу результатів вимірювань.
- Відображення результатів вимірювань або візуалізація образів.

21

Характеристика ТАЗ

- Технологічні акустичні засоби - призначені для створення потужних акустичних коливань в технологічних цілях.
- Властивості ультразвуку створювати механічну і теплову дію дозволили застосовувати його в різних технічних і технологічних цілях.
- Здатність ультразвуку проникати в пружні тіла, фокусуватися в локальній області дозволило розробити ряд терапевтичних та хірургічних інструментів

Основні характеристики ультразвуку:

- інтенсивність: $0.01-10 \text{ Вт/см}^2$.
- діапазон частот: 20 кГц до 5 МГц.
- Технічні додатки сфокусованого ультразвуку дозволяють вирішувати ряд технологічних задач обробки матеріалів і середовищ.

22

Узагальнена структурна схема ТАЗ



23

Приклади застосування ТАЗ

- Кавітаційні ванни і камери для мийки, чистки промислової продукції, стерилізації каналізаційних вод, підготовки води в теплоенергетиці з метою зменшення появи накипу.
- Стерилізація хірургічного інструменту і матеріалу за допомогою ультразвуку.
- Ультразвукове зварювання полімерів;
- Ультразвукове створення емульсій.

24

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 1

Акустотехнічні методи отримання інформації

Лекція 2

Імпульсний метод вимірювання відстані

1

Акустотехнічні методи отримання інформації

- Для отримання інформації в АІС використовують процес який називається *локацією*.
- *Локація* - спостереження навколишнього простору, виявлення об'єктів спостереження, вимірювання їх координат та швидкості.
- *Пеленгування* - виявлення об'єктів та вимір їх кутових координат.
- Розрізняють *активні* і *пасивні* методи локації.

2

2.1. Вимірювання відстані

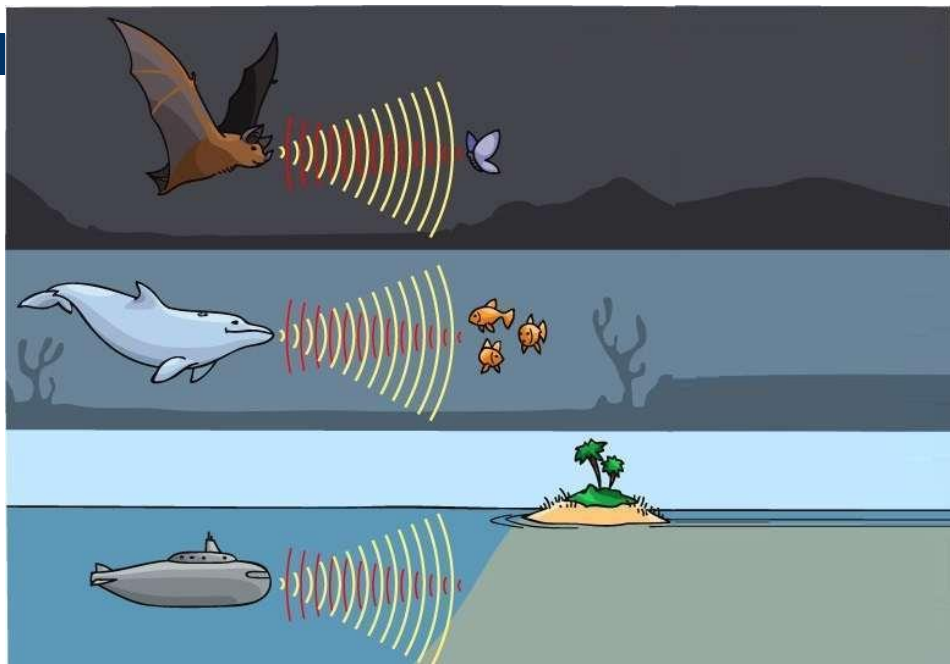
Базується на властивості акустичних хвиль розповсюджуватися у пружному середовищі з кінцевою швидкістю.

Найпоширеніші методи:

- Імпульсний;
- Фазовий;
- Частотний.

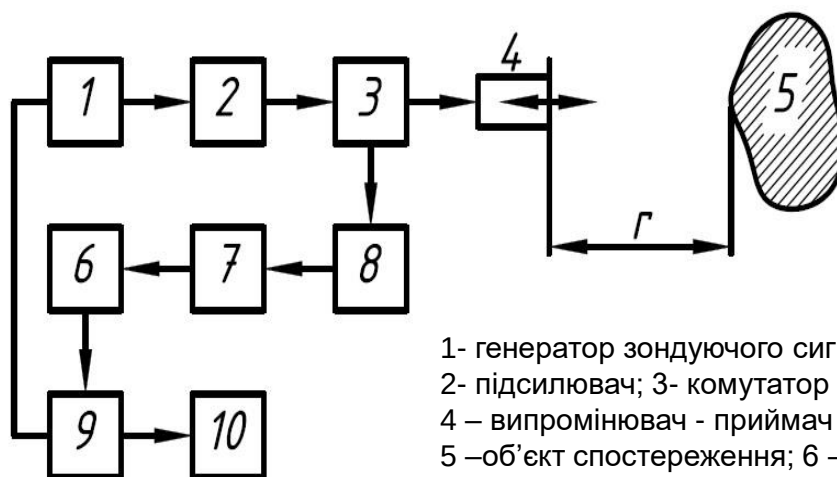
3

2.2. Імпульсний метод вимірювання відстані



4

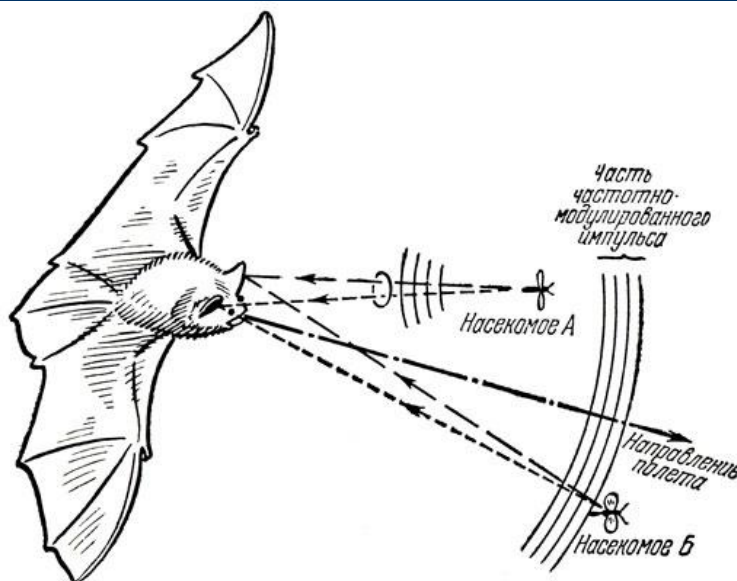
Схема імпульсного локатора



1- генератор зондуючого сигналу;
 2- підсилювач; 3- комутатор прийому-передач;
 4 – випромінювач - приймач акустичних хвиль;
 5 –об'єкт спостереження; 6 – компаратор;
 7 – детектор; 8 – смуговий фільтр;
 9- пристрій вимірювання часової затримки;
 10- індикатор.

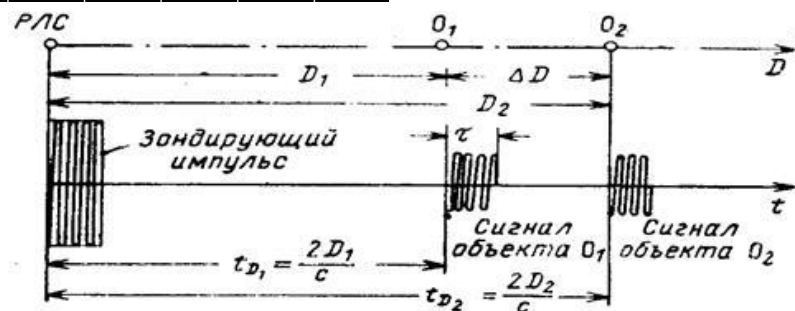
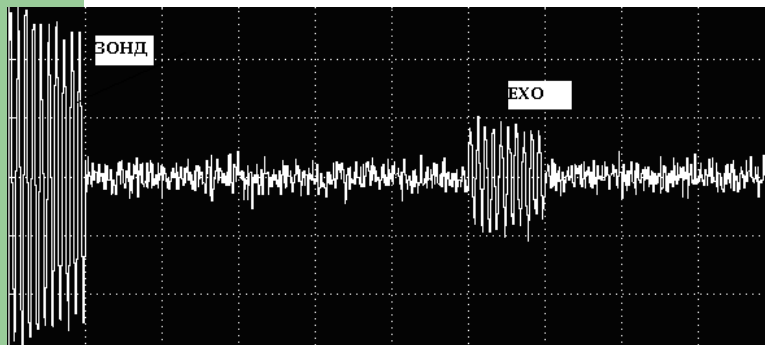
5

Локація ехо-імпульсним методом



6

Типова ехограма локації



7

Визначення відстані до об'єкту

Період локації T .

Тривалість зондуєчого імпульсу τ .

Інтервал часу від початку випромінювання зондуєчого імпульсу до початку прийому відбитого сигналу T_3 .

Акустичні хвилі проходять відстань r між локатором і об'єктом із швидкістю c_0

$$r = \frac{c_0 T_3}{2} \quad (2.1)$$

8

Енергетичні характеристики локатора – імпульсна потужність

електрична імпульсна потужність P_i – середнє значення потужності випромінювання за час дії імпульсу.

$$P_i = 1/\tau \int_0^{\tau} u^2(t) dt, \quad (2.2)$$

де $u(t)$ – миттєве значення напруги обвідної радіосигналу

9

Енергетичні характеристики локатора – середня потужність

електрична середня потужність P_{cp} – середня випромінювана потужність за період повторення імпульсів T :

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} u^2(t) dt = \frac{P_i}{m}; \quad m = \frac{T}{\tau}, \quad (2.3)$$

Відношення тривалості імпульсу до періоду повторення m , називається коефіцієнтом заповнення або шпаруватістю.

10

Метрологічні характеристики локаційного пристрою АІС

- максимальна вимірювана відстань $r_{\max}$;
- мінімальна вимірювана відстань $r_{\min}$;
- поздовжня роздільна здатність Δr ;
- поперечна роздільна здатність $\Delta \theta, \Delta z$;
- похибка вимірювання відстані σ_r .

11

Максимальна вимірювана відстань

Максимальна відстань локації $r_{\max}$ пов'язана з енергетикою локатора та з його імпульсною потужністю і обмежена періодом локації T :

$$r_{\max} = \frac{c_0 T}{2} \quad (2.4)$$

12

Мінімальна вимірювана відстань

Визначається тривалістю імпульсу випромінювання та швидкістю розповсюдження акустичних хвиль:

$$r_{\min} = \frac{c_0 \tau}{2} \quad (2.5)$$

Зменшення τ приводить до енергетичних втрат та зменшення дальності дії локатора.

Тому в ехо-імпульсній локації використовують комбінований метод, в якому для пошуку та виявлення об'єкту використовують довгі імпульси, а для вимірювання відстані переходять на короткі.

13

Поздовжня роздільна здатність

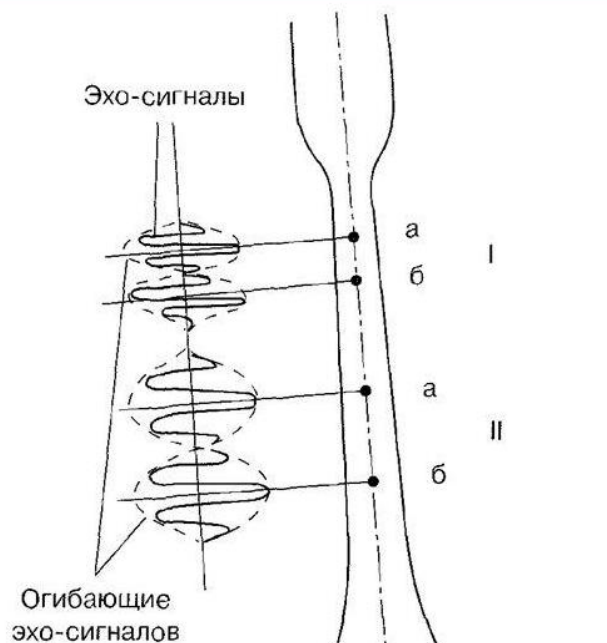
Поздовжня роздільна здатність Δr у напрямку розповсюдження хвилі визначає мінімально можливу відстань між двома точковими об'єктами, що знаходяться на одній прямій, при якій вони сприймаються окремо.

$$\Delta r = \frac{c_0 \tau}{2} \quad (2.6)$$

14

Поздовжня роздільна здатність

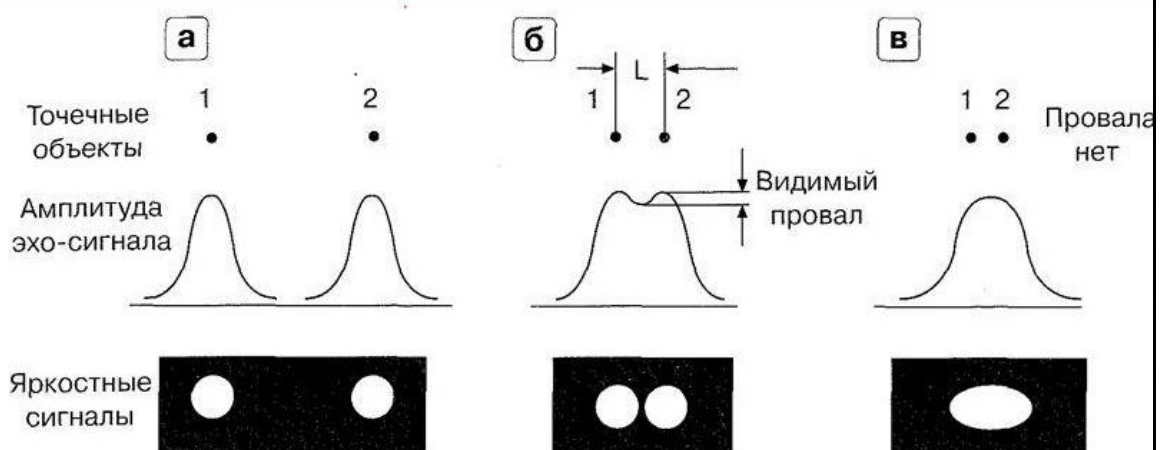
15



Продольная разрешающая способность увеличивается, если;

1. Зондирующий импульс с более высокой частотой.
2. Имеет короткий интервал во времени

Поздовжня роздільна здатність



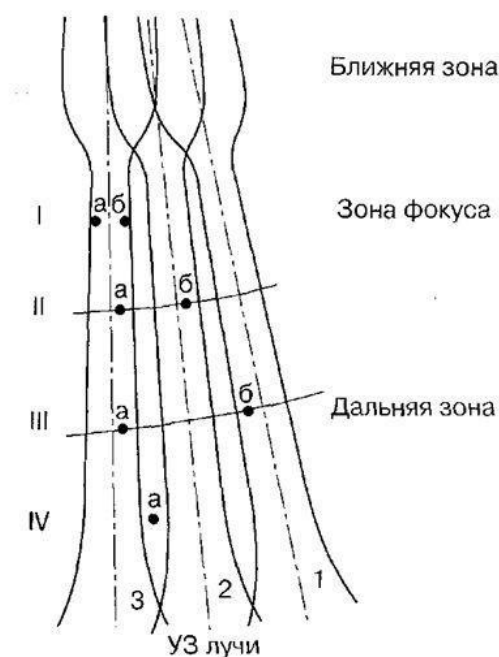
а – хорошее разрешение, б – предельное разрешение, в – разрешения нет

Поперечна роздільна здатність

Поперечна роздільна здатність Δz – це мінімально можлива відстань в поперечному напрямку між двома точковими об'єктами, що знаходяться на однаковій відстані, при якій вони сприймаються окремо.

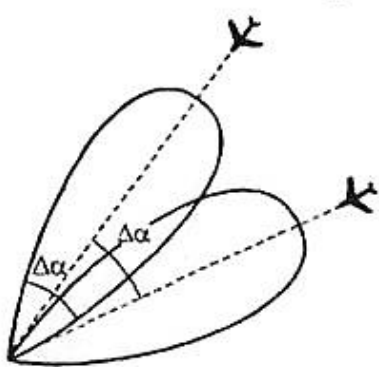
17

Поперечна роздільна здатність



Поперечная разрешающая способность увеличивается, если повысит плотность лучей

Кутова роздільна здатність



19

Кутовою роздільною здатністю (роздільною здатністю по куту) називається найменша різниця кутів $\Delta\theta$ між напрямками на два точкові об'єкти, що знаходяться на однаковій відстані, при якій вони сприймаються окремо.

Визначається кроком сканування та шириною діаграми спрямованості антени.

Похибка вимірювання

$$\sigma_r = \frac{c_0}{q \Delta f_{\text{ао}}} \quad (2.7)$$

Для імпульсів з обвідною прямокутної форми тривалістю τ ефективне значення смуги частот $\Delta f_{\text{ао}} = 1/\tau$

$$\sigma_r = \frac{c_0 \tau}{q} \quad (2.8)$$

Точність вимірювання залежить від ефективної ширини спектра частот сигналу і параметра виявлення q , квадрат якого характеризує енергетичне співвідношення сигнал-завада.

20

Переваги та недоліки імпульсного методу

Переваги:

- Простота методу
- Мала енергоємність методу
- Велика максимальна вимірювана відстань
- Можливість одночасного спостереження за декількома об'єктами

Недоліки:

- Низька точність

Акустичні прилади та системи -1

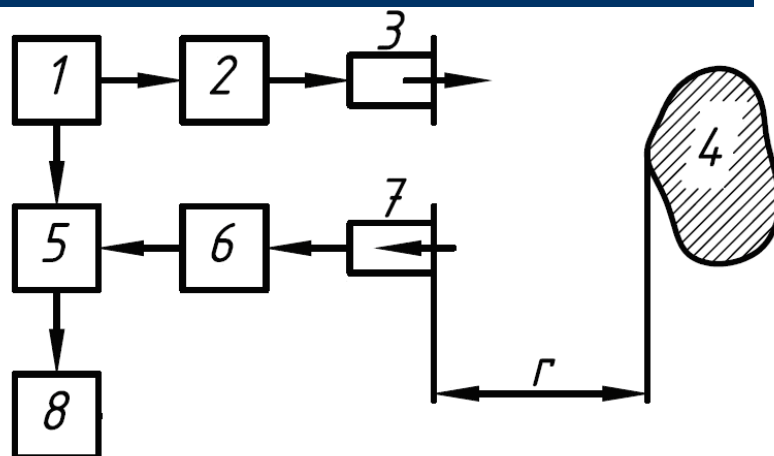
Розділ 1

Акустотехнічні методи отримання інформації

Лекція 3
Фазовий метод вимірювання відстані

1

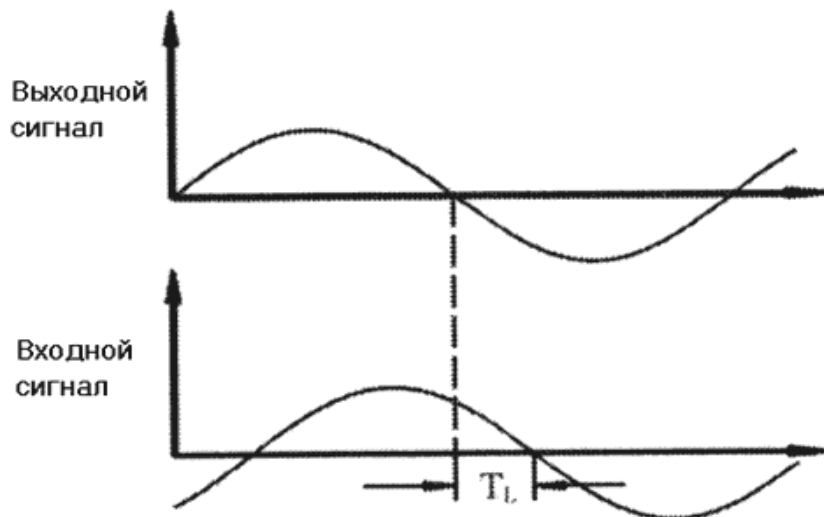
Схема фазового локатора



1 - генератор зонduючого сигналу; 2 - підсилювач; 3 - випромінювач;
4 - об'єкт локації; 5 - пристрій порівняння фаз;
6 - приймальний пристрій; 7 - приймач; 8 - індикатор.

2

Вихідний та вхідний сигнали



3

Визначення відстані до об'єкта

Миттєве значення фази коливань зондуєчого сигналу в деякий момент часу t :

$$\varphi_1 = 2\pi ft - \varphi_0, \quad (3.1)$$

де φ_0 - початкова фаза.

Миттєве значення фази коливань відбитого сигналу буде:

$$\varphi_2 = 2\pi f \left(t - \frac{2r}{c_0} \right) - \chi, \quad (3.2)$$

де $4\pi fr / c_0$ - запізнювання по фазі за рахунок проходження $2r$; χ - кут, що враховує зміну фази акустичної хвилі при відбитті від поверхні об'єкта.

4

Визначення відстані до об'єкта

Різниця фаз зонduючого та прийнятого сигналів:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 4\pi fr / c_0 + (\chi - \varphi_0) \quad (3.3)$$

Звідки знаходимо відстань до об'єкта:

$$r = \frac{\Delta\varphi - (\chi - \varphi_0)}{4\pi f} c_0 \quad (3.4)$$

- Складність полягає у вимірюванні величини $(\chi - \varphi_0)$

5

Метод двох частот

Різниця фаз визначається для кожної частоти окремо. А далі знаходиться різниця різниці фаз:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 4\pi\Delta f r / c_0 + 2\pi N, \quad (3.5)$$

де $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ – різниця фаз, яка розраховується за (3.3) при зондуванні сигналами з частотами f_1, f_2 відповідно; $\Delta f = f_1 - f_2$ – різниця частот; N – кількість повних періодів фази по 2π .

6

Метод двох частот

З формули (3.5) видно, що для визначення відстані необхідно переми-
кати частоти від значення f_1 до значення f_2 та визначати число N повних
періодів зміни різниці фаз на 2π .

Для усунення неоднозначності у визначенні дальності загальна вели-
чина зміни фазового зсуву хвиль не повинна перевищувати 360° .

Формула для визначення дальності в даному випадку приймає більш
простий вигляд:

$$r = \frac{\Delta\varphi}{4\pi\Delta f} c_0 \quad (3.6)$$

7

Максимальна вимірювана відстань

Максимальна вимірювана відстань $r_{\max}$ для одночастотного способу не
перевищує половини довжини хвилі. Цей висновок можна зробити з умови
усунення неоднозначності у визначенні дальності, коли загальна величина
зміни фазового зсуву хвиль не повинна перевищувати 2π :

$$0 \leq \Delta\varphi \leq 2\pi; \quad 0 \leq 4\pi fr / c_0 \leq 2\pi; \quad 0 \leq r \leq \lambda / 2$$

Тобто в загальному випадку максимальна вимірювана відстань

$$r_{\max} = \frac{\Delta\varphi_{\max} c_0}{4\pi f} = \frac{\Delta\varphi_{\max}}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.7)$$

8

Мінімальна вимірювана відстань, похибка вимірювання, роздільна здатність

Мінімальна відстань $r_{\min}$ та похибка вимірювання відстані σ_r , визначаються величиною мінімально вимірюваної різниці фаз $\Delta\varphi_{\min}$ (ці величини суттєво менші ніж у імпульсному методі вимірювання відстані).

$$r_{\min} = \frac{\Delta\varphi_{\min} c_0}{4\pi f} \quad \sigma_r = \frac{c_0 \Delta\varphi_{\min}}{2\pi qf} \quad (3.8)$$

Одночасне виявлення декількох об'єктів фазовим методом неможливе, тому поздовжня роздільна здатність не визначається.

9

Переваги та недоліки фазового методу

Переваги:

- можливість дистанційно вимірювати малі значення переміщень з високою точністю.

Недоліки:

- труднощі одночасного спостереження і вимірювання дальності до кількох об'єктів;
- мала вимірювана відстань;
- висока енергоємність методу (порівняно з імпульсним);

10

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 1

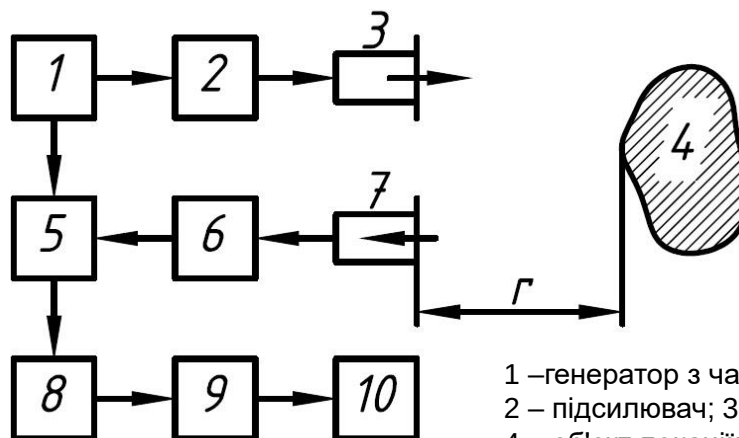
Акустотехнічні методи отримання інформації

Лекція 4

Частотний метод вимірювання відстані Порівняння методів вимірювання відстані

1

Схема частотного локатора

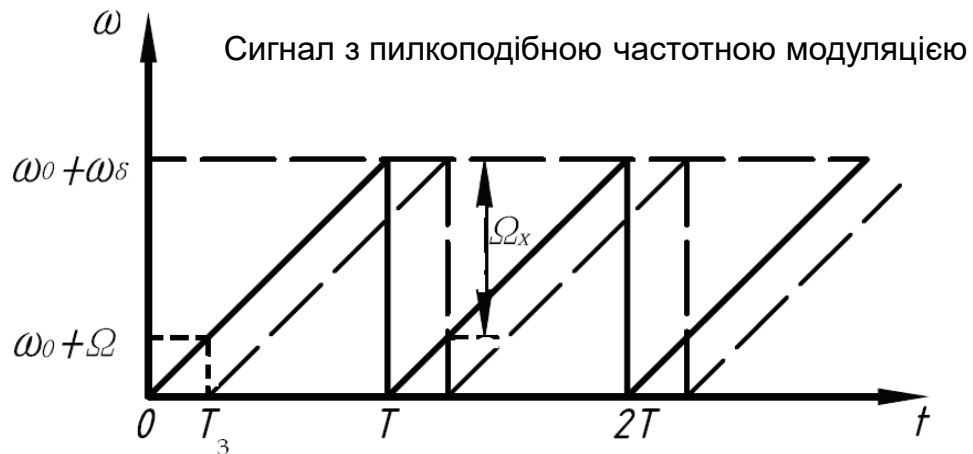


1 –генератор з частотною модуляцією;
2 – підсилювач; 3 – випромінювач;
4 – об'єкт локації; 5 – перемножувач;

6 - приймальний пристрій; 7 – приймач; 8 – фільтр низьких частот;
9 – частотомір; 10 – індикатор.

2

Зміна частоти у часі



Суцільна та штрихова лінії відображають характер зміни у часі частоти випромінених та прийнятих акустичних хвиль

3

Миттєва частота та повна фаза сигналу

Миттєва частота модульованого сигналу змінюється за законом:

$$\omega(t) = \omega_0 + \mu \cdot t \quad (4.1)$$

Тут ω_0 - початкова частота; $\mu = \omega_\delta / T$ - параметр частотної модуляції:

ω_δ - частота девіації; T - період модуляції, що дорівнює періоду локації.

Повна фаза сигналу за проміжок часу знаходиться з урахуванням (4.1):

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \int_0^t (\omega_0 + \mu \cdot t) dt = \omega_0 t + \mu \frac{t^2}{2}.$$

4

Зондуючий та відбитий сигнал

Запишемо вираз для зондуючого $u_1(t)$ та відбитого $u_2(t)$ від об'єкту сигналів на часовому проміжку, що дорівнює одному періоду локації $[0-T]$:

$$u_1(t) = U_{01} \sin(\omega_0 t + \mu \frac{t^2}{2}), \quad (4.2)$$

$$u_2(t) = U_{02} \sin \left[\omega_0 (t - T_3) + \frac{\mu}{2} (t - T_3)^2 \right] \quad (4.3)$$

де U_{01}, U_{02} – амплітуди зондуючого та прийнятого сигналів;

$T_3 = 2r / c_0$ – час затримки відбитого сигналу.

5

Зондуючий та відбитий сигнал перемножені

Перемножимо (4.2) та (4.3), поклавши рівність амплітуд: $U_{01} = U_{02} = U_0$

$$\begin{aligned} u &= u_1(t) \cdot u_2(t) = U_0^2 \left\{ \sin \left[\omega_0 t + \frac{\mu}{2} t^2 \right] \cdot \sin \left[\omega_0 (t - T_3) + \frac{\mu}{2} (t - T_3)^2 \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{2} U_0^2 \cos \left[\mu T_3 \cdot t + T_3 \left(\omega_0 - \frac{\mu}{2} T_3 \right) \right] - \\ &- \frac{1}{2} U_0^2 \cos \left[(2\omega_0 - \mu T_3) t + \mu t^2 - T_3 \left(\omega_0 - \frac{\mu}{2} T_3 \right) \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

В отриманому виразі (4.4) другий член являє собою модульоване по частоті коливання з подвоєною початковою частотою $2\omega_0$ і поглинається фільтром низьких частот.

6

Визначення відстані до об'єкту

Аргумент першого члену несе низькочастотну складову спектру сигналу, що безпосередньо вказує на відстань до об'єкту:

$$\Omega = 2\pi F = \mu T_3 = \frac{2\pi f_\delta}{T} \cdot \frac{2r}{c_0}$$

Частота Ω , через яку розраховується відстань, є частотою зсуву прийнятого сигналу відносно миттєвої частоти випромінювання:

$$r = \frac{FTc_0}{2f_\delta} \quad (4.5)$$

7

Визначення відстані до об'єкту

Як видно з рис.4.1а, крім інформаційної частоти зсуву Ω в спектрі сигналу має місце хибна частота зсуву Ω_x , як різниця між миттєвими значеннями частоти випромінювання і частоти відбитих в попередньому періоді локації коливань. Тому рекомендують час аналізу відбитого сигналу брати в 2 рази меншим ніж період локації. Тоді відстань розраховують по формулі:

$$r = \frac{FTc_0}{4f_\delta} \quad (4.6)$$

8

Максимальна вимірювана відстань

Визначається максимальною частотою зсуву, яка не перевищує

$$F_{\max} = 0.5 f_{\delta}.$$

Тобто в загальному випадку максимальна вимірювана відстань

$$r_{\max} = \frac{F_{\max} T c_0}{4 f_{\delta}}$$

9

Мінімальна вимірювана відстань, роздільна здатність, похибка вимірювання

Мінімальна відстань та поздовжня роздільна здатність, яку можна виміряти частотним методом, визначається роздільною здатністю частотоміра:

$$\Delta F = F_{\min}$$
$$r_{\min} = \frac{F_{\min} T c_0}{4 f_{\delta}}; \quad \Delta r = \frac{\Delta F T c_0}{4 f_{\delta}}$$

Похибка вимірювання відстані менша ніж у імпульсного методу:

$$\sigma_r = \frac{\Delta F c_0 T}{q f_{\delta}}$$

Одночасне виявлення декількох об'єктів частотним методом можливе, але виникають труднощі спостереження декількох об'єктів одночасно.

10

Переваги та недоліки частотного методу

Переваги:

- можливість вимірювання малих відстаней;
- висока роздільна здатність;
- висока точність вимірювання у порівнянні з імпульсним методом.

Недоліки:

- труднощі, що виникають при спостереженні багатьох об'єктів;
- висока енергоємність методу (порівняно з імпульсним).

11

Порівняння методів вимірювання

Характеристика	Імпульсний метод	Частотний метод	Фазовий метод
Максимальна відстань, $r_{\max}$	$\frac{c_0 T}{2}$	$\frac{F_{\max} T c_0}{4 f_{\delta}}$	$\frac{\Delta \varphi_{\max} c_0}{4 \pi f}$
Мінімальна відстань, $r_{\min}$	$\frac{c_0 \tau}{2}$	$\frac{F_{\min} T c_0}{4 f_{\delta}}$	$\frac{\Delta \varphi_{\min} c_0}{4 \pi f}$
Поздовжня роздільна здатність, Δr	$\frac{c_0 \tau}{2}$	$\frac{\Delta F T c_0}{4 f_{\delta}}$	—
Похибка вимірювань σ_r ($q \geq 1$)	$\frac{c_0}{q \Delta f_{\text{до}}}$	$\frac{\Delta F c_0 T}{q f_{\delta}}$	$\frac{c_0 \Delta \varphi_{\min}}{2 \pi q f}$

12

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 1

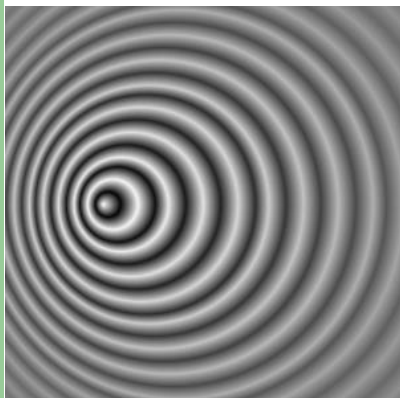
Акустотехнічні методи отримання інформації

Лекція 5

Допплерівський метод вимірювання швидкості рухомих об'єктів.

1

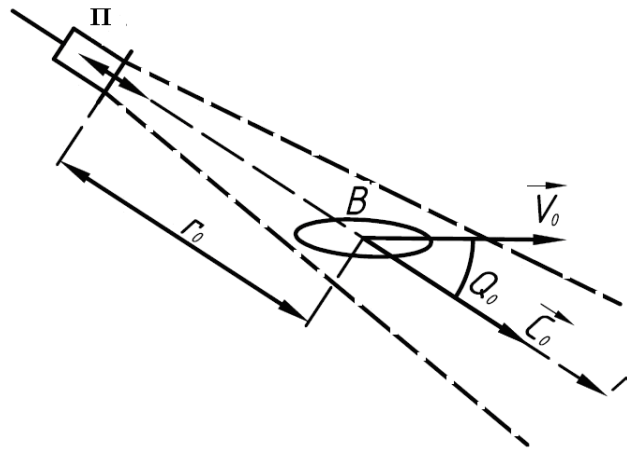
Допплерівський метод виявлення та вимірювання швидкості рухомих об'єктів



- Вперше пояснення ефекту дав австрійський інженер Допплер (J.C. Doppler, 1803-1853);
- При локації рухомого об'єкту **частота** прийнятого сигналу **відрізняється** від частоти випроміненого;
- **Наближення** об'єкта призводить до **зростання частоти**;
- **Віддалення** об'єкта - до **зниження частоти**.

2

Схематичне пояснення ефекту Допплера



На відстані r_0 від випромінювача акустичне поле контактує з об'єктом (B), який рухається з постійною швидкістю V_0 під кутом θ_0 .

3

Математичний запис випроміненого та прийнятого сигналів

Звуковий тиск p_1 в точці випромінювання ($r = 0$) змінюється по гармонічному закону з амплітудою p_0 та круговою частотою ω_0 :

$$p_1 = p_0 \exp(-j\omega_0 t)$$

Відбиті від об'єкта акустичні коливання p_2 , що поступають на вхід приймача, суміщеного з випромінювачем, запишуться у вигляді:

$$p_2 = K p_0 \exp(-j(\omega_0 t - 2k(r_0 \pm \Delta r))) = K p_0 \exp(-j\omega_0 T_3) \exp(-j(\omega_0 t \pm 2k\Delta r)),$$

де $k = \frac{\omega_0}{c}$ – хвильове число. Коефіцієнт K визначає ослаблення відбитої хвилі; T_3 – час затримки відбитої від об'єкту хвилі; Δr – зміщення об'єкту вздовж напрямку r :

$$\Delta r = V_0 \cos \theta_0 t.$$

4

Допплерівський зсув частоти

Проаналізуємо аргумент функції $\exp(-j(\omega_0 t \pm 2k\Delta r))$:

$$\omega_0 t \pm 2k\Delta r = (\omega_0 \pm \omega_0 \frac{2V_0}{c_0} \cos \theta_0) t = (\omega_0 \pm \omega_A) t$$

Допплерівський зсув частоти визначається формулою:

$$\omega_A = \omega_0 \frac{2V_0}{c_0} \cos \theta_0; \quad f_A = f_0 \frac{2V_0}{c_0} \cos \theta_0$$

Допплерівський зсув частоти пропорційний швидкості руху об'єкту.

Наближення – зростання частоти, віддалення – зниження частоти.

5

Залежність доплерівського зсуву від кута, під яким рухається об'єкт

Частота прийнятого сигналу залежить від кута локації, кута між акустичним променем і напрямком руху об'єкта.

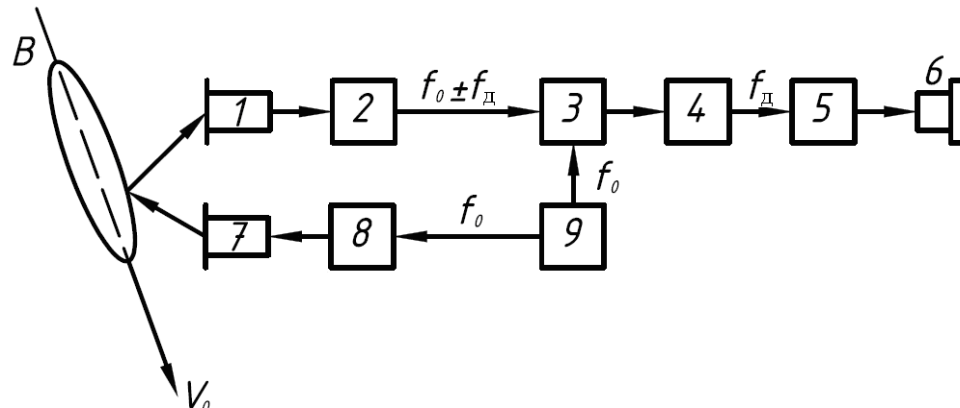
Якщо $\theta_0 = 90^\circ$, то доплерівський зсув частоти відсутній.

Знаючи доплерівську частоту можна розрахувати швидкість руху об'єкту V для кута $\theta \neq 90^\circ$:

$$V = \frac{f_A c_0}{2 f_0 \cos \theta}$$

6

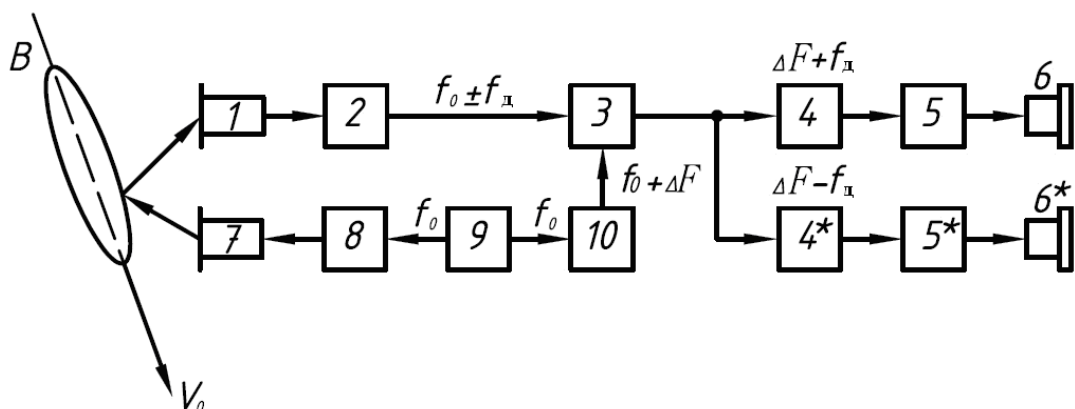
Схема пристрою виявлення рухомих об'єктів з трансформацією сигналів в область чутних для людини звукових частот



1 – приймач; 2 – підсилювач; 3 – перемножувач;
4 – фільтр нижніх частот; 5 – підсилювач;
6 – телефон; 7 – випромінювач; 8 – підсилювач; 9 – генератор.

7

Структурна схема доплерівського локатора з рознесенням частоти і визначенням напрямку руху об'єкта



10 – пристрій зсуву на величину ΔF , яка повинна бути більшою ніж можливе максимальне значення доплерівської частоти.

8

Метрологічні характеристики доплерівського локатора

Мінімальна $V_{\min}$ вимірювана швидкість (дорівнює 0);

Максимальна $V_{\max}$ вимірювана швидкість;

Роздільна здатність по швидкості ΔV ;

Похибка вимірювання σ_V . Похибка вимірювань залежить від співвідношення сигнал - завада, похибки вимірювання кута локації, характеру руху об'єкту та ін.

Оцінити похибку для кута локації близького до 0^0 можна через роздільну здатність вимірювання доплерівської частоти Δf_A :

$$\sigma_V = \Delta f_A c_0 / 2qf_A$$

9

Застосування ефекту Допплера

- Гідроакустичні системи та прилади спостереження та навігації;
- Системи дистанційного контролю та керування технологічними процесами;
- Геоакустичні та сейсмічні системи спостереження руху земної кори;
- Діагностика здоров'я людини.

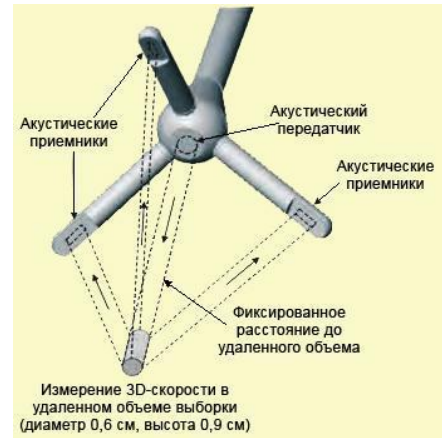
10

Застосування ефекту Допплера в гідроакустичних системах та приладах спостереження та навігації

11



Акустичний доплерівський вимірювач швидкості течії Argonaut-ADV



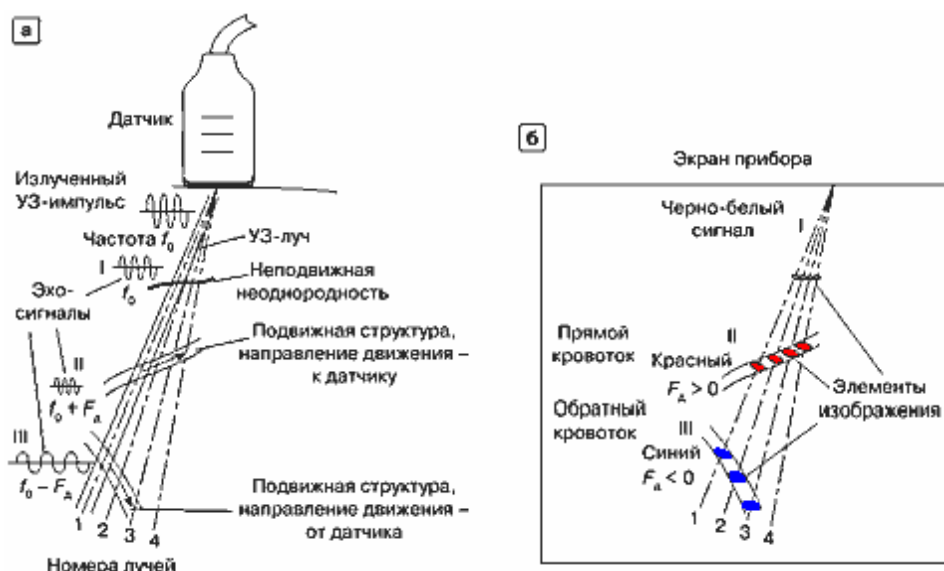
Застосування ефекту Допплера для діагностики здоров'я людини

12

- **Діагностика захворювань судин;**
- **Звуження, закупорювання судин;**
- **Вимірювання швидкості кровотоку;**
- **Регістрація напрямку кровотоку;**
- **Одночасна візуалізація судин та реєстрація кровотоку (дуплексний сканер);**
- **Контроль роботи серцевих клапанів;**
- **В акушерстві;**

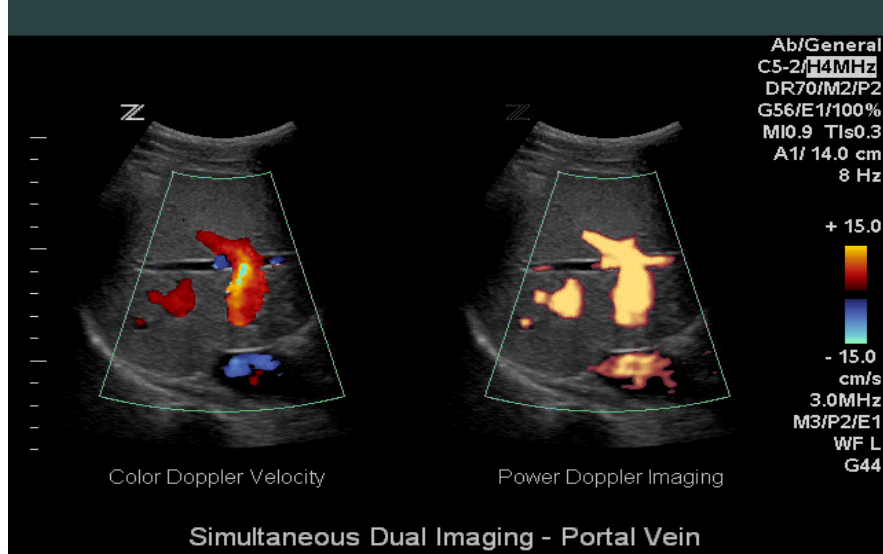
Застосування ефекту Допплера для діагностики здоров'я людини

13



Застосування ефекту Допплера для діагностики здоров'я людини

14



Акустичні прилади та системи -1

Розділ 1

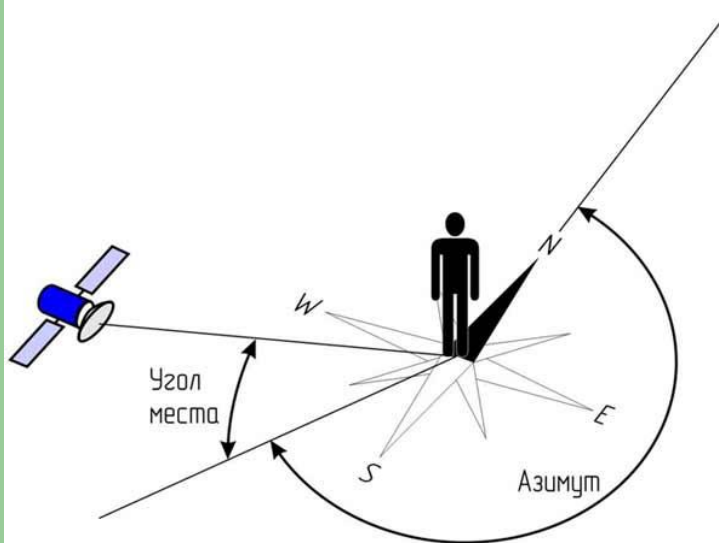
Акустотехнічні методи отримання інформації

Лекція 6

Акустотехнічні методи вимірювання кутових координат.

1

Акустотехнічні методи вимірювання кутових координат



Пеленгація — дія з визначення кутових координат об'єкта - азимута і кута місця.

Азимут — кут між напрямком на північ і напрямком на об'єкт.

Кут місця — кутова координата відхилення об'єкту від площини горизонту.

2

Методи пеленгування

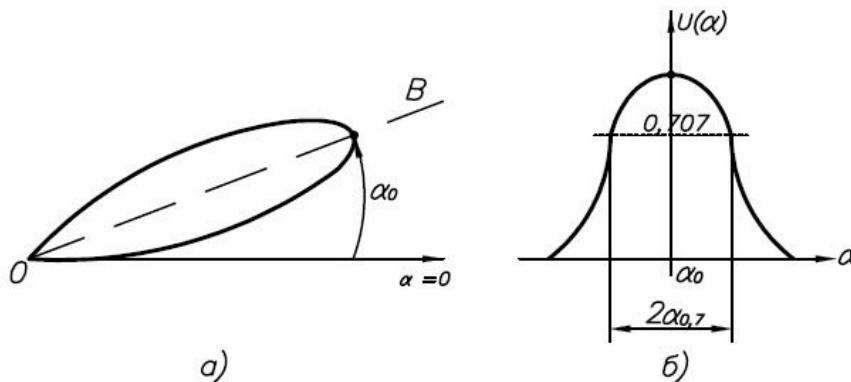
- Амплітудний;
- Рівносигнальний;
- Фазовий;
- Кореляційний методи.

Визначення кутових координат в АІС ведеться з використанням спрямованих властивостей приймальних антен.

3

Амплітудний метод, або метод максимуму прийнятого сигналу

Визначення напрямку на об'єкт проводиться поворотом діаграми спрямованості до моменту досягнення максимуму прийнятого сигналу



4

Діаграма спрямованості (а) та сигнальна функція (б) амплітудного методу.

Переваги та недоліки амплітудного методу

Основні переваги:

- простота визначення кутових координат;
- в момент точного пеленга має місце найбільше співвідношення сигналу до перешкод;

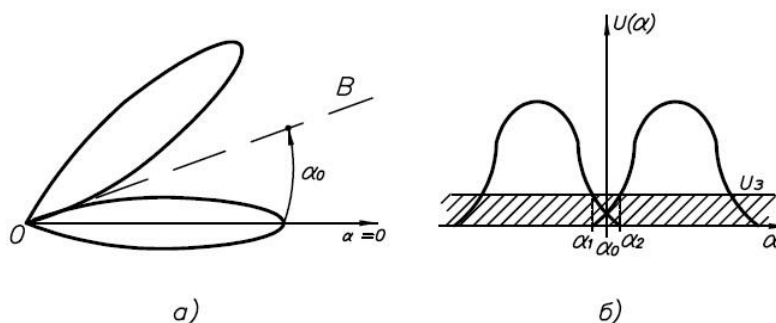
Основні недоліки:

- велика похибка вимірювання кута $(0.1 - 0.25)\alpha_{0.7}$;
- невизначеність відхилення об'єкта в ту чи іншу сторону від осі діаграми спрямованості (ускладнений супровід).

5

Метод мінімуму прийнятого сигналу

Визначення напрямку на об'єкт проводиться поворотом приймальної антени, діаграма спрямованості якої має дві пелюстки, до тих пір, поки вісь антени не відповідатиме напрямку на об'єкт.



6

Діаграма спрямованості (а) та сигнальна функція (б) методу мінімуму прийнятого сигналу.

Аналіз методу мінімуму прийнятого сигналу

Потенціальна точність методу мінімуму значно вище точності методу максимуму, так як невеликому відхиленню об'єкта від лінії нульового прийому відповідає різка зміна величини прийнятого сигналу.

Однак через наявність шумових перешкод U_3 сигнальна функція $U(\alpha)$ не досягає нуля, тому напрям на об'єкт може знаходитись в діапазоні кутів (α_1, α_2) , що не дозволяє зробити точний відлік кута α_0 .

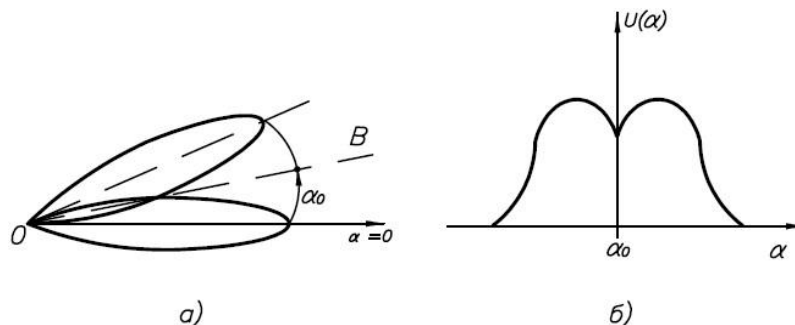
Суттєвим недоліком методу мінімуму є те, що момент суміщення лінії нульового прийому з об'єктом сигнали об'єкта зникають з екрану індикатора.

Така «втрата» об'єкта є неприпустимою, тому метод мінімуму в локації застосовується порівняно рідко.

7

Метод порівняння прийнятих сигналів

Використовуються дві діаграми спрямованості, пелюстки яких частково перекривають один одного. Порівнюючи амплітуди сигналів, що відповідають двом діаграмам спрямованості, можна визначити кутове положення об'єкта.



8

Діаграма спрямованості (а) та сигнальна функція (б) рівносигнального методу

Аналіз методу порівняння сигналів

Визначення пеленгу на об'єкт проводиться поворотом діаграми спрямованості приймальної антени в площині пеленгування таким чином, щоб сигнали прийняті по двом напрямкам були однієї величини.

В такому випадку сигнальна функція має прогин для якого і визначається кут α_0

Встановлено що **метод по точності краще** методу максимуму приблизно **в десять разів**.

Крім того, він дає повну визначеність у напрямку відхилення об'єкта від лінії рівних сигналів, що полегшує завдання супроводу об'єктів.

Рівносигнальний метод знайшов широке застосування в системах автоматичного супроводження рухомих об'єктів.

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 1

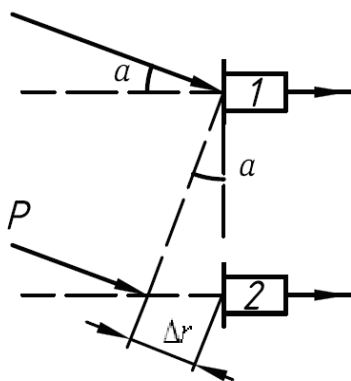
Акустотехнічні методи отримання інформації

Лекція 7

**Фазовий та кореляційний методи
вимірювання кутових координат.**

1

Фазовий метод вимірювання кутових координат



Ґрунтується на вимірюванні різниці фаз акустичних хвиль прийнятих двома ідентичними приймачами, рознесеними в просторі на відстань d .

Просторове запізнення дальнього приймача, по відношенню до ближнього, становить $\Delta r = d \sin \alpha$.

Фазовий зсув φ між електричними коливаннями на виході приймачів складає:

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha \quad (7.1)$$

2

Сигнали на вході приймачів

Миттєві значення напруги електричних коливань на виході приймачів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ запишемо з урахуванням фазового зсуву:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_m R(\alpha) \sin(\omega t); \\ u_2(t) &= U_m R(\alpha) \sin(\omega t - \varphi), \end{aligned} \quad (7.2)$$

де $R(\alpha)$ – діаграми спрямованості приймачів.

3

Сума та різниця прийнятих сигналів

З метою отримання фазової інформації просумуємо та віднімемо з першого рівняння системи (7.2) друге:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma} &= u_1(t) + u_2(t) = U_m R(\alpha) \sin(\omega t) + U_m R(\alpha) \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= 2U_m R(\alpha) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_D &= u_1(t) - u_2(t) = U_m R(\alpha) \sin(\omega t) - U_m R(\alpha) \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= 2U_m R(\alpha) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right); \end{aligned}$$

4

Знаходження пеленга на об'єкт

Якщо сумарний сигнал затримати на $\pi/2$, та поділити різницю сигналів на суму, то отримаємо співвідношення для розрахунку зсуву фаз:

$$u_{\Sigma}^* = 2U_m R(\alpha) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 2U_m R(\alpha) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right)$$

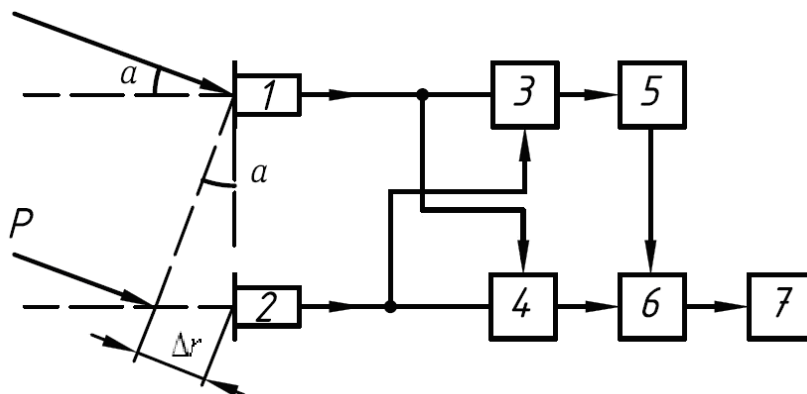
$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{u_D}{u_{\Sigma}^*}; \varphi = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{u_D}{u_{\Sigma}^*}\right) \quad (7.3)$$

Пеленг на об'єкт α знаходимо за (7.3) з урахуванням (7.1):

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{u_D}{u_{\Sigma}^*}\right)}{\pi \frac{d}{\lambda}} \right] \quad (7.4)$$

5

Структурна схема фазового методу вимірювання кутових координат



1, 2 – приймачі; 3 – пристрій суми; 4 – пристрій різниці; 5 – пристрій зсуву фази на 90° ; 6 – пристрій розрахунку фази зсуву; 7 – індикатор;

6

Кути огляду простору

При пеленгуванні можливе виникнення хибного пеленга.

Для зняття неоднозначності (7.1) треба щоб фазовий зсув не перевищував $|\varphi| \leq 180^\circ$.

Тому для пеленгування в секторі кутів $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ слід брати акустичну базу $d = \lambda / 2$.

Якщо акустична база $d \geq \lambda / 2$ то сектор пеленгування зменшується до значення $\alpha \leq |\arcsin(\lambda / 2d)|$.

7

Середня квадратична помилка фазового методу

Відношення сигнал / завада (символ q) на вході пеленгатора більше одиниці.

Для оцінки середньої квадратичної помилки відхилення пеленга можна скористатися виразом:

$$\sigma^2 = \frac{\lambda}{q} (\lambda / 2\pi d)^2 \quad (7.5)$$

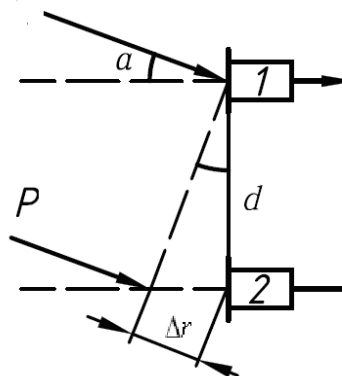
8

Особливості застосування фазового методу

- Великі значення сигнал/завада на практиці досягаються застосуванням значних за площею акустичних антен, безперервних або дискретних, розділених на дві частини в площині пеленгування.
- Такі антени еквівалентні двом точковим приймачам, розташованим в центрах обох половин, а завадостійкість зростає за рахунок загострення характеристики спрямованості половини антени.
- Абсолютна ідентичність амплітудних і частотних характеристик обох каналів (на практиці досягається з великими труднощами).
- Використовується в пристроях автоматичного супроводу об'єктів за кутовими координатами.

9

Кореляційний метод вимірювання кутових координат



Кореляційний метод пеленгування ґрунтується на **вимірюванні взаємної кореляційної функції** між акустичними сигналами двох приймачів рознесеними в просторі на відстань d

10

Математичний опис кореляційного методу вимірювання кутових координат

Часова затримка τ між електричними коливаннями на виході приймачів:

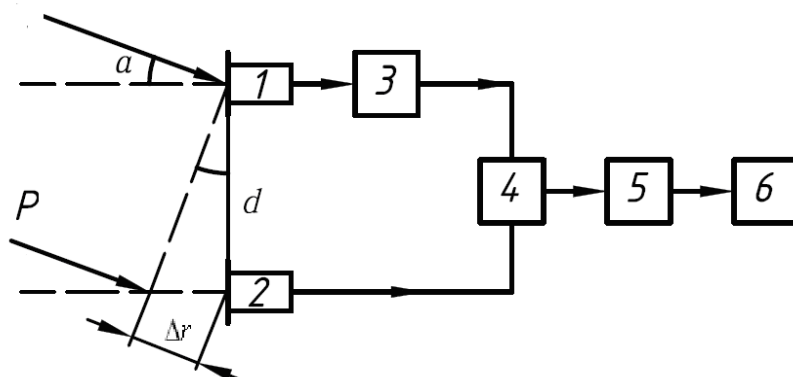
$$\tau = \frac{d}{c_0} \sin \alpha \quad (7.6)$$

Якщо сигнал і завада некорельовані, а відстань між приймачами така, що шуми завад на виході кожного приймача статистично незалежні, то взаємна кореляційна функція запишеться у вигляді:

$$C(\alpha) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t - \tau) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t - \frac{d}{c_0} \sin \alpha) dt \quad (7.7)$$

11

Схема кореляційного приймача, побудованого у відповідності до (6.8)



1, 2 – приймачі; 3 – блок затримки; 4 – перемножувач;
5 – інтегратор; 6 – індикатор.

12

Визначення кутових координат кореляційним методом

Змінюючи час затримки в блоці (3) досягають максимального значення амплітуди вихідного сигналу – значення кореляційної функції, що контролюється індикатором (6). Знаючи час затримки розраховують кутову координату:

$$\alpha = \arcsin \frac{\tau c_0}{d} \quad (7.8)$$

13

Відношення сигналу до завади на вході корелятора

Припускаємо:

- відстань до джерела сигналу велика в порівнянні з відстанню між приймачами;

- характеристики приймачів ідентичні і вони не спрямовані ($R(\alpha) = 1$),

Відношення сигналу до завади на виході $q_{вих}$ через співвідношення на вході $q_{вх}$ корелятора:

$$q_{вих} = q_{вх} \Delta f T, \quad (7.9)$$

де $\Delta f, T$ – смуга частот сигналу та час спостереження відповідно.

Як видно з (6.10), при заданому відношенні сигнал/завада на вході перевищення сигналу над перешкодою на виході кореляційного пеленгатора прямо пропорційно добутку ширини смуги частот Δf на час інтегрування T .

Якби можна було реалізувати дуже великі часи інтегрування, то на фоні як завгодно великої завади можна було б виявити як завгодно малий сигнал.

14

Спрямованість кореляційного пеленгатора

Із збільшенням відстані між приймачами і розширенням смуги частот спрямована дія при прийомі присутня лише в невеликій частині діапазону кутів пеленгування, тобто антена такого пеленгатора має достатньо гостру характеристику спрямованості.

Якщо пеленгується вузькосмугове джерело шуму, пристрій втрачає здатність спрямованого прийому, так як в цьому випадку кореляційна функція є функцією косинуса з численними максимумами

15

Пеленгування джерела гармонічного сигналу

Миттєві значення напруги електричних коливань на виході приймачів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ запишемо з урахуванням часової затримки:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_m R(\alpha) \sin(\omega t); \\ u_2(t) &= U_m R(\alpha) \sin(\omega(t - \tau)) \end{aligned} \quad (7.10)$$

Реакція $C(\tau)$ на виході кореляційного пеленгатора має вигляд:

$$\begin{aligned} C(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t - \tau) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m R(\alpha) \sin(\omega t) U_m R(\alpha) \sin(\omega(t - \tau)) dt = \\ &= \frac{1}{2} U_m^2 R^2(\alpha) \cos(\omega \tau) \end{aligned} \quad (7.11)$$

Закон зміни сигналу на виході пеленгатора описується функцією $\cos(\omega \tau)$, яка періодична і досягає однакового максимального значення багато разів коли перетворювачі всенаправлені.

16

Знаковий корелятор

Робота знакового корелятора ґрунтується на порівнянні знаків електричних напруг у двох або більше каналах.

З теорії ймовірності відомо, що за наявності кореляційних зв'язків між акустичними сигналами у двох просторових каналах ймовірність збігу знаків P_{++}, P_{--} визначається виразом:

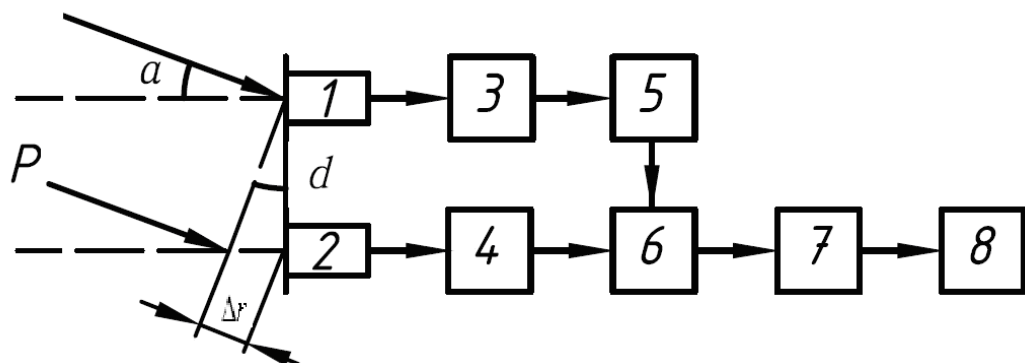
$$P_{++} = P_{--} = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin C(\tau) \right) \quad (7.12)$$

Значення кореляційної функції $C(\tau)$ для некорельованих процесів дорівнює 0, а для взаємно пов'язаних досягає 1.

Тому для сигналів, які прийняті від об'єкту спостереження ймовірність збігу знаків збільшується на величину $\frac{2}{\pi} \arcsin C(\tau)$.

17

Структурна схема знакового корелятора



1, 2 – приймачі; 3, 4 – підсилювачі; 5 – блок затримки;
6 – схема співпадіння; 7 – інтегратор; 8 – індикатор.

18

Робота знакового корелятора

Змінюючи час затримки τ в блоці (5) досягають максимального значення вихідного сигналу – значення ймовірності збігу знаків, що контролюється індикатором (8). Пеленг на джерело сигналу визначається за $\alpha = \arcsin \frac{\tau c_0}{d}$ (7.8).

Для того щоб пеленгувати тональне джерело сигналу з довжиною хвилі λ без хибного (неоднозначного) пеленгу в секторі $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ треба виконати умову отримання одного максимального значення функції $C(\tau) = \frac{1}{2} U_m^2 R^2(\alpha) \cos(\omega \tau)$ (7.11).

Ця умова досягається вибором акустичної бази $d \leq 0.25\lambda$, коли затримка τ не перевищує чверті періоду кореляційної функції.

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2 **Акустичні методи неруйнівного контролю**

Лекція 8

- Історія розвитку дефектоскопії.**
- Класифікація акустичних методів контролю матеріалів і виробів.**

1

Види неруйнівного контролю

- **Акустичний контроль**
- **Вихрострумний контроль**
- **Радіохвильовий контроль**
- **Радіаційний контроль**
- **Електричний контроль**
- **Тепловий контроль**
- **Оптичний контроль**
- **Газорозрядна візуалізація**
- **Органолептичний контроль**
- **Візуальний контроль**
- **Електрогазодинамічний контроль**
- **Магнітний контроль**
- **Контроль проникаючими речовинами**

2

Історія розвитку дефектоскопії

- 1929 р. – С.Я. Соколов першим запропонував тіньовий метод з безперервними звуковими хвилями для виявлення дефектів;
- 1931 р. Мюльхойзер в отримав перший патент на прилад для ультразвукового контролю тіньовим методом.
- Дослідження на лабораторних пристроях проводили: Крузе, Мейер і Бок, Гьотц і Д. Шрайбер.
- 1937 р. С.Я. Соколов запропонував електронне зчитування розподілу звукового тиску з представленням зображення на екрані (камера Соколова).

3

Історія розвитку дефектоскопії (продовження)

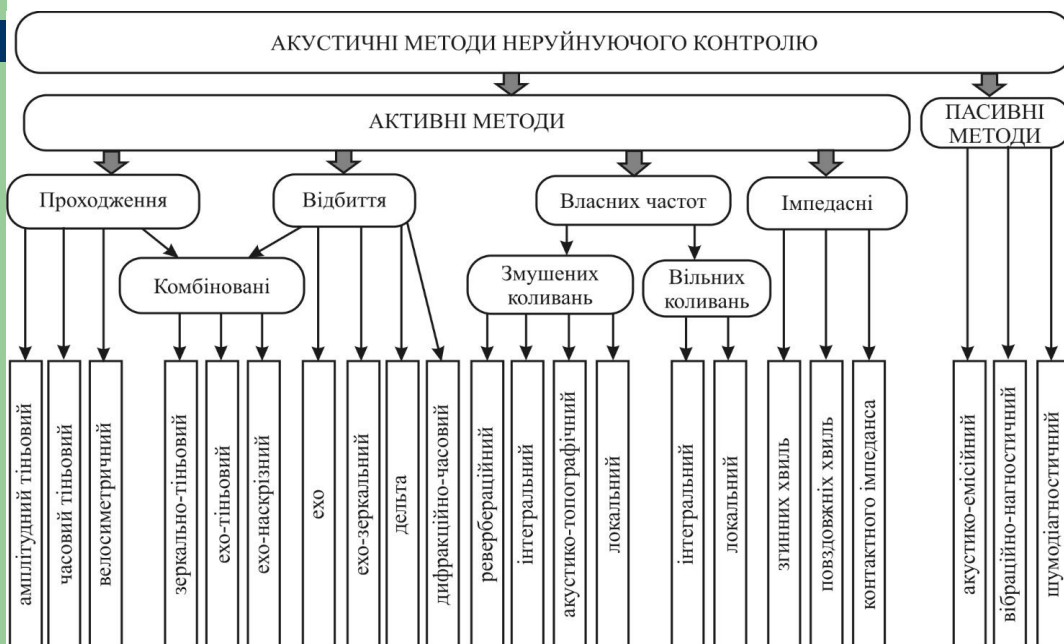
- 1940 р. І. Файерстон першим запропонував використовувати імпульсний метод для ультразвукового контролю матеріалів. (має вищу чутливість порівняно з тіньовим).
- 1968 р. Д. Сомер застосував метод електронного відхилення променя за допомогою секціонованих випромінювачів (phased array), керованих по фазі і часу проходження (візуалізація).
- 1974 р. Грінліф провів перші роботи з ультразвукової томографії.

4

Класифікація акустичних методів контролю



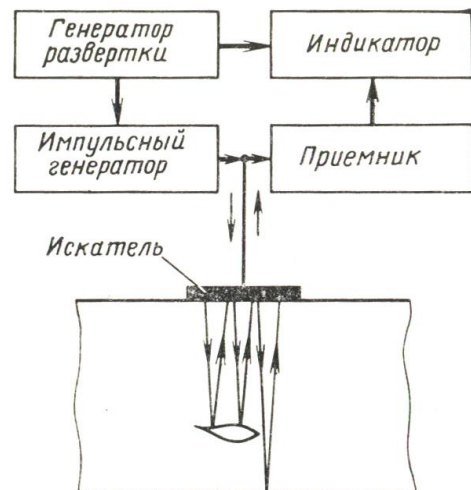
Класифікація акустичних методів контролю*



Ехо-імпульсний метод

Суть методу:

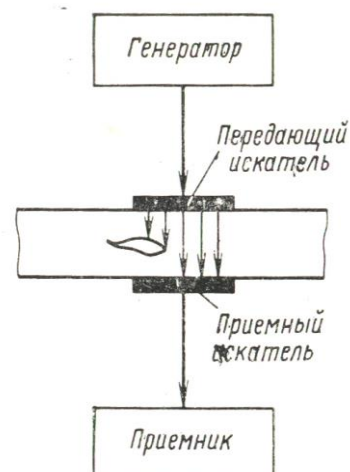
Шукач генерує короткий ультразвуковий імпульс, який відбивається від дефектів, поверхні виробу і інших неоднорідностей, а потім приймається тим же або іншим шукачем. Часова розгортка дозволяє фіксувати час приходу сигналів і розрізняти сигнали, що приходять від дефектів і від «дна» виробу.



Тіньовий метод (або метод навкрізного прозвучування)

Суть методу:

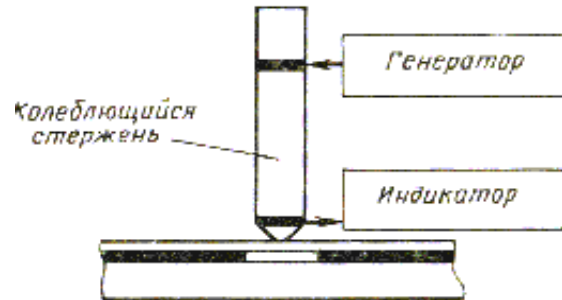
Випромінювач і приймач розміщуються по різних сторонах виробу. Дефект, якщо він з'явиться на шляху ультразвукових хвиль, викликає ослаблення сигналу або запізнення часу його приходу.



Імпедансний метод

Суть методу:

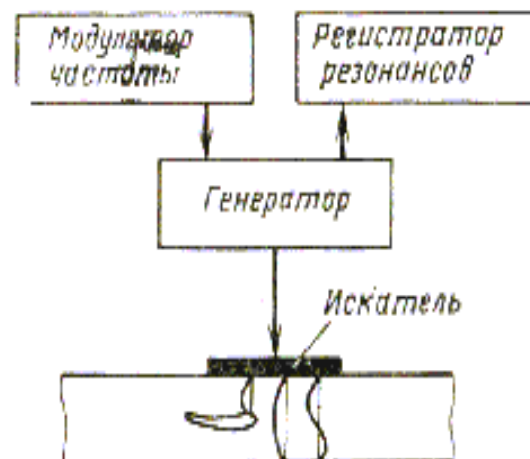
Спостереження за режимом коливань стержня, що опирається на поверхню виробу. Наявність дефекту, близького до поверхні виробу, послаблює акустичний імпеданс даної ділянки поверхні. Це призводить до збільшення амплітуди коливань стержня, зменшення напруження на його кінці і зміщення частоти резонансних коливань.



Резонансний метод

Суть методу.

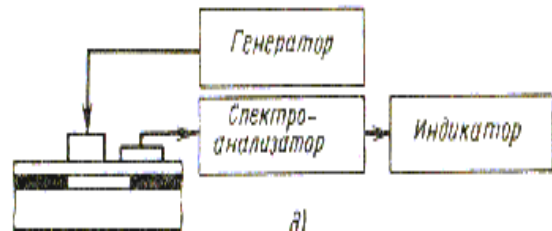
При контролі визначаються резонансні частоти коливань по товщині в досліджуваній ділянці виробу. На наявність дефекту вказує зменшення амплітуди або зникнення резонансів.



Метод вільних коливань

Суть методу:

Аналіз спектру частот виробів, що коливаються на власній частоті. Контроль проводиться по виділенню і кількісному аналізу найбільш характерних частот спектра.



Метод акустичної емісії

Суть методу:

Реєстрація пружних хвиль, що виникають в момент утворення або розвитку тріщин. Випромінювачем є сам дефект, що утворюється. Навіть невеликі зміни структури матеріалу є джерелом емісії хвиль. Ознакою небезпечного стану конструкції є збільшення частоти надходження або амплітуди сигналів в певному діапазоні частот.

Шумо-вібраційний метод

Суть методу.

Спостереження спектра частот працюючого механізму в цілому або окремих його компонентів. Датчик притискається до окремих точок механізму або приймає сигнали по повітрю. Для контролю застосовують не тільки ультразвукові, але і звукові хвилі.

Ультразвуковий дефектоскоп

Ультразвуковий дефектоскоп USM 35X (GE IT Krautkramer)

Технические характеристики:

- Частотный диапазон: 0,2 - 1 МГц; 0,5 - 4 МГц; 0,8 - 8 МГц; 2 - 20 МГц;
- Диапазон калибровки по расстоянию: мин. 0 - 0,5 мм +10%; 0 - 9999 мм +10% (для диапазона 0,2 - 1 МГц и 0,5 - 4 МГц); 0 - 1400 мм +10% (для диапазона 0,8 - 8 МГц и 2 - 20 МГц)
- Скорость звука: 1000 - 15000 м/с, регулируется с шагом 1 м/с
- Регулировка усиления: 0 - 110 дБ ступенями 0,5/1/2/6/12 дБ, плавная регулировка.
- АСД: 2 независимых стробирующих импульса
- Оценка параметров эхо-сигналов: измерение пути и разницы в расстояниях, глубины залегания и расстояния до проекции дефекта на поверхность;
- Дисплей: цветной ЖК ТФТ дисплей, 116 мм x 87 мм, размер изображения сигналов 116 мм x 80 мм (320x320 пикс.)
- Выходные сигналы: RS 232, двухсторонний; синхронизация, срабатывание АСД, напряжение, пропорциональное амплитуде сигнала и расстоянию по лучу.
- Время работы от батарей: 14 часов от литиевых батарей (6,6 А/ч);
- Размеры: 100 мм x 255 мм x 177 мм (В x Ш x Г)
- Масса: 2,2 кг с аккумуляторами



Ультразвуковой дефектоскоп

Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70

Технические характеристики:

- Значения номинальных частот ультразвуковых колебаний (УЗК) дефектоскопа 1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0 МГц
- Номинальные частоты повторения импульсов возбуждения 30; 60; 120; 250; 500; 1000 Гц
- Амплитуда зондирующего импульса генератора дефектоскопа при длительности (75±5) нс, не менее 185 В
- Диапазон изменения коэффициента усиления приемного тракта дефектоскопа от 0 до 100 дБ
- Динамический диапазон сигналов, наблюдаемых на экране дефектоскопа не менее 20 дБ
- Диапазон контроля наличия дефектов по стали от 2 до 5000 мм
- Диапазон измерений глубины залегания дефектов по стали от 2,0 до 5000 мм
- Диапазон установки скорости распространения УЗК с дискретностью 10 м/с от 1000 до 8000 м/с
- Диапазон установки угла ввода УЗК ПЭП составляет с дискретностью 1° от 0 до 90°
- Количество стробов АСД 2
- Масса дефектоскопа с аккумуляторной батареей не более 3 кг
- Габаритные размеры дефектоскопа не более 245х145х75 мм
- Размер рабочей части экрана дефектоскопа не менее 114х86 мм
- Максимальная мощность, потребляемая дефектоскопом от сети переменного тока не более 20 В·А
- Время непрерывной работы дефектоскопа от полностью заряженной аккумуляторной батареи не менее 7 часов



Ультразвуковой толщиномер

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕР 35 PANAMETRICS-NDT™ (США)

Технические характеристики:

- Диапазон измеряемых толщин - 0.08 - 635.0 мм
- Диапазон измеряемых скоростей - 0.5080 - 18.699 мм
- Разрешающая способность индикации - 0.001 мм
- Частотный диапазон 2.25-30 МГц
- Использование контактных, с линией задержки и иммерсионных ПЭП
- Связь с компьютером через USB или RS-232
- Запоминание минимума/максимума
- Пороговая сигнализация
- Опция отображения А-скана на дисплее прибора
- Время непрерывной работы - 150 ч
- Температурный диапазон -10 °C - +50 °C
- Вес - 0.24 кг
- Размер 84х152х38 мм



Ультразвуковой толщиномер

Ультразвуковой толщиномер ТУЗ-1

Технические характеристики:

- Диапазон измерения (по стали), мм 0,6...300
- Разрешающая способность измерения толщины, мм 0,1
- Рабочая частота преобразователей, МГц 2,5...10
- Диапазон измеряемых скоростей распространения УЗК, м/с 4000...6500.
- Измерение отклонения от заданного размера есть
- Сканирование есть
- Сигнализация недопустимого утонения объекта контроля есть
- Калибровка «ноля» датчика ручная
- Встроенная память результатов измерения есть (2400 измерений)
- Выход на ПЭВМ им возможность оформления протокола измерений есть
- Время непрерывной работы от полностью заряженных аккумуляторов, не менее, часов 25
- Диапазон рабочих температур -10...+45 °C
- Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254IP53
- Габаритные размеры электронного блока, мм 164 × 84 × 30
- Масса электронного блока, не более, кг 0,4



Контактно-резонансный твердомер

КОНТАКТНО-РЕЗОНАНСНЫЙ ТВЕРДОМЕР ТКР-35

Предназначен для оперативного измерения твердости конструкционных и углеродистых сталей в цеховых и лабораторных условиях

Технические характеристики:

- Диапазоны измерений твердости по шкалам :
Роквелла, HRC 20 - 68
Бринелля, HB 95 - 460
Виккерса, HV 95 - 950
- Погрешность показаний прибора:
По Роквеллу 3 HRC
По Бринеллю 3 - 5 %
По Виккерсу 5 %
- Шероховатость поверхности не более, Ra 2,5
- Потребляемый ток, мА не более 10
- Время до автоматического выключения, мин 3
- Минимальная масса изделий, кг 1
- Минимальная толщина изделия в точке измерения, мм 4
- Количество измерений для усреднения 3 -20
- Габаритные размеры, мм 145x82x32
- Рабочий диапазон температур, ° C от 0 до + 40
- Питание батарея 6F22 (КРОНА)
- Масса электронного блока с батареей, не более, кг 0,35



Імпедансний дефектоскоп

Імпедансний дефектоскоп "ДАМИ-С"

Предназначен для обнаружения дефектов типа расслоений, непрочностей, нарушений целостности композитных материалов, клеевых конструкций и сотовых структур, а также для выявления коррозии в неферромагнитных материалах.

Особенностью дефектоскопа является возможность визуализации дефекта относительно координат контролируемого объекта за счет применения акустического сканера местоположения.

Технические характеристики:

- Диапазон рабочих частот - 1 .. 40кГц
- Производительность контроля в точечном режиме - не менее 100 измерений/с
- Производительность контроля в пороговом и поверхностном режиме - не менее 50 измерений/с
- Диапазон амплитуд измеряемых сигналов - 10В .. 0.01мВ
- Погрешность определения положения искателя - ± 1.5 мм
- Максимальный размер С-изображения - 360х360мм



Ультразвуковий вимірювач міцності бетону

Ультразвуковой тестер УК1401М

Предназначен для определения прочности и целостности бетона. Оценка производится путем корреляции (построения зависимости) скорости распространения ультразвуковых волн в материале с его физико-механическими свойствами и физическим состоянием

Технические характеристики:

- Диапазон измерений скорости ультразвука 1500 - 9999 м/с
- Диапазон измерений глубины трещин 10-50 мм
- Относительная погрешность измерения времени и скорости ультразвука $\pm 1\%$
- Рабочая частота ультразвуковых колебаний 50 кГц
- Частота посылок зондирующих импульсов 5-20 Гц
- Диапазон рабочих температур от -20°C до +50°C
- Время непрерывной работы 100 ч
- Габаритные размеры корпуса 200 x 120 x 35 мм
- Длина ультразвуковых преобразователей 45 мм
- Масса электронного блока 350 г
- Количество запоминаемых результатов 4000



Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2

Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 9

Фізичні основи поширення акустичних хвиль у твердих тілах (ч.1)

1

Особливості застосування акустичного неруйнівного контролю

- Для неруйнівного контролю застосовують акустичні коливання широкого частотного діапазону від 100 Гц до 50 МГц.
- Інтенсивність акустичних хвиль не велика і складає 0,01-1 Вт/см².
- Мала енергетика дозволяє описувати механічні коливання лінійними рівняннями теорії пружності, що передбачає існування лінійного зв'язку між швидкостями поширення хвиль і пружними характеристиками середовища.

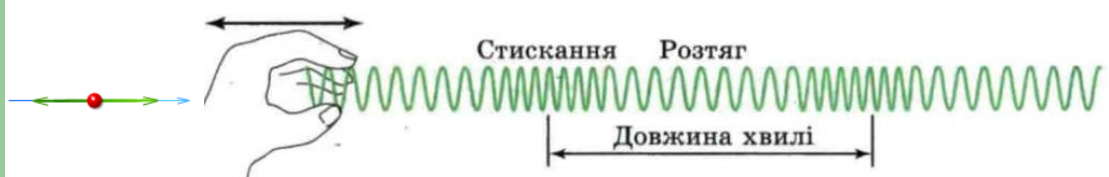
2

1. Пружні хвилі в твердих тілах

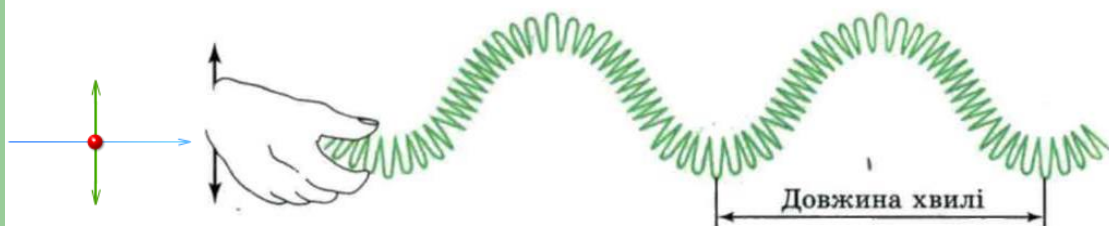
- Газоподібні та рідкі середовища характеризуються *пружністю об'єму* – середовище прагне повернути свій первинний об'єм.
- Тверде тіло повертає не тільки свій первинний об'єм, але і вихідну форму. Ця властивість, притаманна тільки твердому тілу, називається *пружністю зсуву*.
- Швидкість звуку для різних типів хвиль можна розрахувати за пружними постійним матеріалу – за модулем пружності E , густиною ρ та коефіцієнтом Пуассона ν .

3

Поздовжні та поперечні хвилі



а) виникнення поздовжньої хвилі



б) виникнення поперечної хвилі

4

Швидкість поздовжних та поперечних хвиль

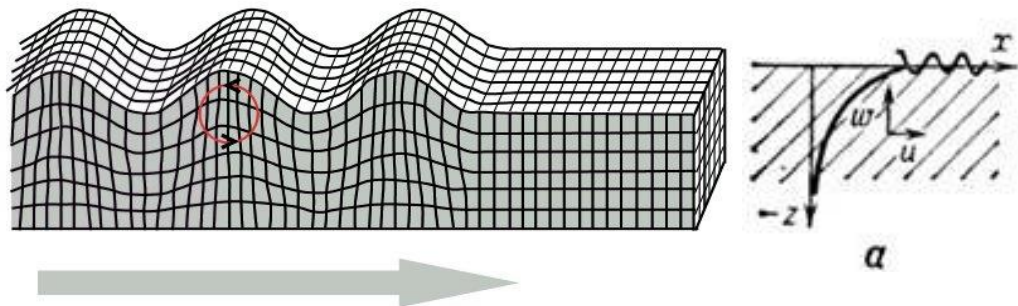
$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

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

5

Поверхнева хвиля Релея

Rayleigh Wave



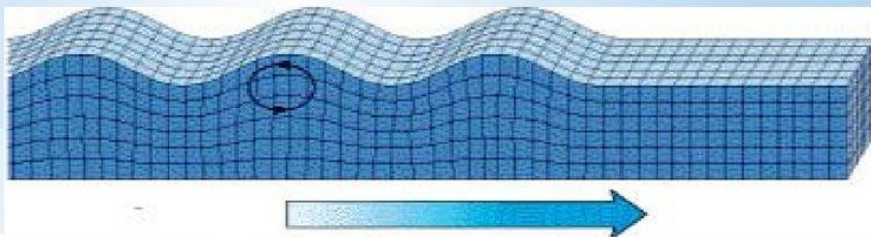
- Поширюються уздовж вільної поверхні зі швидкістю $c_R \approx 0,93c_t$.
- Вони є лінійною комбінацією поздовжньої і поперечної хвиль.
- Вони швидко згасають на глибині співвимірній з довжиною хвилі.
- Поверхневі хвилі використовують для виявлення дефектів на поверхні тіл.

6

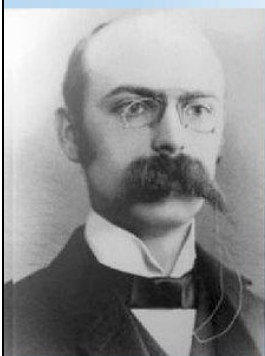


John Strutt, 3rd Baron Rayleigh (1842-1919)

Поверхностные сейсмические волны Релея (1885 г.) и Лява (1911 г.)

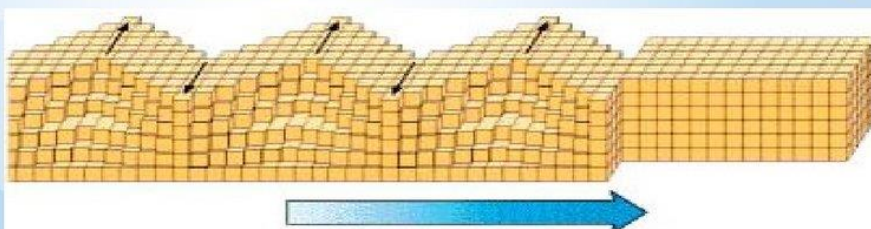


В релеевской волне частицы грунта смещаются в вертикальной плоскости, ориентированной вдоль направления распространения волн, а траектории их движения представляют собой эллипсы.

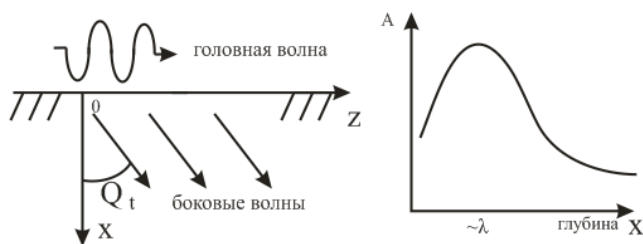


Augustus Edward Hough Love (1863-1926)

В волне Лява частицы движутся в горизонтальной плоскости поперек направления распространения волны.

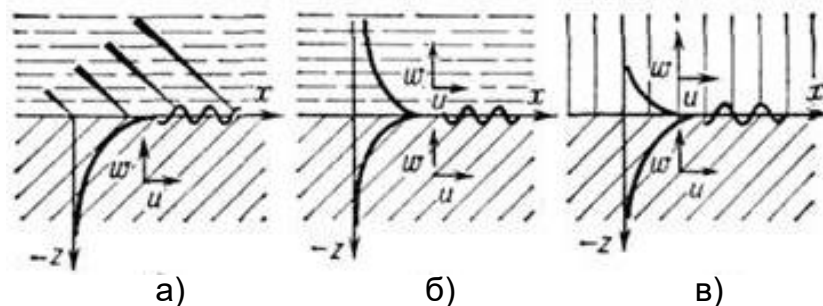


Головна хвиля



- Це позовжня хвиля уздовж поверхні.
- Виникає при падінні на границю твердого тіла під кутом, рівним або трохи більшим першого критичного.
- При поширенні головні хвилі трансформуються в поперечні хвилі.
- Головні хвилі майже не чутливі до поверхневих дефектів, але добре виявляють дефекти на глибині декількох довжин хвиль.
- Застосовуються для контролю зварних швів, пошуку тріщин будівельних матеріалів.

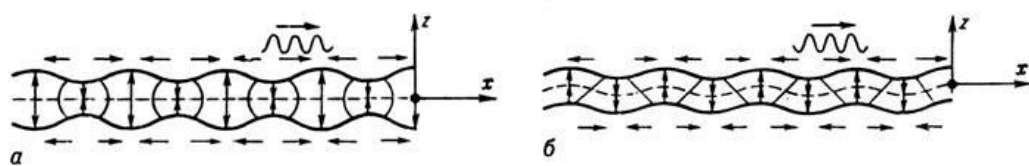
Хвилі на межі розподілу середовищ



- а) - затухаюча хвиля типу релеєвської на межі тверде тіло - рідина (похилі лінії в рідкому середовищі зображують хвильові фронти хвилі, що відходить);
 б) - незатухаюча поверхнева хвиля на межі тверде тіло - рідина;
 в) - хвиля Стоунлі на межі розділу двох твердих середовищ.

9

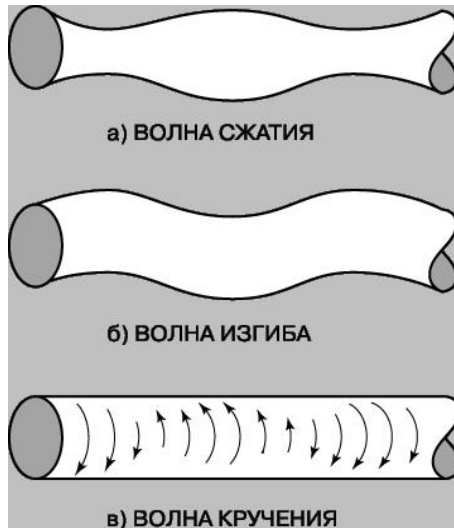
Хвилі в пластинах (хвилі Лемба)



- В тонких пластинах виникають *симетричні* C_{ps} (а) і *антисиметричні* C_{pa} (б) *хвилі Лемба*. Їх загальна назва – нормальні хвилі.
- Хвилі поширюються уздовж пластинки, а коливання частинок - в поперечному напрямку.
- Швидкість поширення залежить від частоти коливань і товщини пластинки.
- Використовують для контролю листового прокату, труб, оболонок.

10

Хвилі в стрижнях



- Хвилі в стрижні – нормальні хвилі.
- Розрізняють:
 - *поздовжні хвилі*, що поширюються уздовж осі стрижня зі зміною поперечного розміру;
 - поздовжні хвилі в *радіальному* напрямку;
 - *хвилі згину*;
 - *крутильні хвилі*;
- Швидкість поздовжньої хвилі

$$c_{ct} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

11

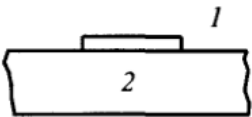
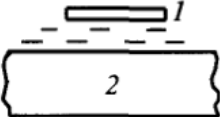
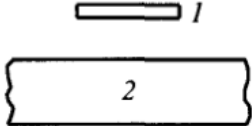
Хвилі в твердих тілах

Среда	Тип, название волны	Характеристика колебаний	Скорость	Способ возбуждения	Основное применение
Безграничное твердое тело	Продольная	В направлении распространения	c_l	Прямым или наклонным ПЭП с $\beta < \beta'$	Все виды контроля
	Поперечная	Перпендикулярно к направлению распространения	$c_t = c_l \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \approx 0,55c_l$	Наклонным ПЭП с $\beta, < \beta < \beta''$	Дефектоскопия сварных соединений
Поверхность тела	Поверхностная (Рэлея)	Эллиптические у поверхности	$c_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} c_l \approx 0,93c_l \approx 0,51c_l$	Наклонным ПЭП с $\beta > \beta''$	Контроль на поверхности
	Головная	То же; порождает поперечную	c_l	Наклонным ПЭП с $\beta = \beta'$	Контроль под поверхностью
Пластина толщиной h	Нормальная в пластине (Лэмба)	Изгиб со сдвигом	$c_{ps0} \rightarrow 0$ при $h/\lambda \rightarrow 0$	Наклонным ПЭП	Контроль листов, труб, оболочек толщиной до 3 ... 5 мм
		Продольные с изменением поперечных размеров	$c_{ps0} = \frac{\sqrt{1-2\nu}}{1-\nu} \approx 0,9c_l$ при $h/\lambda \ll 1$		
Стержень диаметром d	Нормальная стержневая	Изгиб со сдвигом	$c_{bs0} \rightarrow 0$ при $d/\lambda \rightarrow 0$	Прямым или наклонным ПЭП	Контроль проволоки, стержней, труб, рельсов
		Продольные с изменением поперечных размеров	$c_{bs0} = c_l \sqrt{\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}} \approx 0,86c_l$ при $d/\lambda \ll 1$		

Примечание. β' , β'' – первый и второй критические углы (см. разд. 1.1.4).

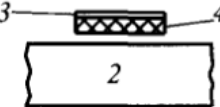
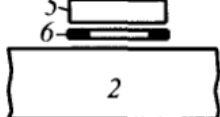
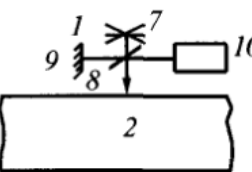
12

2. Генерація акустичних хвиль в твердому тілі

Название	Схема	Чувствительность преобразования		
		излучения	приема	двойного
Контактный пьезоэлектрический		1	1	1
Иммерсионный пьезоэлектрический		0,3	0,3	0,1
Воздушно-акустический		$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8}$

13

Генерація акустичних хвиль в твердому тілі (продовження)

Электростатический		$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$
ЭМА		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Оптический (лазерный)		1	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

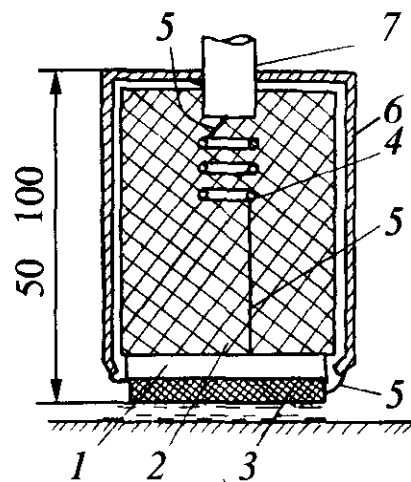
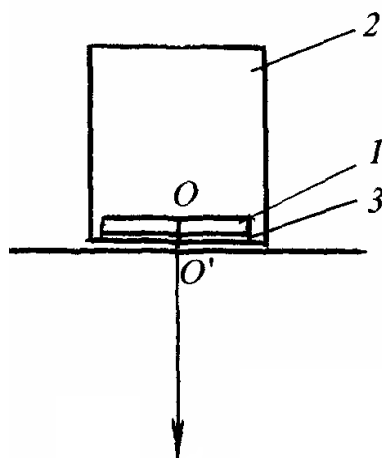
14

Генерація акустичних хвиль в твердому тілі

- Поздовжні хвилі збуджуються за допомогою «прямого» перетворювача встановленого нормально до поверхні.
- Поперечні хвилі генерують за допомогою похилого перетворювача.
- Поверхневу хвилю збуджують перетворювачем, встановленим на похилу гребінчасту призму. Крок між гребенями має дорівнювати або кратний довжині хвилі.
- Головну хвилю збуджують похилими перетворювачами з кутом вводу, що дорівнює першому критичному.
- Для генерації хвиль Лемба використовують похилий перетворювач із змінним кутом вводу

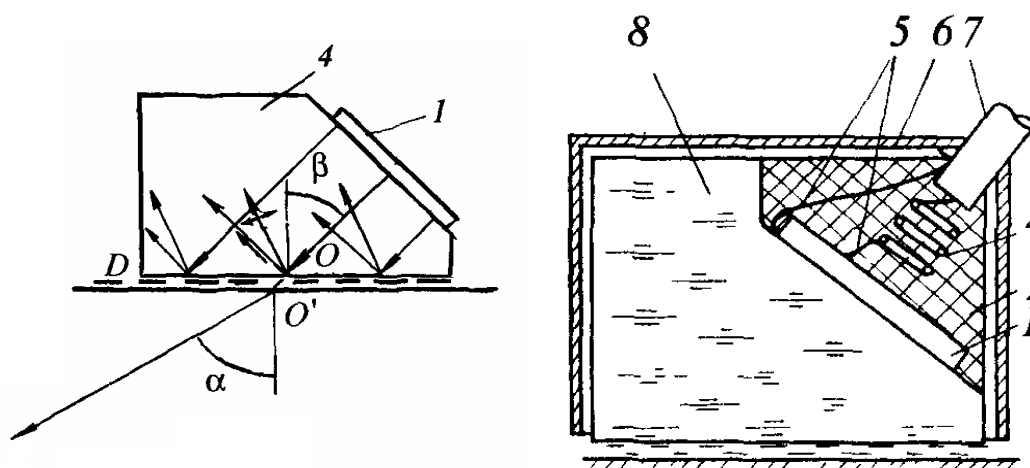
15

Прямий перетворювач



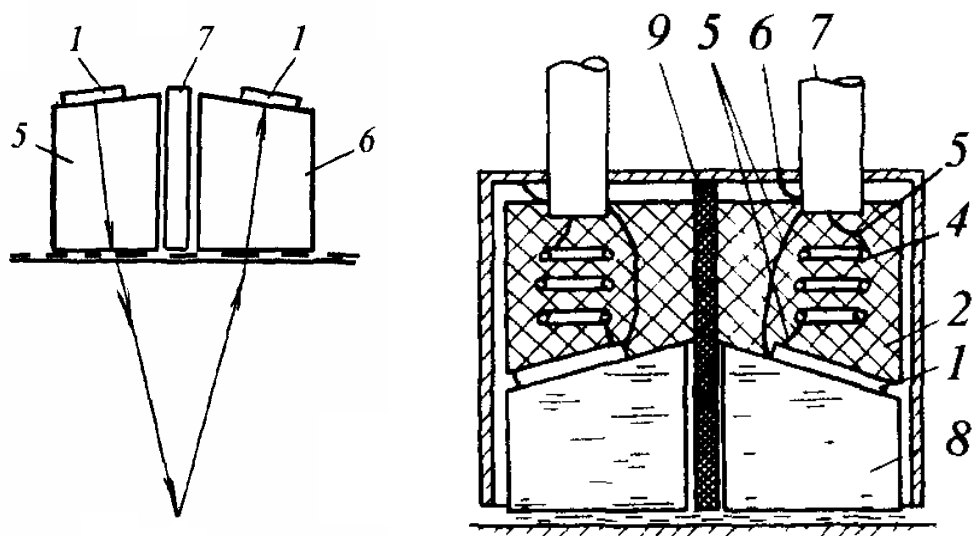
16

Похилий перетворювач



17

Роздільно-суміщений перетворювач



18

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2

Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 10

Фізичні основи поширення акустичних хвиль у твердих тілах (ч.2)

1

1. Акустичні властивості твердого тіла

- Акустичний імпеданс
- Швидкість звуку
- Коефіцієнт затухання

2

Акустичний імпеданс

- *Питомий акустичний опір $z = p/v$, p і v – тиск і коливальна швидкість на фронті хвилі (на поверхні зразка матеріалу). У загальному випадку це комплексна величина, яка залежить від фазового зсуву між p і v .*
- *Питомий акустичний опір безмежного середовища визначається як $z = \rho c$, (ρ та c – відповідно густина і швидкість звуку в матеріалі).*
- *В режимі плоскої хвилі, p і v знаходяться у фазі і питомий акустичний опір дорівнює хвильовому опору, тобто $z = \rho c$.*

3

Швидкість звуку

- *Визначається пружністю та густиною середовища.*
- *Швидкість звуку для різних типів хвиль можна розрахувати за пружними постійним матеріалу:*
 - *за модулем пружності E ,*
 - *густиною ρ*
 - *коефіцієнтом Пуассона ν .*

4

Ослаблення звуку

При проходженні через будь-яке середовище буде спостерігатися зменшення амплітуди та інтенсивності ультразвукового сигналу.

Основними причинами ослаблення є:

- *затухання* (поглинання, розсіювання);
- *дифракційне розходження хвильового фронту*.

5

Затухання звуку

Затухання обумовлене поглинанням (*absorption*) та розсіюванням (*scattering*):

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s ,$$

$$[\alpha] = \frac{\partial B}{m} = 8,7 \frac{Hn}{m}$$

За рахунок затухання звуковий тиск p хвилі зменшується за експоненціальним законом: $p = p_0 e^{-\alpha r}$,

p_0 – початкова амплітуда тиску, r – відстань.

6

Поглинання звуку

Поглинання звуку (absorption) α_a зумовлене:

- в'язкістю;
- теплопровідністю;
- тепловими коливаннями кристалічних решіток.

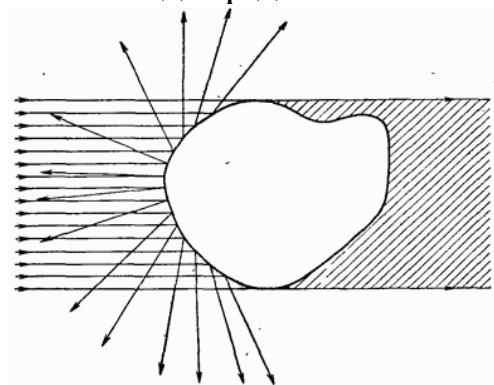
При поглинанні звукова енергія переходить в інші види, в першу чергу в теплову. У газах і рідинах затухання, в основному, визначається поглинанням.

7

Розсіювання звуку

Розсіювання звуку (scattering) α_s пов'язане з процесами заломлення, відбиття хвиль на межах кристалів, зерен або включень в неоднорідних матеріалах, а також огинанням хвилями цих внутрішніх неоднорідностей

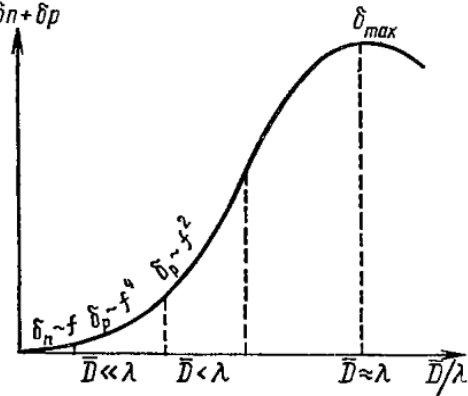
У твердих тілах роль розсіювання часто є визначальною.



8

Коефіцієнт розсіювання звуку в твердих тілах

- Коефіцієнт розсіювання $\delta = \delta_n + \delta_r$ залежить від співвідношення середнього розміру неоднорідностей з довжиною хвилі ультразвуку. (В металах на розсіювання впливає D – середній розмір зерна).



9

Загальне затухання звуку в твердих тілах

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s = Af + BD^3 f^4$$

де A, B - постійні, а f - частота коливань.

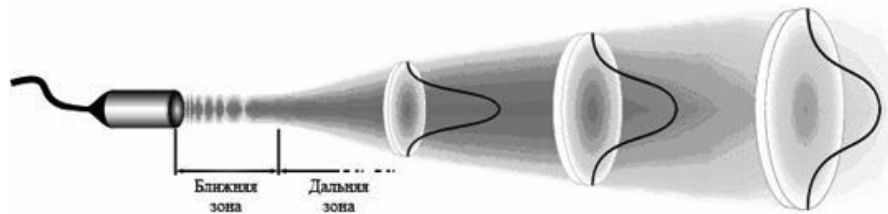
Член Af обумовлений *поглинанням*, він має переважаюче значення при малих частотах.

Член $BD^3 f^4$, обумовлений *розсіюванням*, робиться помітним, коли розмір зерна матеріалу менше довжини хвилі ультразвуку. В області $4 \leq \lambda/D \leq 10$ коефіцієнт α_s пропорційний Df^2 . У разнометалі показник ступеня при f змінюється від 2 до 4. Максимальне затухання спостерігається при $\lambda \approx D$.

10

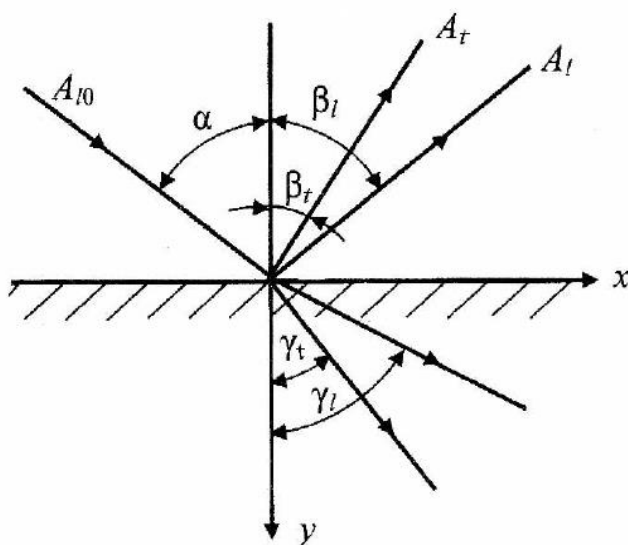
Ослаблення за рахунок дифракційного розходження

- Залежить від фронту хвилі.
- Для **плоскої хвилі** дифракційне ослаблення відсутнє, оскільки фронт хвилі поширюється не розширюючись. Інтенсивність хвилі не змінюється.
- Інтенсивність у фронті **сферичної хвилі** зменшується пропорційно квадрату радіуса хвилі, а тиск пропорційно відстані.



11

2. Відбиття, заломлення та трансформація акустичних хвиль



При падінні пружної хвилі на границю розділу двох середовищ відбуваються наступні явища:

- відбиття;
- заломлення;
- трансформація.

12

Закон Снеліуса (синусів)

$$\frac{\sin \alpha}{c_{1l}} = \frac{\sin \beta_l}{c_{1l}} = \frac{\sin \beta_t}{c_{1t}} = \frac{\sin \gamma_l}{c_{2l}} = \frac{\sin \gamma_t}{c_{2t}}$$

13

Критичні кути

Критичні кути – це кути падіння, при яких заломлені хвилі вироджуються в неоднорідні, тобто їх енергія концентрується уздовж поверхні границі розподілу і швидко загасає з глибиною.

Перший критичний кут α^1 – кут падіння поздовжньої хвилі на границю розділу середовищ, при якому заломлена поздовжня хвиля трансформується в неоднорідну (існує за умови $c_{1l} \leq c_{2l}$):

$$\alpha^1 = \arcsin\left(\frac{c_{1l}}{c_{2l}}\right)$$

Другий критичний кут α^2 існує за умови $c_{1l} \leq c_{2t}$:

$$\alpha^2 = \arcsin\left(\frac{c_{1l}}{c_{2t}}\right)$$

Третій критичний кут α^3 визначає перетворення в неоднорідну поперечної падаючої хвилі.

14

Коефіцієнти відбиття та проходження акустичних хвиль у випадку нормального падіння на границю

Коефіцієнти відбиття та проходження за тиском:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}; \quad D = \frac{2z_2}{z_2 + z_1}; \quad D - R = 1;$$

Коефіцієнти відбиття та проходження за інтенсивністю:

$$R_I = R^2 = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2; \quad D_I = \frac{4z_1 z_2}{(z_2 + z_1)^2}; \quad R_I + D_I = 1;$$

15

Коефіцієнти відбиття та проходження у випадку похилого падіння на границю *тверде тіло – тверде тіло* поздовжньої хвилі

$$R_{1l} = 1 - \frac{\cos^2 2\alpha_{1t}}{N \sin^4 \alpha_{1t}} \operatorname{tg} \alpha_{1l};$$

$$R_{tl} = - (2 \cos 2\alpha_{1t} / N \sin 2\alpha_{1t});$$

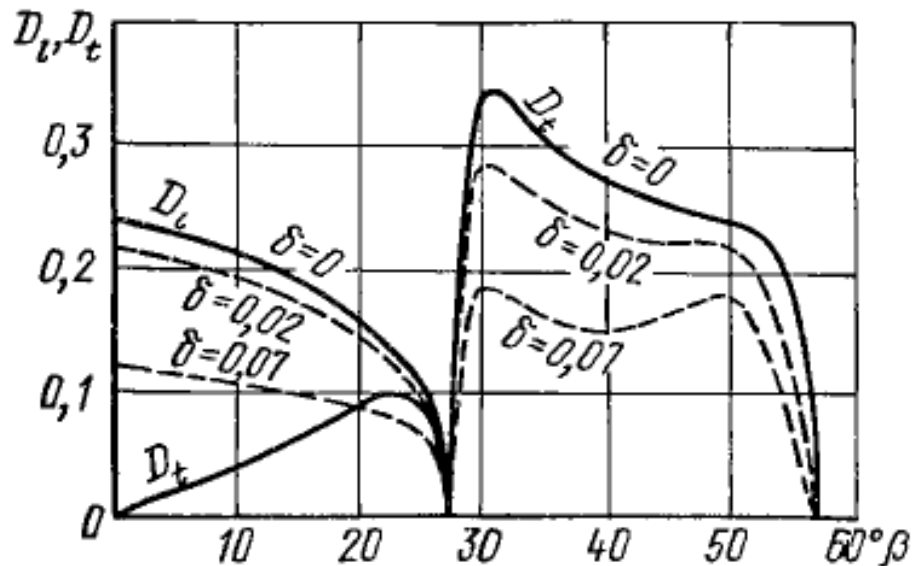
$$D_{ll} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\cos 2\alpha_{1t} \cos 2\alpha_{2t}}{N \sin^4 \alpha_{1t}};$$

$$D_{tl} = \frac{2\rho_2 c_{2t}^2}{\rho_1 c_{1t}^2} \cdot \frac{\cos 2\alpha_{1t}}{N \sin^2 \alpha_{1t}}.$$

16

$$N = 2 \operatorname{ctg} \alpha_{1t} + \frac{\cos^2 2\alpha_{1t}}{2 \sin^4 \alpha_{1t}} \operatorname{tg} \alpha_{1l} + \frac{2\rho_2 c_{2t}^4}{\rho_1 c_{1t}^4} \operatorname{ctg} \alpha_{2t} + \frac{\rho_2 \cos^2 2\alpha_{2t}}{2\rho_1 \sin^4 \alpha_{1t}} \operatorname{tg} \alpha_{2l}.$$

Залежність коефіцієнтів проходження від кута падіння для границі оргскло-сталь, розділених шаром масла товщиною δ .



17

Можливі варіанти існування акустичних хвиль в залежності від кута падіння (підсумок)

- У разі **нормального падіння** відсутнє заломлення променів. Трансформації хвиль немає, в другому середовищі є лише поздовжня хвиля.
- При куті падіння, меншому за перший критичний, у другому середовищі є дві заломлені хвилі, поздовжня і поперечна.
- При нормальному падінні і при малих $\alpha < 10^\circ$ коефіцієнт проходження поперечних хвиль дорівнює або близький до нуля. Тому перетворювачі малих кутах падіння використовують поздовжні хвилі
- У разі падіння під першим критичним кутом в другому середовищі утворюється головна хвиля.
- При куті падіння між першим та другим критичним кутом, в другому середовищі існує тільки поперечна хвиля.
- При куті падіння більшому за другий критичний, об'ємних хвиль у другому середовищі немає, а вздовж границі розділу біжить поверхнева хвиля.

18

Проходження акустичних хвиль через пластини і зазори

Хвиля падає під прямим кутом із середовища 1 на пластинку товщиною d та проходить в середовище 2.

$$D = 1 / (1 + 4(m - 1/m)^2 \sin^2 2\pi d / \lambda)^{1/2}$$

$$R = \sqrt{\frac{1/4(m - 1/m)^2 \sin^2 2\pi d / \lambda}{1 + 1/4(m - 1/m)^2 \sin^2 2\pi d / \lambda}}$$

де $m = z_1/z_2$; λ – довжина хвилі в пластинці.

19

Проходження акустичних хвиль через пластини і зазори

Мінімальне значення R і максимальне значення D будуть мати місце для: $d / \lambda = 1/2; 2/2; 3/2; \dots$

Максимальне значення R і мінімальне значення D будуть мати місце для: $d / \lambda = 1/4; 3/4; \dots$

Дані ефекти проходження та відбиття справедливі для монохроматичних УЗК.

У разі імпульсного характеру УЗК слід розглядати процес відбиття і проходження для спектральних компонент сигналу.

20

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2 **Акустичні методи неруйнівного контролю**

Лекція 11

Акустичне поле перетворювача

Ближня зона, дальня зона

Поле плоского круглого випромінювача

Поле похилого перетворювача

1

Акустичне поле перетворювача

Акустичним полем називають область простору, пружні коливання в точках якого визначаються положенням щодо об'єкта, що породжує це поле.

Стосовно до перетворювача розрізняють: поле випромінювання, поле прийому, поле випромінювання-прийому.

Зазвичай поле випромінювання та поле прийому ідентичні.

Поле випромінювання-прийому – визначається сигналом приймального перетворювача, що виникає при відбитті випромінювання цього ж перетворювача від точкового відбивача, що розміщений в деякій точці простору і рівномірно розсіює падаючі хвилі в усіх напрямках.

2

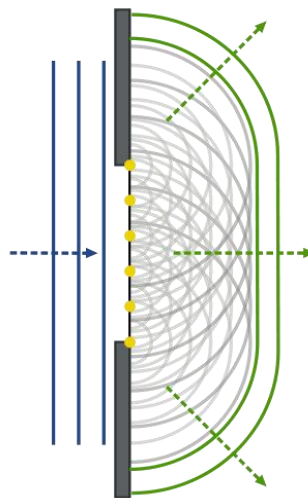
Параметри акустичного поля залежать від:

- розмірів перетворювача;
- конструкції перетворювача;
- типу перетворювача;
- робочої частоти;
- тривалості імпульсу;
- властивостей пружного середовища, в якому створюється поле.

3

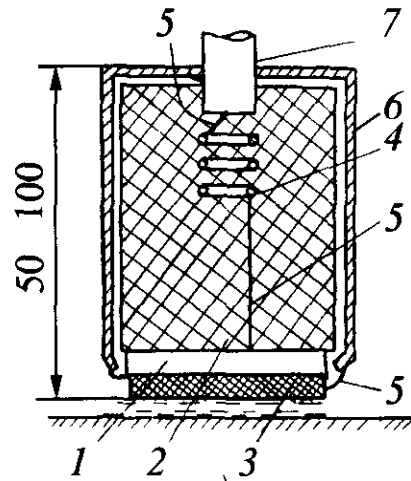
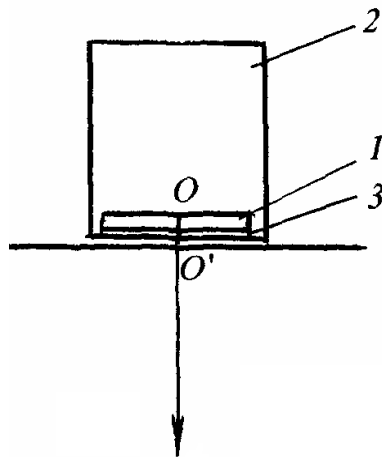
Розрахунок акустичного поля перетворювача

- Принцип Гюйгенса-Френеля – фізичний принцип, згідно з яким будь-яка точка простору, якої досягла хвиля, є джерелом вторинних хвиль, що розповсюджуються у всіх напрямках.
- Акустичне поле перетворювача розраховують вважаючи, що перетворювач складається з великої кількості елементарних випромінювачів-приймачів. Потім їх дію сумують.



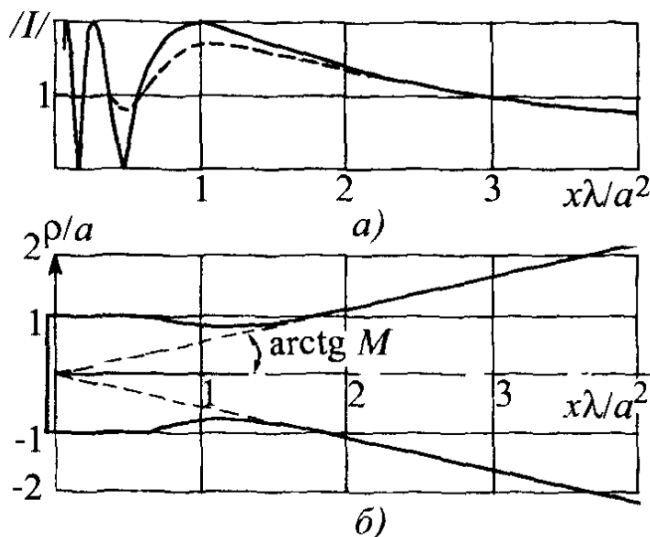
4

Прямий перетворювач



5

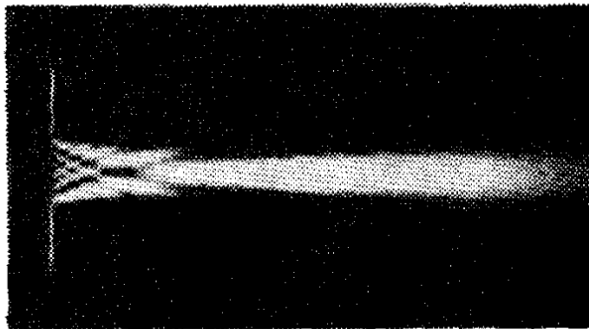
Поле прямого контактного перетворювача



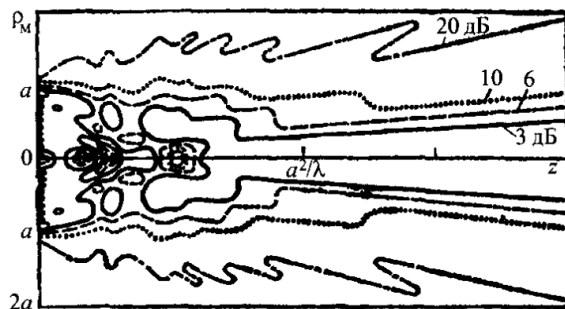
a_n – радіус круглого п'єзоелемента;
 x – відстань вздовж осі;
 λ – довжина хвилі в середовищі;
 ρ – відстань точки спостереження від осі x ;
 I – інтенсивність випромінювання;

6

Ближня зона перетворювача (зона Френеля)



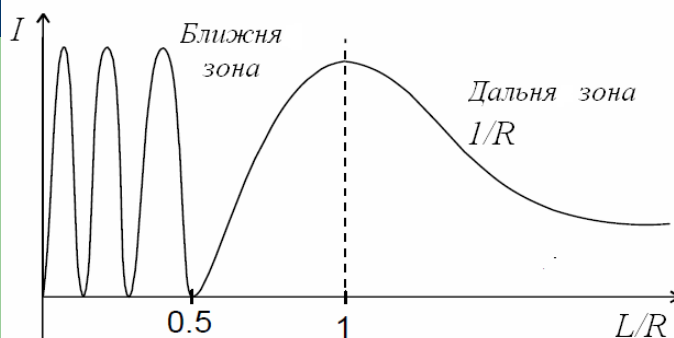
— Звукове поле перед випромінювачем з відношенням $2a_n/\lambda = 6,7$ (знімок Лінхарда та Рикмана);



— Лінії однакового ослаблення амплітуди випромінювання (ізобари).

7

Особливості ближньої зони



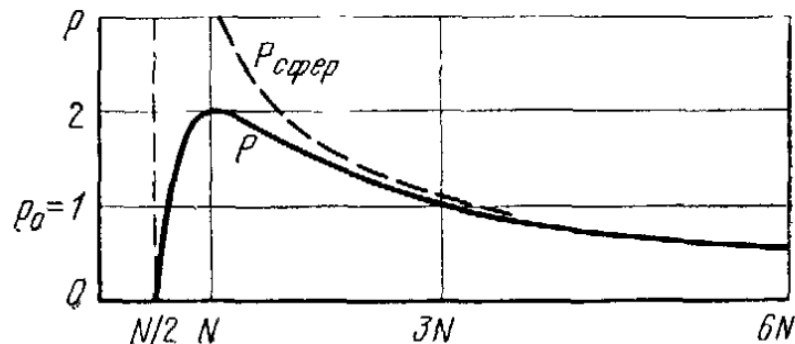
Протяжність ближньої зони:

$$r_0 = \frac{S}{\pi\lambda} = \frac{a_n^2}{\lambda}$$

- Ближня зона характеризується незначним розходженням фронту хвилі.
- У ближній зоні зміщення частинок відчують осциляції, існування яких пояснюється великою різницею шляхів від різних точок перетворювача до досліджуваної точки і пов'язаної з цим різницею фаз.

8

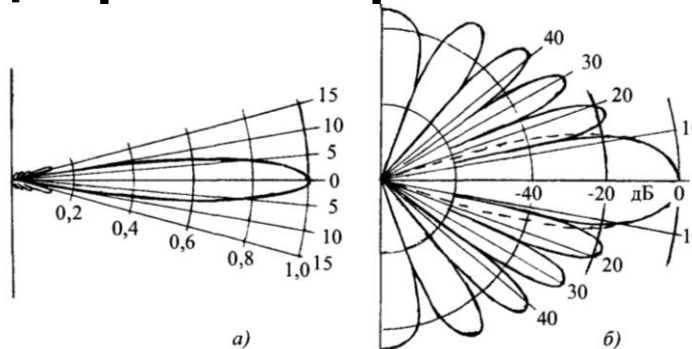
Дальня зона (зона Фраунгофера)



- Поле в дальній зоні описується за допомогою **діаграми направленості**.
- В дальній зоні випромінюється **сферична хвиля** в межах конуса – основної пелюстки діаграми направленості.
- В дальній зоні **амплітуда плавно зменшується** зі збільшенням відстані від перетворювача з причини **розходження хвильового фронту**.

9

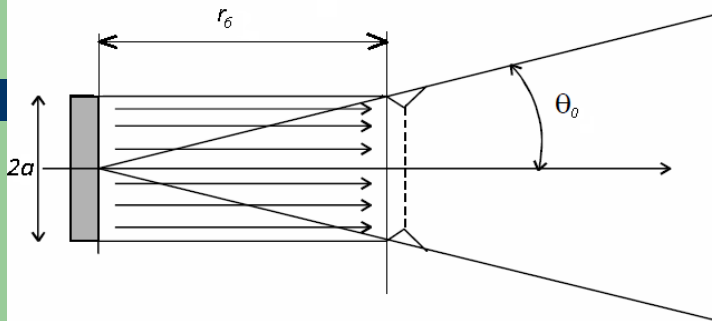
Діаграма направленості



- **Діаграма направленості $\Phi(\theta)$** – залежність амплітуди випромінювання від напрямку променя.
- **Акустична вісь** – лінія, що з'єднує точки максимальної інтенсивності акустичного поля в дальній зоні перетворювача і її продовження в ближній зоні.
- **Основна пелюстка діаграми направленості** – центральна частина діаграми, в межах якої інтенсивність змінюється від 1 до 0. В її межах концентрується 80-85% енергії випромінювання.
- За межами основної пелюстки з'являються **бокові пелюстки**, які є джерелом завад.

10

Акустичне поле в дальній зоні



Поле випромінювача визначається:

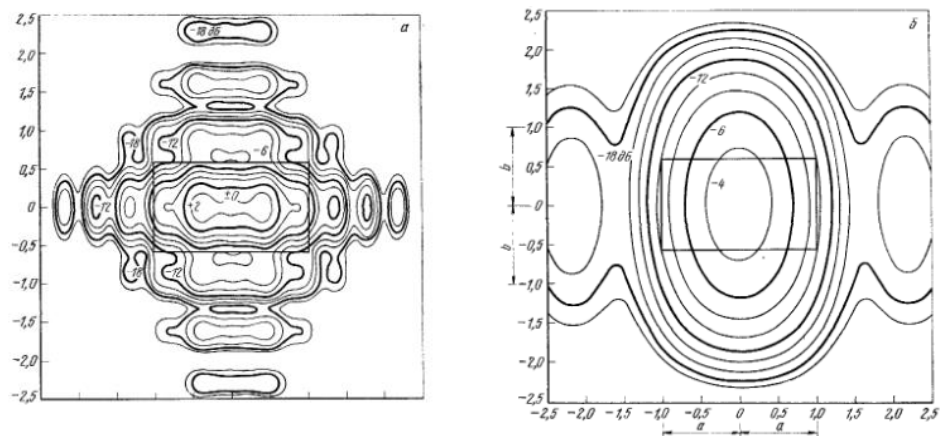
$$p = P_m \Phi(\theta); \quad P_m = P_0 \frac{S}{\lambda r}$$

Кут θ_0 називають кутом розкриття діаграми направленості.

$$\sin \theta_0 = n \frac{\lambda}{a_n}, \quad n = 0,61 \text{ — для круглого перетворювача.}$$

11

Акустичне поле прямокутного перетворювача



Ізобари в ближньому і дальньому полях прямокутного випромінювача з відношенням сторін $b/a = 0,6$.

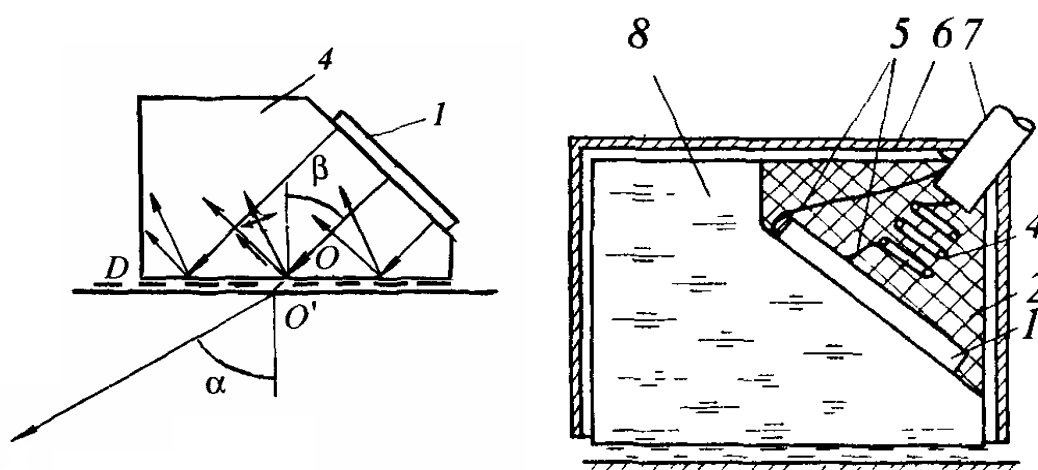
12

Діаграми направленості п'єзопластин різної форми

Форма пьезопластины	Диаграмма направленности $\Phi(X)$	Аргумент X	Коэффициент n для раскрытия основного лепестка на уровне $ \Phi $, равном					Максимум бокового лепестка
			0	0,1	$\sqrt{0,1}$	0,5	$\sqrt{0,5}$	
Диск, диаметр $2a$	$ 2J_1(X)/X $	$ak \sin \theta$	0,61	0,55	0,45	0,35	0,26	0,14
Эллипс, полуоси a_y и a_z		$(a_y^2 \cos^2 \varphi + a_z^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} \times k \sin \theta$						
Тонкое кольцо, диаметр $2a$	$ J_0(X) $	$ak \sin \theta$	0,39	0,35	0,28	0,24	0,18	0,40
Прямоугольник, стороны $2a_y, 2a_z$	$\left \frac{\sin X_y}{X_y} \frac{\sin X_z}{X_z} \right $	$a_y k \sin \theta_y ;$ $a_z k \sin \theta_z$	0,50	0,45	0,38	0,30	0,22	0,21

13

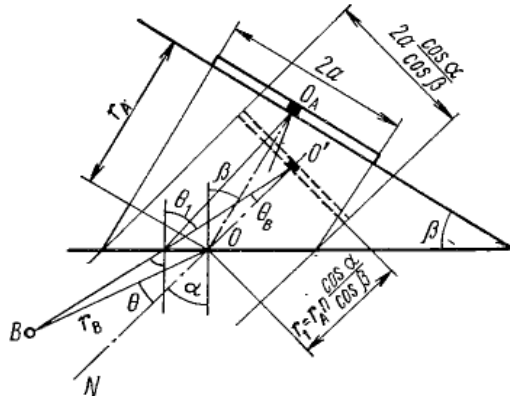
Похилий перетворювач



14

Поле похилого перетворювача

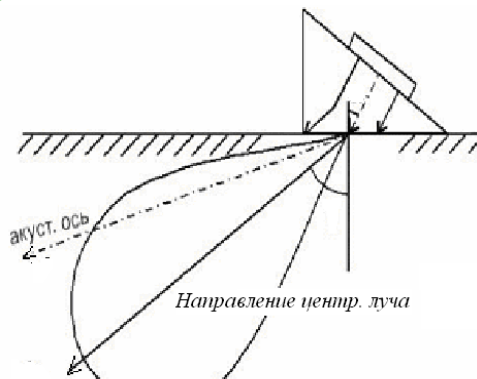
- У похилому перетворювачі поздовжні хвилі спочатку поширюються в матеріалі призми, потім заломлюються на границі призма-об'єкт контролю і трансформуються в поперечні.



- Акустичною віссю (ON) перетворювача в ОК називають заломлену акустичну вісь п'єзопластини

15

Особливості поля похилого перетворювача



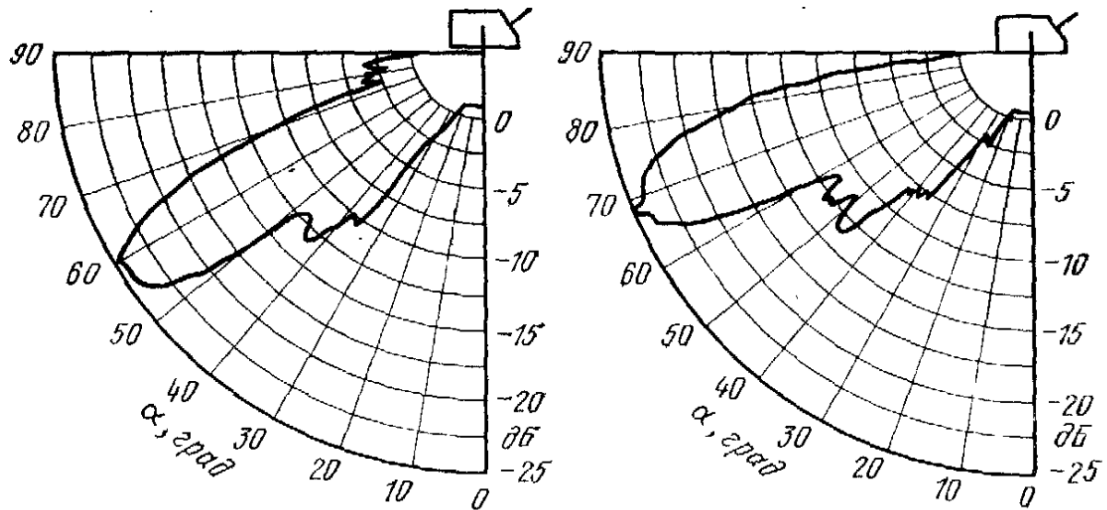
Акустична вісь перетворювача може **не збігатися з центральним променем**, який починається в точці виходу і відповідає максимуму діаграми спрямованості.

Існують дві причини відмінності кута введення від кута заломлення:

1) **Залежність коефіцієнта прозорості від кута падіння** (зменшення коефіцієнта прозорості з ростом кута падіння хвилі на границю в інтервалі між першим і другим критичними кутами).

2) **Ефект квазівикривлення акустичної осі**: промені пучка, заломлені під меншим кутами, проходять менший шлях у виробі. Отже вони відчувають менше загасання, результатом буде додаткове зменшення кута введення в порівнянні з кутом заломлення.

Діаграма направленості похилих шукачів у сталі



Література

1. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1991. — 752с.
2. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля /Под ред. И.Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986 — 278с.
3. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991.—283 с.
4. Методы акустического контроля металлов / Под ред. Н. П. Алешина. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2 кн./Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1986. Кн. 2. — 352 с.
6. Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия: Справ. пособие.— Мн.: Высш. шк., 1987.— 271 с: ил.
7. Неразрушающий контроль и диагностика. В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др. Справочник. М: Машиностроение, 2003 г.

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2

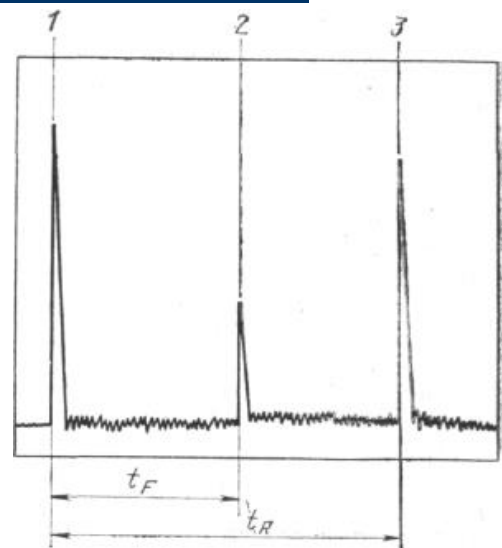
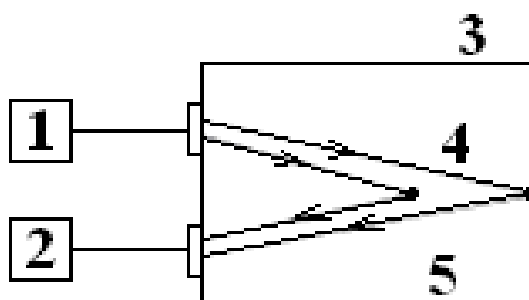
Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 12

*Ехо-імпульсний метод дефектоскопії.
Рівняння ехо-імпульсного методу.
Способи оцінки розмірів дефектів.*

1

1. Сутність ехо-імпульсного методу дефектоскопії



2

Виявлення дефекта

- Інформацію про наявність дефекту несе **часова затримка** і **амплітуда** прийнятого імпульсу.
- При відомій швидкості звуку **c** можна визначити відстань **d** до відбивача за часом проходження сигналу **t**:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

- Визначення відстані до дефекту зручно проводити по відбитому від задньої стінки імпульсу. Як правило, товщина контролюваного виробу відома. В такому випадку розгортка вибирається з таким розрахунком, щоб ехосигнал від задньої стінки був біля правого краю екрану.

3

Амплітуда прийнятого сигналу залежить від:

- величини випромінюваної енергії;
- характеристики спрямованості випромінювача;
- розміру відбивача (дефекту);
- властивості поверхні відбивача;
- положення відбивача;
- затухання ультразвукової хвилі в матеріалі.

4

Переваги та недоліки ехоімпульсного методу

Переваги:

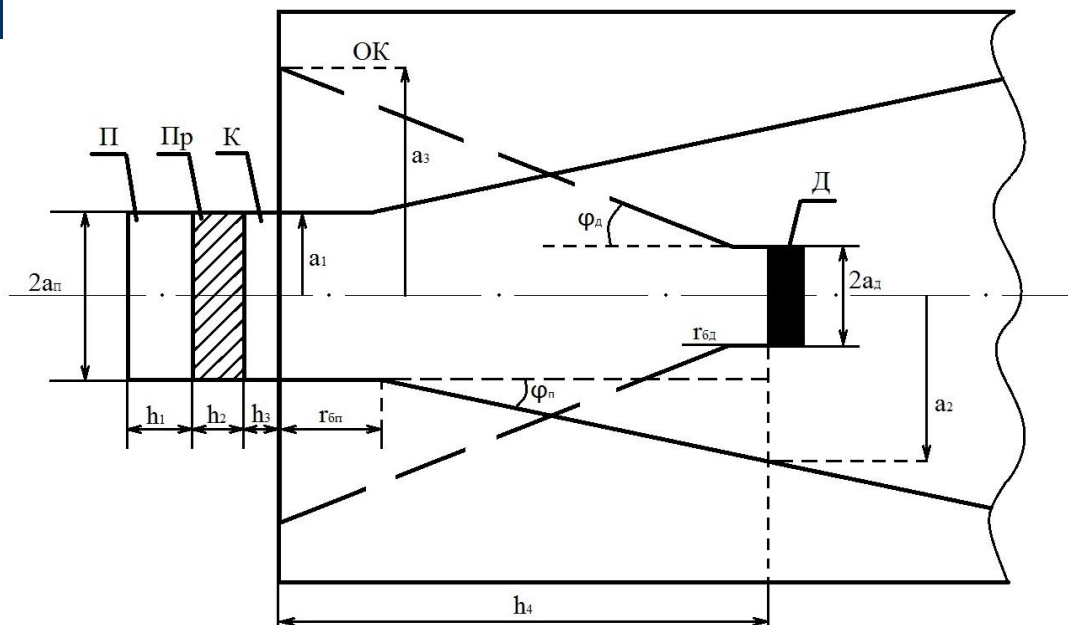
- односторонній доступ до виробу;
- висока чутливість до глибинних дефектів;
- висока точність визначення координат дефектів.

Недоліки:

- низька завадостійкість до поверхневих відбивачів;
- залежність амплітуди ехо-сигналу від орієнтації дефекту;
- неможливість контролю якості акустичного контакту в процесі переміщення ПЕП.

5

2. Рівняння дефектоскопії для ехоімпульсного методу



6

Проходження ультразвукових коливань через багат шарову структуру

Шлях проходження УЗ: ПЕП – протектор – контактна рідина – об'єкт контролю – дефект – об'єкт контролю – контактна рідина – протектор – ПЕП.

Необхідно розрахувати: втрати на проходження через границю розподілу середовищ, поглинання та дифракційне розходження хвильового фронту УЗК.

Введемо позначення:

$U_{\text{п}}$ – електрична напруга, підведена до перетворювача в режимі випромінювання;

A – чутливість перетворювача в режимі випромінювання;

B – чутливість перетворювача в режимі прийому;

$Z_{\text{п}}$ – хвильовий опір перетворювача;

$Z_{\text{пт}}$ – хвильовий опір протектора;

$Z_{\text{р}}$ – хвильовий опір рідини;

$Z_{\text{ок}}$ – хвильовий опір об'єкту контролю.

7

Розв'язок рівняння дефектоскопії

Рівняння дефектоскопії встановлює зв'язок між електричною напругою, яка подається на випромінювач і напругою, яка знімається з приймача в залежності від характеристик електроакустичного каналу та властивостей дефекту.

Розрахунок:

1. Звуковий тиск, що виникає на поверхні перетворювача в режимі випромінювання: $P_1 = U_{\text{п}} A$.

2. Коефіцієнт проходження УЗК за тиском через шар товщиною $h \gg \lambda$ при нормальному падінні: $K_{nm} = 2Z_m / (Z_n + Z_m)$, де Z_n , Z_m – хвильові опори суміжних шарів за номером n та m .

3. Поглинання УЗК в n -шарі $K_n = e^{-\alpha_n h_n}$, де α_n , h_n – коефіцієнт поглинання та товщина шару n .

4. Звуковий тиск P_m на виході шару з номером m ($m=n+1$), при падаючому тиску P_n : $P_m = P_n K_{nm} e^{-\alpha_m h_m}$.

8

Розв'язок рівняння дефектоскопії

5. Для випадку чотирьох шарів, перетворювач – протектор – рідина – об'єкт, звуковий тиск на глибині розташування дефекту:

$$P_4 = P_1 K_{12} e^{-\alpha_2 h_2} K_{23} e^{-\alpha_3 h_3} K_{34} e^{-\alpha_4 h_4}.$$

6. Енергія відбитого від дефекту ехо сигналу визначається відношенням поверхонь перетину дефекту і плями акустичного променя, залишеного на площині, що проходить через дефект:

$$\xi_1^2 = a_d^2 / a_2^2.$$

Відбиття за тиском: $\xi_1 = a_d / a_2$.

7. Тиск, у відбитій від дефекту УЗ хвилі:

$$P_5 = P_4 \xi_1$$

9

Розв'язок рівняння дефектоскопії

8. Розрахуємо коефіцієнти проходження УЗ на зворотному шляху від дефекту до перетворювача (Z_n і Z_n – хвильові опори суміжних шарів):

$$K_{nn} = 2Z_n / (Z_n + Z_m).$$

9. Тиск ехо-сигналу на прийомному перетворювачі:

$$P_6 = P_5 K_{43} e^{-\alpha_4 h_4} K_{32} e^{-\alpha_3 h_3} K_{21} e^{-\alpha_2 h_2} \xi_2, \text{ де } \xi_2 = a_1 / a_3 - \text{коефіцієнт за тиском, який визначає втрати ультразвукової енергії відбитої від дефекту та прийнятої перетворювачем в режимі прийому.}$$

$$P_6 = P_1 K_{12} K_{21} e^{-2\alpha_2 h_2} K_{23} K_{32} e^{-2\alpha_3 h_3} K_{34} K_{43} e^{-2\alpha_4 h_4} \xi_1 \xi_2.$$

10. Електрична напруга на електродах прийомного перетворювача:

$$U_6 = P_6 B$$

10

Спрощення рівняння дефектоскопії

1. Товщина проектора ЕАП вибирається з умови $h_2 \ll \lambda$, що дозволяє не враховувати поглинання в матеріалі протектора.
2. Товщина рідкого контактного шару мала порівняно з довжиною хвилі в рідині, поглинанням в рідині нехтуємо.
3. В результаті прийнятих спрощень тиск на прийомному перетворювачі:

$$P_6 = P_1 K_{12} K_{21} K_{23} K_{32} K_{34} K_{43} e^{-2\alpha_4 h_4} \xi_1 \xi_2$$

Зауваження:

Для узгодження імпедансу перетворювача з об'єктом, що досліджується застосовують протектор товщиною порядку $1/4 \lambda$. В цьому випадку можна визначити імпеданс багат шарової системи за формулою:

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{пт}} (Z_{\text{п}} - i Z_{\text{пт}} \operatorname{tg}(k_{\text{пт}} h_{\text{пт}})) / (Z_{\text{пт}} - i Z_{\text{п}} \operatorname{tg}(k_{\text{пт}} h_{\text{пт}})), \quad k = 2\pi / \lambda.$$

11

Способи наближеної оцінки розмірів дефектів

1. Вимірювання **максимальної амплітуди ехо-сигналу** від дефекту.
2. Визначення **положення крайніх точок** дефекту.

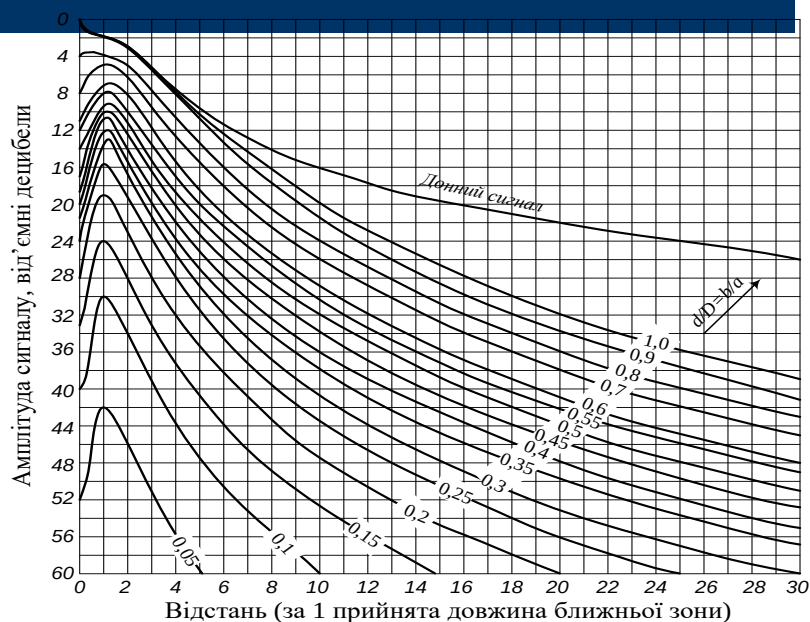
12

Вимірювання максимальної амплітуди ехо-сигналу

- спочатку вирішується задача знаходження штучного дефекту (типу плоскодонного отвору), що залягає на тій же глибині, і дає ехо-сигнал такої ж амплітуди.
- зразок з штучним дефектом повинен бути виготовлений з того ж матеріалу, що і виріб.
- шорсткість поверхонь виробу і зразка має бути однаковою (не нижче 5-го класу).
- для оцінки розмірів дефекту використовують номограми «амплітуда – відстань – діаметр дефекту» (АВД – номограми), які дозволяють визначити еквівалентний діаметр дефекту d

13

АВД номограма (амплітуда – відстань – діаметр дефекту)



14

Особливості користування АВД-номограмами

- По осі ординат номограми відкладені у від'ємних децибелах відношення амплітуди ехо-сигналу від дефекту до амплітуди максимально можливого донного ехо-сигналу. Так враховують втрати на розходження променів та затухання ультразвуку.
- По осі абсцис номограми відкладені відносно відстані в розмірності ближньої зони випромінювання перетворювача. Параметр кривих – величина d/D (d – діаметр плоскодонного відбивача, D – діаметр п'єзоперетворювача).
- Верхня крива ($d/D = \infty$) відповідає донному сигналу, тобто відбиттю від дефекту нескінченно великих розмірів.

15

- Для кожного типу перетворювача має бути своя АВД – номограма.

Визначення розмірів за положенням крайніх точок дефекту

- Знаходять положення шукача, які відповідають крайнім точкам дефекту і глибину залягання крайніх точок.
- Амплітуда ехо-сигналу при переміщенні шукача поблизу краю дефекту змінюється по-різному, в залежності від форми і величини дефекту.
- При цьому способі похибки тим більші, чим менший розмір дефекту.
- Крайніми вважають ті положення шукача, які відповідають зменшенню амплітуди ехо-сигналу від дефекту в 2 рази в порівнянні з максимальним.

16

Основні характеристики апаратної реалізації ехо-імпульсного методу

17

1. **Робоча частота f** (основна частота спектра сигналу).
2. **Форма обвідної випромінюваного сигналу.**
3. **Тривалість випромінюваного сигналу** (визначається за рівнем -20 дБ від амплітудного значення).
4. **Чутливість дефектоскопа** (відношення мінімального сигналу V_m до амплітуди випромінюваного сигналу V_0 : $K_V = V_m / V_0$).
5. **Максимальна глибина проникання** (глибина на якій виявляється дефект заданого розміру; максимальний час розгортки).
6. **Мінімальна глибина проникання** визначається "мертвою зоною".
7. **Роздільна здатність** визначається мінімальною відстанню між двома однаковими дефектами при якій вони реєструються роздільно.
8. **Розмір перетворювача:** діаметр або довжини сторін.
9. **Кут призми і кут введення променя.**
10. **Динамічний діапазон.**

Приклад розв'язання рівняння дефектоскопії: вихідні дані

Вихідні дані:

- **об'єкт контролю** – зразок із алюмінію з наступними характеристиками: $Z_{ок} = 17 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$, $\alpha_{ок} = 10 \text{ Нп}/\text{м}$, $c = 6300 \text{ м}/\text{с}$.
- **перетворювач** – серійний типу П-111-10 радіусом $a_n = 2,5 \text{ мм}$; частота $f = 10 \text{ МГц}$.
- **імпеданс матеріалу перетворювача та протектора:**
 $Z_n = 21 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$, $Z_{пт} = 27 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$
- **чутливість перетворювача в режимі випромінювання** $A = 500 \text{ Па}/\text{В}$;
- **чутливість перетворювача в режимі прийому** $B = 10 \text{ мкВ}/\text{Па}$.
- **дефект** – диск радіусом $a_d = 2 \text{ мм}$, на глибині $h_d = 120 \text{ мм}$.
- **контактний шар** – вода $Z_p = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$, товщиною менше довжини хвилі.
- **напруга, що подається на перетворювач в імпульсі** $U_n = 100 \text{ В}$.

18

Розрахувати:

Напругу ехо-сигналу на приймачі.

Приклад розв'язання рівняння дефектоскопії: розв'язання

1. Розраховуємо коефіцієнти, що входять в рівняння ЕАТ.

1.1. Коефіцієнт K_{12} проходження через границю перетворювач – протектор:

$$K_{12}=2Z_{пт}/(Z_{п}+Z_{пт})= 2*27*10^6/48*10^6=1.1.$$

1.2. Коефіцієнт проходження K_{23} через границю протектор – рідина:

$$K_{23}=2Z_p/(Z_p+Z_{пт})= 2*1.5*10^6/(1.5*10^6+27*10^6)=0.1.$$

1.3. Коефіцієнт проходження K_{34} через границю рідина – об'єкт контролю:

$$K_{34}=2Z_{ок}/(Z_p+Z_{ок})= 2*17*10^6/(1.5*10^6+17*10^6)=1.84.$$

1.4. Коефіцієнт відбиття УЗК за тиском від дефекту визначається як $\xi_1 = a_d/a_2$.

Спочатку розраховуємо діаметр $2a_2$ УЗ плями в зоні дефекту (на глибині h_4), попередньо визначивши ближню зону перетворювача у металі r_θ та дифракційний кут розходження УЗ хвилі φ_0 :

$$r_\theta = \frac{a_n^2}{\lambda} = \frac{a_1^2}{c} f = 10 \text{ мм}; \quad \varphi_n = \arcsin(0.61\lambda / a_1) = 9^\circ$$

Розмір УЗ плями знаходимо із геометричних побудов.

$$a_2 = (h_4 - r_\theta) \operatorname{tg} \varphi_0 + a_1 \approx (h_d - r_\theta) \sin \varphi_0 + a_1 = (120 - 10) \sin 9 + 2.5 = 19.4 \text{ мм}$$

Коефіцієнт відбиття УЗК за тиском: $\xi_1 = a_d / a_2 = 2 / 19.4 = 0.1$.

19

Приклад розв'язання рівняння дефектоскопії: розв'язання

Розрахуємо ослаблення при проходженні УЗК в зворотному напрямку.

1.5. Коефіцієнт проходження через границю об'єкт контролю – контактна рідина:

$$K_{43}=2Z_p/(Z_p+Z_{ок})= 2*1.5*10^6/(1.5*10^6+17*10^6)=0.16.$$

1.6. Коефіцієнт проходження через границю рідина – протектор:

$$K_{32}=2Z_{пт}/(Z_{пт}+Z_p)= 2*27*10^6/28.5*10^6=1.9.$$

1.7. Коефіцієнт проходження через границю протектор – перетворювач:

$$K_{21}=2Z_{п}/(Z_{пт}+Z_{п})= 2*21*10^6/48*10^6=0.87.$$

1.8. Сумарні втрати на поглинання УЗК в об'єкті контролю (туди та назад):

$$2K_4 = e^{-2\alpha_4 h_4} = 0.09.$$

1.9. Коефіцієнт $\xi_2 = a_1/a_3$. Розрахуємо його (за аналогією з п.1.4) використавши відповідні геометричні побудови. Отримаємо $\xi_2 = 0.1$.

1.10. Тиск ехо сигналу на перетворювачі

$$P_6 = P_1 * K_{12} * K_{21} * K_{23} * K_{32} * K_{34} * K_{43} * 2K_4 * \xi_1 * \xi_2 = 50000 * 0.00005 = 2.5 \text{ Па}$$

1.11. Напряга на виході перетворювача в режим прийому:

$$U_6 = P_6 B = 2.5 * 10^{-5} = 25 \text{ мкВ}.$$

20

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2

Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 13

- Метод наскрізного прозвучування (тіньовий)
- Рівняння тіньового методу дефектоскопії
- Методика контролю тіньовим методом

1

Методи наскрізного прозвучування

– Властивості об'єкта контролю визначаються за зміною **параметрів пружної хвилі** – амплітуди, фази або часової затримки (для імпульсно-тіньового методу).

– Найпоширеніші **тіньовий і дзеркально-тіньовий** методи (інформаційним параметром є зміна амплітуди прямого або відбитого від дна об'єкта ехо- сигналу).

– **Коефіцієнт втрати сигналу**

$$k_c = V_d/V_0,$$

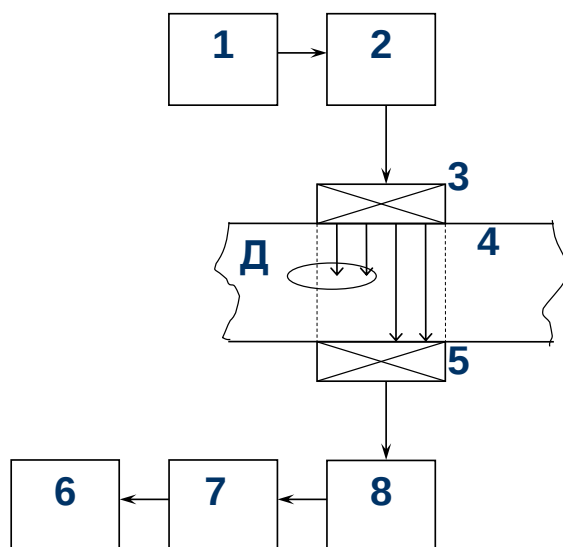
де V_d , V_0 – електричні напруги на виході шукачів за наявності та за відсутності дефекту.

2

3

- 4

4



- 110

Основні об'єкти для контролю тіньовим методом

- для контролю і вимірювання в матеріалах з **високим коефіцієнтом загасання**;
- пластини і оболонки, **доступні з обох боків**, у яких структурні **неоднорідності** мають **пласку форму і розташовуються паралельно поверхням**, наприклад листи з розшаруваннями;
- **контроль композитних матеріалів**, наприклад шаруватих матеріалів (ламінітів), армованих скловолокном, стільникових структур, які використовуються в літакобудуванні.

5

Переваги та недоліки тіньового методу

Переваги:

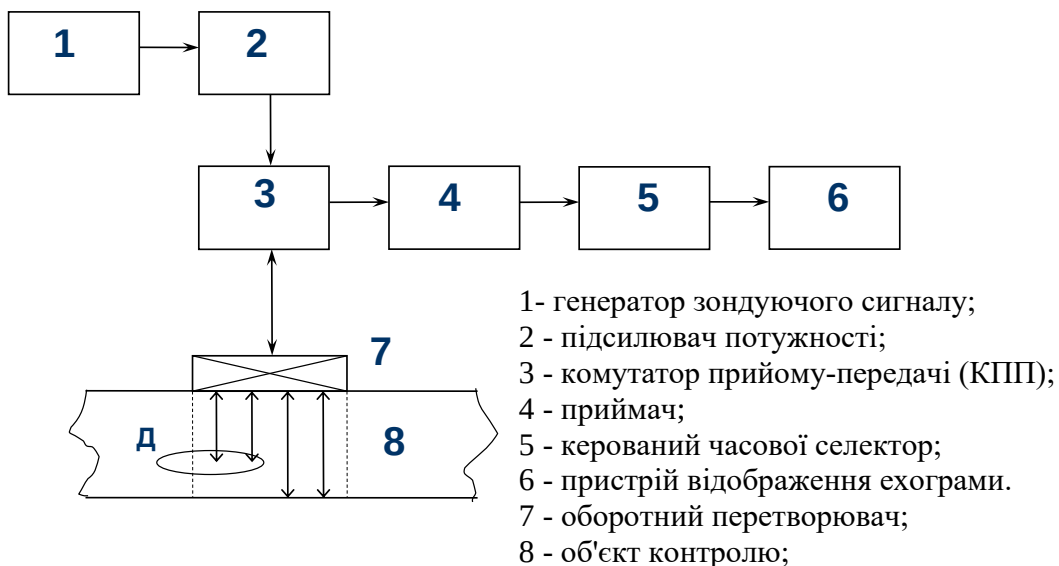
- порівняна простота конструкції;
- малий рівень втрат енергії;
- велика чутливість в порівнянні з ехо-імпульсним методом.

Недоліки:

- необхідність двостороннього доступу;
- наявність плоских паралельних поверхонь.

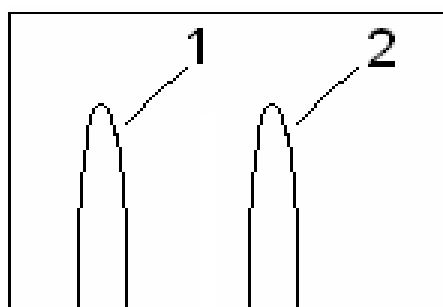
6

Схема дзеркально-тіньового методу дефектоскопії

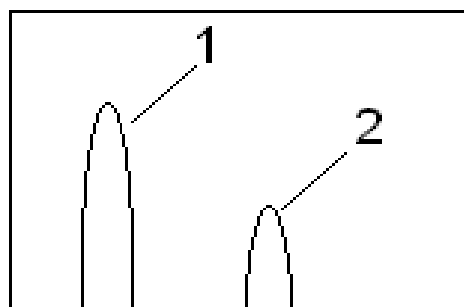


7

Осцилограми дзеркально-тіньового методу



а) матеріал без дефекту



б) матеріал з дефектом

1 - сигнал, відбитий від дна; 2 - прийнятий ехо-сигнал.

8

Особливості дзеркально-тіньового методу

– Вимірюється зміна амплітуди донного сигналу, ослабленого подвійним проходженням через область дефекту.

– Може реалізовуватися як неперервним гармонічним так і імпульсним радіосигналами.

– За технікою виконання (фіксується ехо-сигнал) – це метод відбиття, а з фізичної сутності контролю (вимірюють ослаблення сигналу, який двічі пройшов ОК в зоні дефекту) він близький до тіньового методу.

9

Основні характеристики тіньового методу

1. Частота ультразвукових коливань.
2. Характер акустичного поля (ДС перетворювача в дальньому полі).
3. Коефіцієнт виявлення дефекту.
4. Поперечна роздільна здатність.
5. Чутливість методу.

10

Чутливість тіньового методу

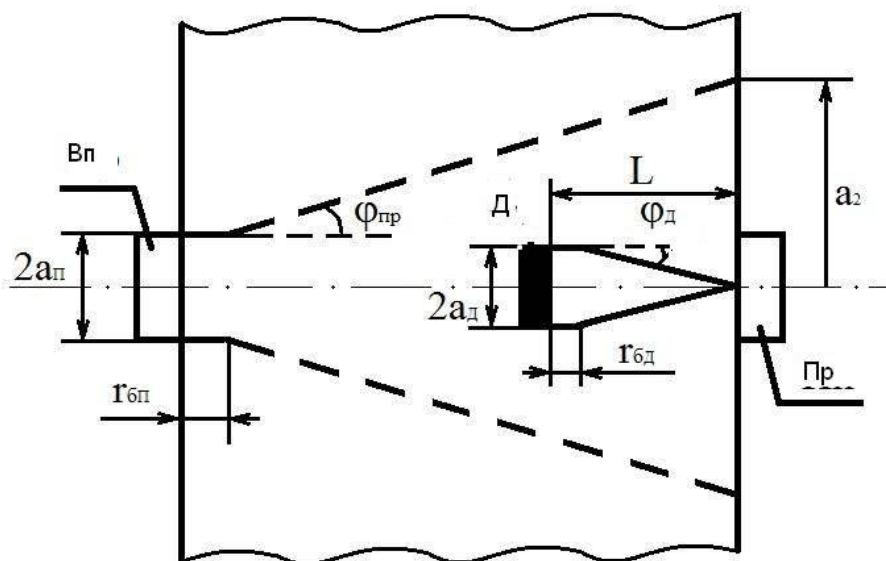
– **Чутливість тіньового методу (максимальна чутливість)** – це та мінімальна відстань між дефектом і прийомним перетворювачем, при якій тінь від дефекту стягується в точку.

– **Фізично реалізована чутливість** – це така відстань між дефектом і прийомним перетворювачем, при якій інформація про дефект стійко фіксується.

Вважається, що інформація про дефект фіксується стійко, якщо зона тіні покриває не менше $1/3$ площі приймального перетворювача.

11

Акустичне поле дефекту



12

Визначення чутливості тіньового методу

Максимальна чутливість:

$$L = a_d \operatorname{ctg} \varphi_d + a_d^2 / \lambda = \frac{2.64 a_d^2}{\lambda};$$

Фізично реалізована чутливість:

$$L_\phi = (a_d - a_T) \operatorname{ctg} \varphi_d + a_d^2 / \lambda = \frac{2.64 a_d^2}{\lambda} - \frac{0.93 a_\Pi a_d}{\lambda};$$
$$a_T = 0.57 a_\Pi$$

13

Примітка: формули отримані за умови, що дефект знаходиться в дальній зоні випромінювального перетворювача

Особливості використання тіньового методу

1. Якщо відстань між дефектом і прийомним перетворювачем буде більше $L_{\phi p}$, то дефект не буде виявлений.

Однак, якщо розмір (товщина) досліджуваного об'єкта виявиться менше ніж $2L_{\phi p}$, то випромінювач та приймач можна поміняти місцями (умова – перетворювачі оборотні).

2. Для того, щоб хвиля від випромінювача досягла приймача, необхідно виконання умови передачі енергії через шар. Тобто, якщо ширина досліджуваного об'єкта буде кратна половині довжини хвилі, то в шарі утворюється стояча хвиля і немає передачі енергії.

Щоб уникнути даного недоліку на практиці працюють не з однією частотою, а в смузі:

$$f = f_0 + \Delta f; \quad \Delta f = \pm 0.05 f_0$$

14

Рівняння тіньового методу

Рівняння встановлює зв'язок між електричною напругою, яка подається на випромінюючий перетворювач (ВП) і напругою, яке знімається з приймального перетворювача (ПП) за відсутності дефекту:

$$U_n = U \cdot A \cdot B \cdot K_{12} \cdot K_{21} \cdot e^{-2a_2 h_2} \cdot K_{23} \cdot K_{32} \cdot e^{-2a_3 h_3} \cdot K_{34} \cdot K_{43} \cdot e^{-a_4 h_4} \cdot a_n / a_2$$

U, A, B – напруга, що подається на випромінювач, чутливість перетворювача в режимі випромінювання і прийому;

K_{12}, K_{23}, K_{34} – коефіцієнти проходження УЗК через границі перетворювач – протектор, протектор – контактна рідина, контактна рідина – ОК;

K_{21}, K_{32}, K_{43} – коефіцієнти проходження УЗК через границі протектор – перетворювач, контактна рідина – протектор, ОК – контактна рідина;

h_2, h_3, h_4 – геометричні товщини шарів;

a_n, a_2 – радіус приймального перетворювача і плями УЗ променя, спроектованого на протилежну сторону ОК відповідно.

15

Методика контролю виробів тіньовим методом 1

1. **Робочу частоту** шукача і його **діаметр** знаходимо виходячи з товщини і матеріалу ОК. Шукачів повинно бути два з ідентичними характеристиками.

2. Розраховуємо **фізичну чутливість методу**, вважаючи, що дефект має форму диска і розташований посередині між шукачами:

$$L_\phi = (a_d - a_T) \operatorname{ctg} \varphi_d + a_d^2 / \lambda = \frac{2.64 a_d^2}{\lambda} - \frac{0.93 a_\Pi a_d}{\lambda};$$

$$a_T = 0.57 a_\Pi$$

Тут a_T знайдено з умови, що пляма тіні від дефекту становить 1/3 площі поверхні приймача.

16

Методика контролю виробів тіньовим методом 2

3. Перевіримо умову забезпечення застосовності тіньового методу для контролю виробу товщиною H :

$$2L_{\phi} > H .$$

Якщо умова не виконується, слід замінити шукач.

4. За індикатором визначається амплітуда сигналу на приймачі з дефектом V_d і без нього V_0 . Розраховується коефіцієнт втрати сигналу

$$k_c = V_d/V_0.$$

17

Методика контролю виробів тіньовим методом 3

5. Параметр кривої АВД номограми, що проходить через точку з координатами $(k, L/r_0)$ дає оцінку розміру дефекту за відомим розміром апертури приймального шукача.

6. Оцінку перерізу дефекту можна зробити наближено, за оцінкою коефіцієнта втрати сигналу:

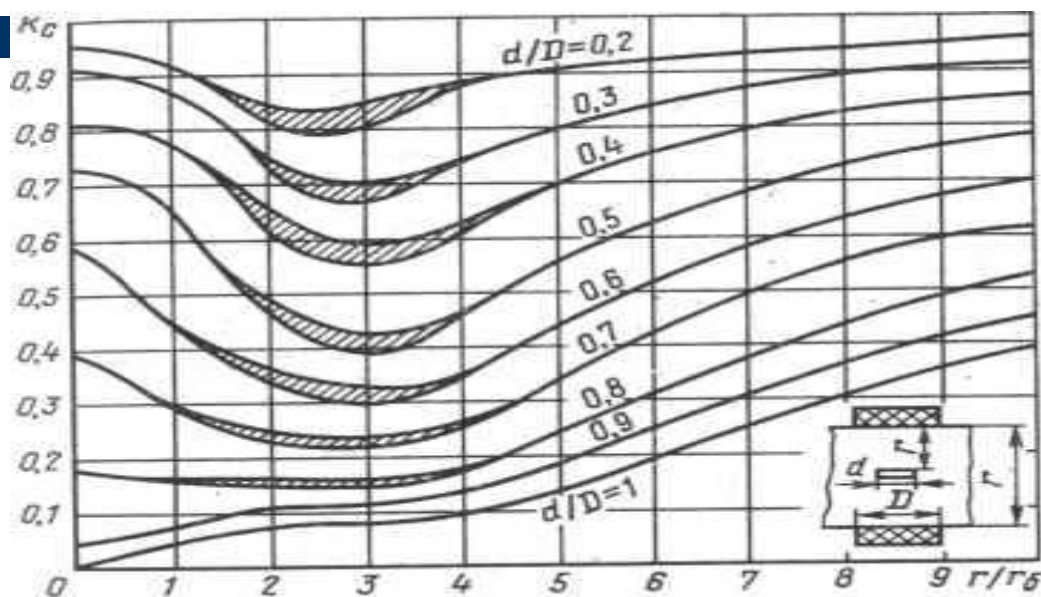
$$k_c = V_d/V_0 > 1-s/S.$$

S, s – площі поверхні перетворювача і дефекту відповідно. У дальній зоні акустичного поля перетворювача ця оцінка визначається:

$$k_c \geq 1-4s/(r \lambda).$$

18

Приклад АВД номограми



19

Оцінка розміру дефекту за АВД номограмою

Розрахунок ослаблення дефектом амплітуди наскрізного сигналу проводять за безрозмірною діаграмою, побудованою для дефекту у формі диска розташованого посередині між однаковими шукачами.

По осі ординат вказано відносне ослаблення наскрізного сигналу, викликане впливом дефекту.

По осі абсцис – відстань між випромінювачем і приймачем поділене на довжину ближньої зони перетворювачів.

Заштриховані зони відповідають розкиду, що викликається різною формою і тривалістю випромінюваних імпульсів.

20

Приклад: умова

Перевірити умову застосовності тіньового методу для контролю листового прокату із сталі ($c=5900$ м/с) товщиною $H=30$ мм на частоті 5 МГц шукачами з діаметром активної поверхні $2a_{\Pi} = 10$ мм. Діаметр диска дефекту $2a_{\text{д}} = 8$ мм.

21

Приклад: розв'язок

1. Розраховуємо фізичну чутливість методу, вважаючи, що дефект має форму диска і розташований посередині між шукачами. Тіньова пляма дефекту становить $1/3$ площі апертури шукача. Тоді визначимо фізичну чутливість методу:

$$L = \frac{2,64a_{\text{д}}^2}{\lambda} - \frac{0,93a_{\Pi}a_{\text{д}}}{\lambda} = \frac{2,64 \cdot 16}{1,18} - \frac{0,93 \cdot 5 \cdot 4}{1,18} = 20 \text{ мм};$$

2. Перевіримо умову забезпечення застосовності тіньового методу для контролю виробу:

$$2L > H = 40 > 30 .$$

Відповідь. Дефект діаметром $2a_{\text{д}} = 8$ мм може бути виявлений тіньовим методом.

22

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2

Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 14-15

Огляд методів акустичного контролю

- Імпедансний метод
- Метод вільних коливань
- Метод вимушених коливань (Резонансний метод)

1

1. Імпедансний метод

- Базується на зміні механічного імпедансу ділянки поверхні ОК за наявності дефекту.
- Метод використовує згинні (*низькочастотний* метод) або поздовжні (*високочастотний* метод) коливання звукового і НЧ ультразвукового діапазону.
- Призначений для контролю композиційних матеріалів і конструкцій.

2

Механічний імпеданс

Механічним імпедансом називають комплексне відношення гармонічної сили F вимушених коливань, що діє на поверхні (або в точці) механічної системи, до середньої швидкості коливань v на цій поверхні (або в точці) в напрямку сили: $Z = F / v$.

Механічний імпеданс має активну R і реактивну X складові:

$$Z = R + jX = |Z|e^{j\varphi}; \quad [Z] = \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м},$$

$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ – модуль імпедансу, $\varphi = \arctg(X / R)$ – його аргумент.

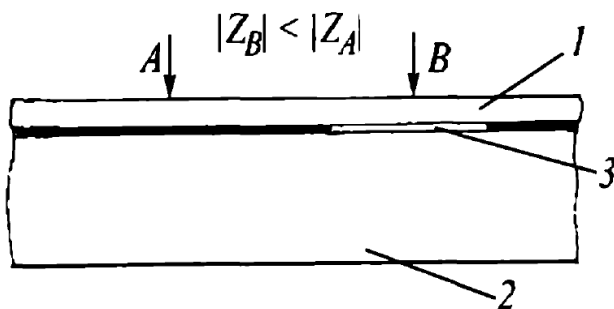
Активна складова R імпедансу характеризує незворотні втрати.

Реактивна складова X – кінетичну і потенціальну енергію коливальної системи.

На відміну від ρc – хвильового опору середовища, Z – це параметр конструкції і не питома величина.

3

Принцип імпедансного методу контролю



1 – обшивка;
2 – основа;
3 – дефект.

– В точці A конструкція коливається як єдине ціле. В цьому випадку жорсткість і модуль механічного імпедансу $|Z_A|$ мають максимальні значення.

– У зоні B жорсткість відокремленого дефектом шару різко зменшується, викликаючи відповідне зменшення модуля імпедансу $|Z_B|$ і зміну його аргументу φ .

Ці зміни реєструються перетворювачем дефектоскопа.

4

Низькочастотний імпедансний метод

– Використовуються *згинні* коливання поверхні виробу ($f = 0,1..40$ кГц).

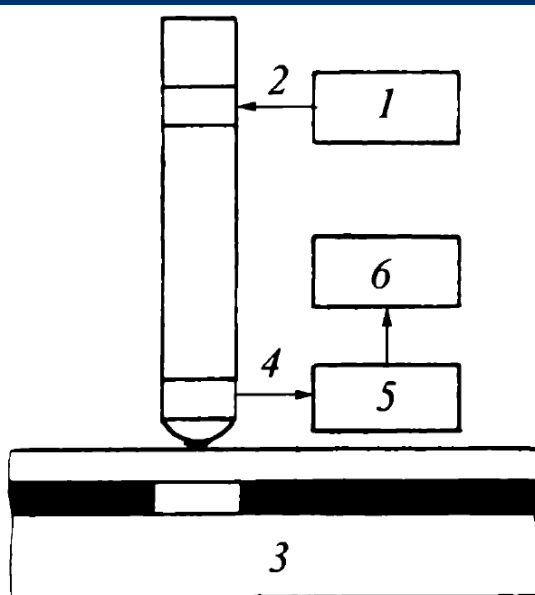
– Виявлення дефектів типу *розшарування, непоклей, непропай* в металах і полімерних композитних матеріалах (*приклад* – антикригові накладки пропелерів).

– Поява дефекту зменшує модуль *вхідного механічного імпедансу ОК*, робить розташовану над дефектом ділянку піддатливішою, в якій легше збуджуються згинні коливання.

– Дефекти визначають за зміною *амплітуди та фази* вихідного сигналу.

5

Схема низькочастотного імпедансного методу



- 1 – Генератор;
- 2 – Випромінювач;
- 3 – ОК;
- 4 – Приймач;
- 5 – Підсилювач;
- 6 – Індикатор.

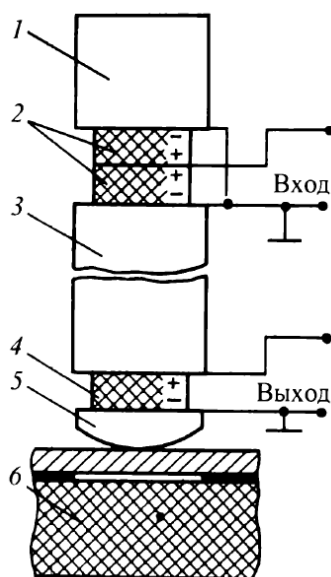
6

Перетворювачі НЧ імпедансних дефектоскопів

- У імпедансних дефектоскопах використовують суміщені і роздільно-суміщені перетворювачі з *сухим точковим контактом*.
- Взаємодіють з ОК перетворювачі, які називають *вібраторами*.
- Вібратори є складеними коливальними системами та містять п'єзопластини і пасивні елементи (хвилеводи, накладки), які надають вібраторів потрібну власну частоту.
- Вібратори збуджують поздовжні коливання, які в зоні контакту з ОК трансформуються в згинні.

7

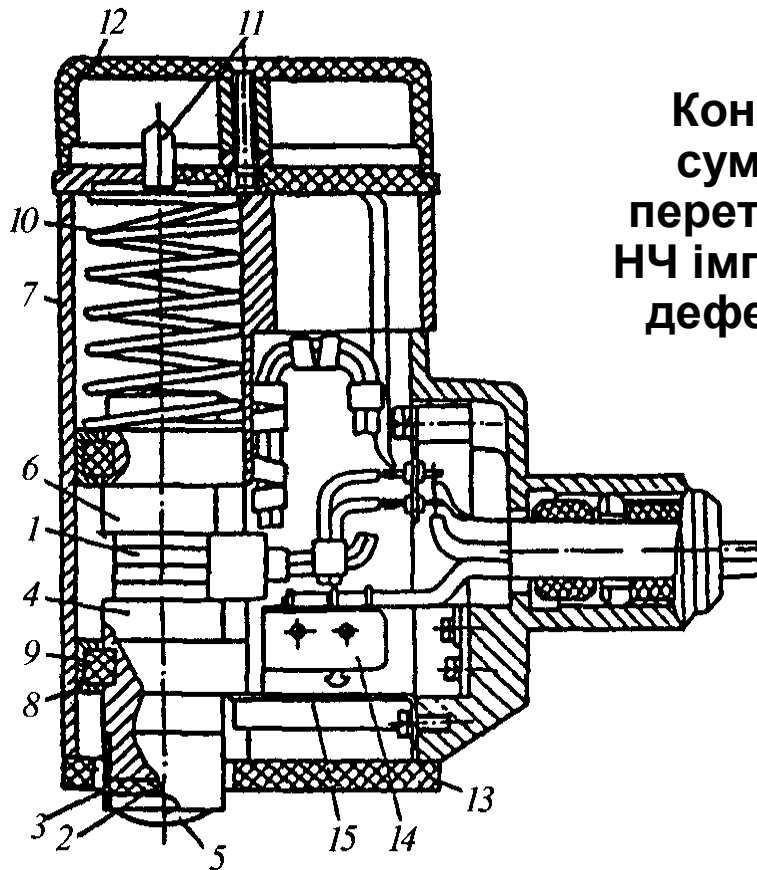
Вібратор суміщеного перетворювача імпедансного дефектоскопа



- 1 - інерційне навантаження;
- 2 - випромінювальні п'єзоелементи;
- 3 - хвилевід;
- 4 - приймальний п'єзоелемент;
- 5 - контактний накінецьник;
- 6 - ОК.

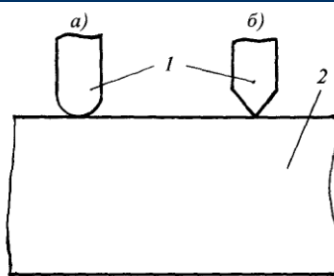
8

9



**Конструкція
суміщеного
перетворювача
НЧ імпедансного
дефектоскопа**

Сухий точковий контакт (СТК)



- сферична поверхня ($R = 3..20$ мм) – для неперервного сканування;
- гостра поверхня – для дискретного сканування.

Переваги СТК:

- відсутність контактної рідини, що дозволяє контролювати гігроскопічні матеріали;
- мала площа зони контакту, що дозволяє контролювати ОК з криволінійними поверхнями;
- зменшення похибки вимірювання швидкості звуку ОК з одностороннім доступом.

Недоліки СТК:

- низька ефективність передачі коливань, яка зменшується зі зростанням частоти;
- слабка направленість випромінювання та прийому.

10

Виявлення дефектів НЧ імпедансними дефектоскопами

– Зі збільшенням товщини обшивки і зменшенням жорсткості внутрішнього елемента ОК чутливість зменшується.

– На чутливість методу впливають модуль пружності і товщина зовнішнього елемента, жорсткість її внутрішнього елемента.

Приклад: У найбільш сприятливому випадку жорсткого внутрішнього елемента при товщині обшивки $h = 0,3$ мм виявляється дефект діаметром 5 мм, а при $h = 2,5$ мм – діаметром 30 мм.

11

Переваги та недоліки НЧ імпедансного методу

Переваги:

- сухий контакт;
- односторонній доступ.

Недоліки:

- мала чутливість до виявлення дефектів;
- залежність від умови притиснення датчика.
- неможливість контролю матеріалів з малими модулями Юнга (наприклад, гуми).

12

Приклад: імпедансний дефектоскоп «ДАМИ-С»

- Призначений для виявлення дефектів типу розшарувань, непроклея, порушень цілісності композитних матеріалів, клеєних конструкцій і стільникових структур, а також для виявлення корозії в неферомагнітних матеріалах.
- Особливістю дефектоскопа є можливість візуалізації дефекту щодо координат контрольованого об'єкта за рахунок застосування акустичного сканера розташування.

Технічні характеристики:

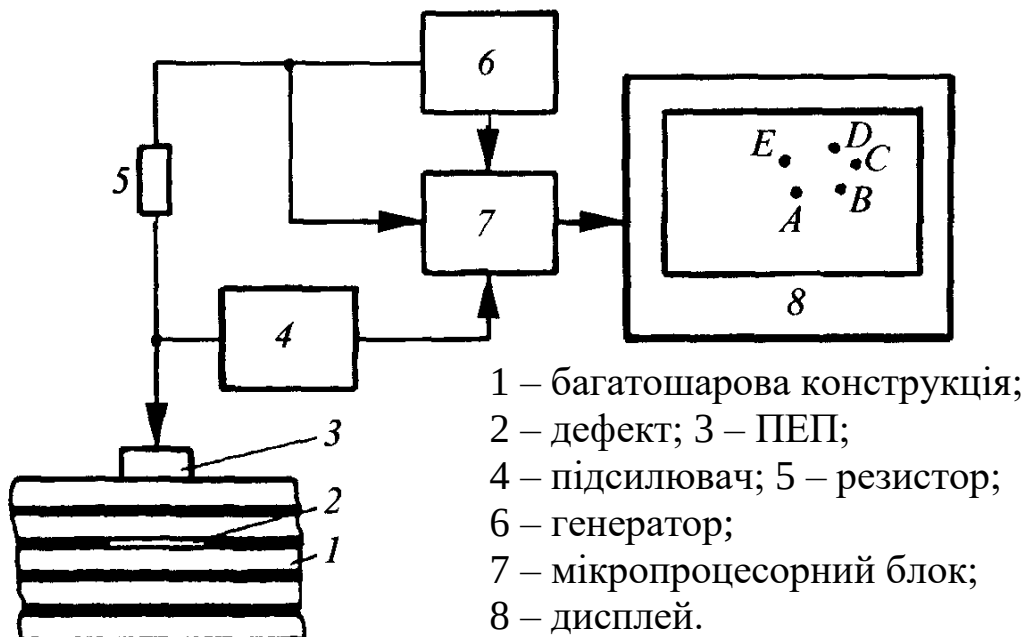
- Діапазон робочих частот - 1 .. 40кГц
- Продуктивність контролю в точковому режимі - не менше 100 вимірів / с
- Продуктивність контролю в пороговому і поверхневому режимі - не менше 50 вимірів / с
- Діапазон амплітуд вимірюваних сигналів - 10В .. 0.01мВ
- Похибка визначення положення шукача - ± 1.5 мм



Високочастотний імпедансний метод

- Застосовується для контролю *багатошарових листових конструкцій* з малою кривизною поверхні.
- Ознакою наявності дефекту є зміна *електричного імпедансу ПЕП*, навантаженого на ОК. Величина електричного імпедансу ПЕП однозначно пов'язана з *вхідним механічним імпедансом* ОК, який залежить від наявності дефекту в ОК.
- Випромінювання поздовжніх хвиль на частотах $f = 100..350$ кГц.
- Недоліки методу: велика площа контакту, необхідність застосування контактних рідин

Схема височастотного імпедансного методу (NTD Instruments)



15

2. Метод вільних коливань

- Є одним з найдавніших методів неруйнівного контролю, коли за звуком, який видає керамічний виріб після нанесення по ньому удару, вдавалося визначати тріщини й дефекти.
- Метод заснований на збудженні в ОК вільних або вимушених коливань і вимірюванні інформаційних параметрів – власних частот або коефіцієнта загасання.
- Метод вільних коливань визначений в ГОСТ 23829-85 як "Метод акустичного неруйнівного контролю, заснований на збудженні вільно затухаючих пружних коливань в контрольованому об'єкті або його частини та аналізі параметрів цих коливань".

16

Різновиди методу вільних коливань

- *Інтегральний* – метод передбачає збудження коливань у всьому виробі або у його значній частині.
 - Застосовується для контролю фізико-механічних характеристик виробів з бетону, кераміки, металевого лиття, абразивного інструменту.
 - Метод не вимагає сканування і відрізняється високою продуктивністю.
- *Локальний* – використовується коливання тільки частини об'єкта
 - Застосовується для виявлення зон з порушенням з'єднання між елементами багатошарових конструкцій, і дефектів (переважно розшарувань) у виробах чи матеріалах із пластиків.

17

Переваги методу вільних коливань

- можливість контролю виробів з матеріалів з малими модулями Юнга і високими коефіцієнтами загасання пружних коливань (гуми, пінопласту і т. д.);
- виявлення дефектів на більшій глибині (до 30 мм в пластиках).

18

Способи збудження вільних коливань

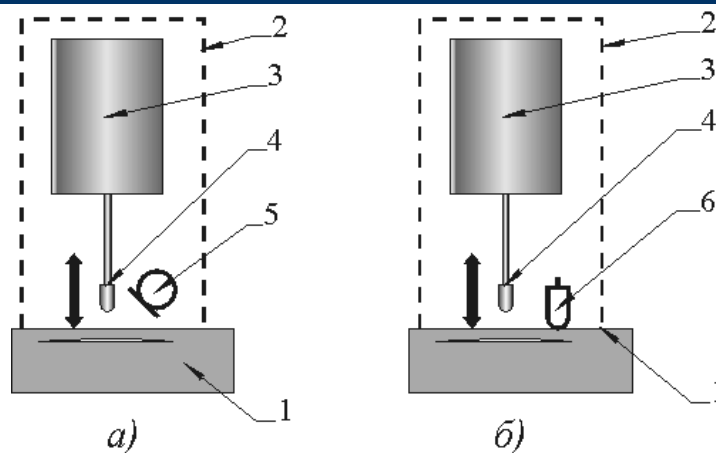
- 1) механічний (електромеханічний);
- 2) п'єзоелектричний;
- 3) електромагнітний акустичний.

Найчастіше застосовується перший спосіб. Як збудник коливань використовують пристрої, рухливі системи яких наводяться в рух електромагнітними механізмами.

У механічних (електромеханічних) вібраторах рухлива система стикається з виробом протягом проміжків часу, малих порівняно з періодом проходження імпульсів.

19

Реалізація методу вільних коливань



а) з мікрофонним приймачем; б) з п'єзоелектричним приймачем;

1 – ОК; 2 - корпус перетворювача; 3 – електромагніт; 4 - рухома система;
5 – мікрофон; 6 - п'єзоприймач.

20

Приклад: *низькочастотний акустичний дефектоскоп АД-701М*



21

Призначений для контролю композиційних матеріалів;

Прилад поєднує два методи контролю - *імпедансний і метод вільних коливань*;

Спектральний аналіз сигналів;

Конструктивно прилад має портативний виконання, автономне живлення і призначений для використання в лабораторних, цехових і польових умовах.

Технічні характеристики:

Мінімальна площа дефектів, що виявляються: 1,2 см².

Частота слідування збуджуючих імпульсів: 25 Гц.

Діапазони частот спектроаналізатора: 0,3 - 20 кГц.

Живлення – від вбудованого акумулятора: 3.6 В

Тривалість безперервної роботи від акумуляторів: 24 г.

Габарити електронного блоку: 235 x 125 x 50 мм

Ціна - 5500 у.о.

Акустичний метод контролю твердості абразивного інструменту

Метод заснований на вимірюванні швидкості звуку, яка тісно пов'язана з характеристиками інструменту і може бути досить швидко і точно розрахована за результатами вимірювання *частот власних коливань* контрольованого виробу.

Застосування акустичного методу для контролю фізико-механічних властивостей абразивного інструменту регламентовано стандартом *ГОСТ 25961-83*.

Параметрами, що характеризують фізико-механічні властивості абразивного інструменту, є *швидкість розповсюдження акустичних хвиль і звуковий індекс (ЗІ)*, що відображають твердість абразивного інструменту.

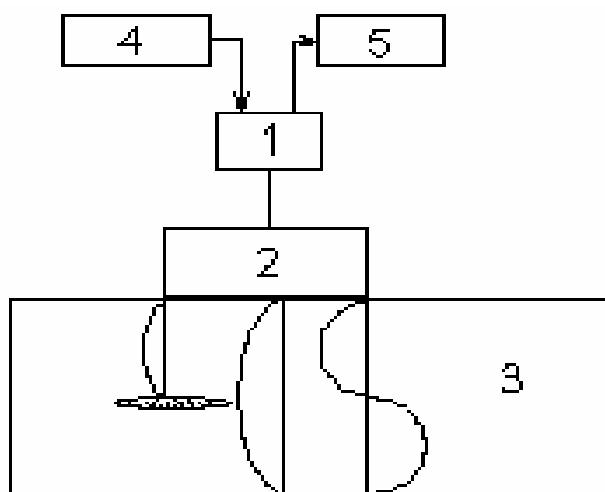
22

3. Метод вимушених коливань (Резонансний метод)

- Заснований на аналізі коливань системи ОК - перетворювач при зміні частоти зовнішнього збудження.
- В ОК за допомогою п'єзоперетворювача збуджують резонансні коливання (стоячі хвилі).
- При співпадінні частоти збудження з частотою власних коливань в системі виникає резонанс.
- Зміна товщини виробу викликає зміщення резонансних частот, наявність дефектів - зникнення резонансу або різке зміщення частоти.
- Метод дозволяє контролювати дуже тонкі вироби.

23

Схема резонансного методу



- 1 – генератор;
- 2 - випромінювач;
- 3 - об'єкт контролю;
- 4 - модулятор частоти;
- 5 - реєстратор резонансу.

24

Вимірювання товщини резонансним методом

- Використовують для вимірювання товщини у випадку одностороннього доступу (тонкостінні труби та оболонки, коли ехоімпульсному методу перешкоджає мертва зона).
- Зв'язок власних частот пластини з товщиною визначається умовою: $h = n \frac{\lambda}{2} = \frac{n \cdot c}{2 f_n}$, де n – номер гармоніки.
- Якщо номер гармоніки невідомий, використовують формулу для різниці гармонік: $h = \frac{(n-m)c}{2(f_n - f_m)}$, де n і m – номери попередньої та наступної гармонік.

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2

Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 16

Метод акустичної емісії

1

Акустична емісія

Акустична емісія (АЕ) це процес утворення акустичних хвиль при динамічній внутрішній локальній перебудові структури матеріалу ОК.

Акустичні хвилі виникають:

- в результаті появи тріщин в контрольованому об'єкті;
- при перебудові кристалічної структури матеріалів;
- при переміщенні дефектів кристалічної решітки (дислокацій).

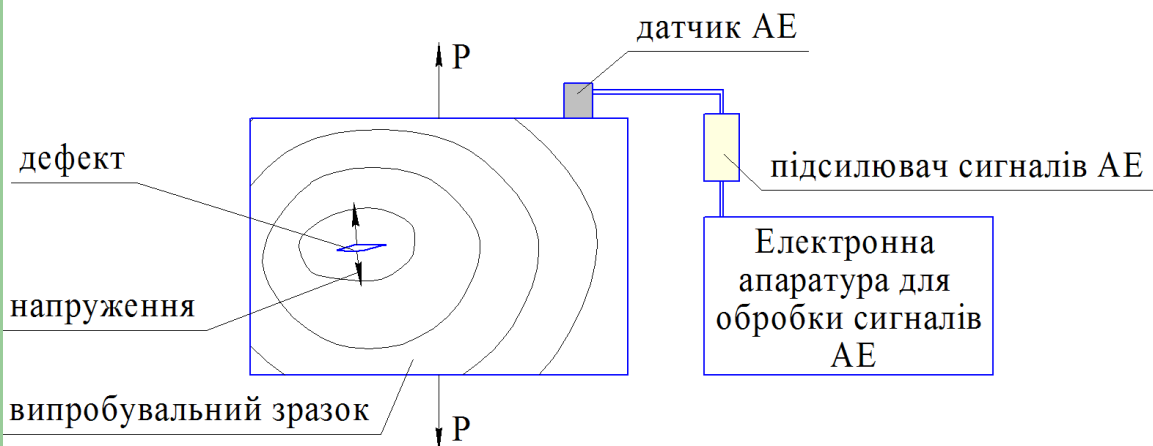
2

Виникнення сигналів АЕ

- Для отримання сигналів акустичної емісії ОК часто піддають *зовнішнім навантаженням*.
- При навантаженні внутрішні *напруження* в ОК *розподіляються нерівномірно*, оскільки за конструкцією і за внутрішньою структурою об'єкти завжди неоднорідні.
- В деякій області твердого тіла локальні напруження досягають граничного значення і виникає *розрив внутрішніх зв'язків*.
- В результаті зняття напружень в цій області накопичена *енергія швидко виділяється*, в тому числі і у вигляді пружного імпульсу АЕ.

3

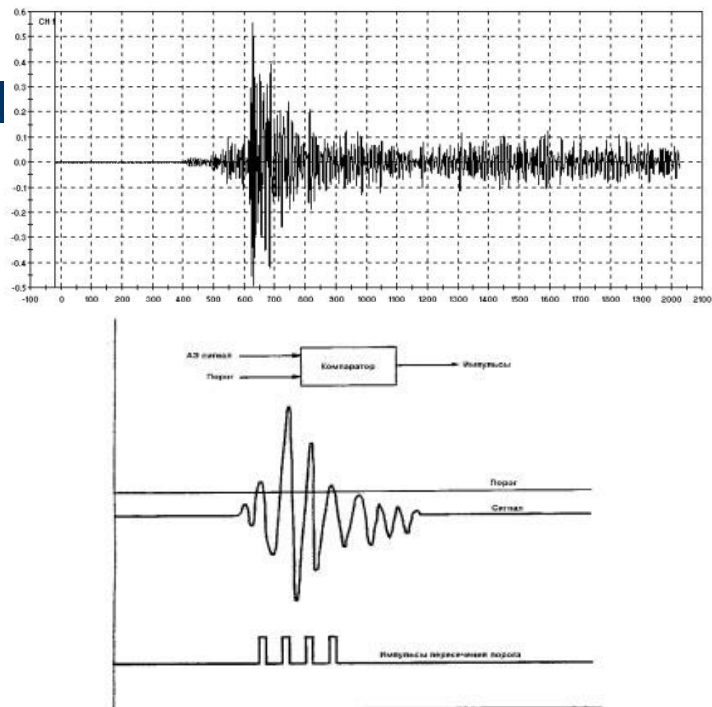
Схема реєстрації сигналів АЕ при розвитку дефекту структури матеріалу під дією навантаження



При розвитку дефекту, коли його розміри наближаються до критичного значення, амплітуда сигналів АЕ і темп їх генерації різко збільшуються.

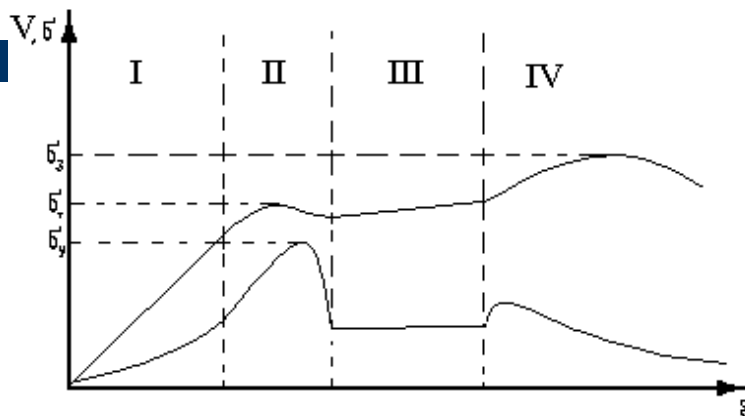
4

Сигнали АЕ



5

Акустична емісія при деформації матеріалів



I - пружна деформація матеріалу (характерна для всього матеріалу)

II - плинність матеріалу (масове руйнування мікроділянок).

Збільшення сигналів акустичної емісії.

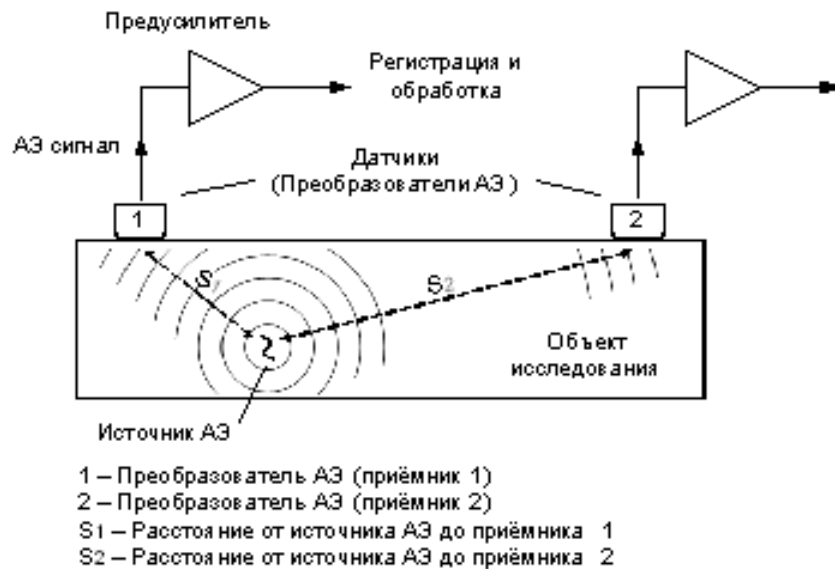
III - матеріал продовжує руйнуватися, розтягується.

Сигнали акустичної емісії різко падають.

IV - розрив матеріалу (розрив зв'язку між матеріалами).

6

Визначення координат дефектів



Основні параметри АЕ

1. Число імпульсів за час спостереження N_{Σ} ;
2. Активність сигналів АЕ – кількість імпульсів за певний інтервал часу.

3. Швидкість рахунку $\dot{N}_{\Sigma} = \frac{dN_{\Sigma}}{dt}$

4. Ефективне значення акустичної емісії – цей параметр характеризує амплітуду імпульсів АЕ та їх кількість. Він чисельно дорівнює добутку середнього значення амплітуди сигналу АЕ на інтервал часу.

5. Амплітудний розподіл сигналу акустичної емісії. Показує, скільки сигналів і якої амплітуди надійшло.

Класифікація джерел АЕ

Виявлені і ідентифіковані джерела АЕ розділяють на чотири класи:

- Джерело I класу - пасивне джерело.
- Джерело II класу - активне джерело.
- Джерело III класу - критично активне джерело.
- Джерело IV класу - катастрофічно активне джерело.

9

Рекомендовані дії при виявленні джерел АЕ в залежності від класу небезпеки

Джерело	Клас	Рекомендовані дії
пасивне	I	1. реєструють для аналізу динаміки його подальшого розвитку
активне	II	1. реєструють і стежать за розвитком ситуації в процесі виконання даного контролю; 2. відзначають в звіті і записують рекомендації з проведення додаткового контролю з використанням інших методів.
критично активне	III	1. реєструють і стежать за розвитком ситуації в класу процесі виконання даного контролю; 2. вживають заходів з підготовки можливого скидання навантаження.
катастрофічно активне	IV	1. виробляють негайне зменшення навантаження до 0, або до величини, при якій клас джерела АЕ знизиться до рівня II або III класу; 2. після скидання навантаження проводять огляд об'єкту і при необхідності контроль іншими методами.

10

Метод АЕ застосовується для контролю:

1. Ємнісного, реакторного, теплообмінного обладнання хімічних, нафтохімічних і нафтопереробних виробництв;
2. Ізотермічних сховищ;
3. Сховищ зріджених вуглеводневих газів під тиском;
4. Резервуарів нафтопродуктів і агресивних рідин;
5. Обладнання аміачних холодильних установок;
6. Технологічних трубопроводів (газопроводів, продуктопроводів, промислових магістральних трубопроводів нафти і газу, трубопроводів пари і гарячої води);

11

Характерні особливості методу АЕ контролю

- метод забезпечує виявлення і реєстрацію дефектів, які тільки розвиваються, що дозволяє класифікувати дефекти не за розмірами, а за ступенем їх небезпеки;
- метод має високу чутливість до зростаючих дефектів – дозволяє виявити в робочих умовах приріст тріщини порядку долей мм;
- інтегральність методу забезпечує контроль всього об'єкта з використанням перетворювачів, нерухомо встановлених на об'єкті;
- метод дозволяє проводити контроль різних технологічних процесів і процесів зміни властивостей матеріалів;
- положення і орієнтація об'єкта не впливає на виявлення дефектів;
- метод має менше обмежень, пов'язаних з властивостями і структурою матеріалів;

12

Складність застосування методу АЕ

- **Складність виділення сигналів АЕ на фоні завад.**

Це пояснюється тим, що сигнали АЕ є шумоподібними, оскільки АЕ є стохастичний імпульсний процес.

Тому, коли сигнали АЕ малі за амплітудою, виділення корисного сигналу з завад є складним завданням.

Слід відрізняти АЕ від акустичних хвиль, які виникають у конструкціях від ударів, тертя. Ці хвилі є завадами, тому, що не пов'язані з внутрішніми процесами в ОК.

13

Схеми застосування акустико-емісійного методу контролю

1. **АЕ контроль об'єкта.** У разі виявлення джерел АЕ в місці їх розташування проводять контроль одним з регламентованих методів неруйнівного контролю. Дану схему рекомендується використовувати при контролі *об'єктів, що знаходяться в експлуатації*.

2. У разі наявності в об'єкті дефекту, виявленого одним з методів НК, метод АЕ використовують для **стеження за розвитком цього дефекту**.

3. Метод АЕ застосовують **при пневмо- та гідровипробуваннях об'єкта як супроводжуючий метод**, що підвищує безпеку проведення випробувань.

4. Метод АЕ може бути використаний для **оцінки залишкового ресурсу** та вирішення питання щодо можливості подальшої експлуатації об'єкта. Оцінка ресурсу проводиться з використанням спеціально розроблених методик, погоджених в установленому порядку.

14

Оцінка результатів АЕ контролю

1. **АЕ контроль об'єкта.** У разі виявлення джерел АЕ в місці їх розташування проводять контроль одним з регламентованих методів неруйнівного контролю. Дану схему рекомендується використовувати при контролі *об'єктів, що знаходяться в експлуатації*.

2. У разі наявності в об'єкті дефекту, виявленого одним з методів НК, метод АЕ використовують для **стеження за розвитком цього дефекту**.

3. Метод АЕ застосовують **при пневмо- та гідровипробуваннях об'єкта як супроводжуючий метод**, що підвищує безпеку проведення випробувань.

4. Метод АЕ може бути використаний для **оцінки залишкового ресурсу** та вирішення питання щодо можливості подальшої експлуатації об'єкта. Оцінка ресурсу проводиться з використанням спеціально розроблених методик, погоджених в установленому порядку.

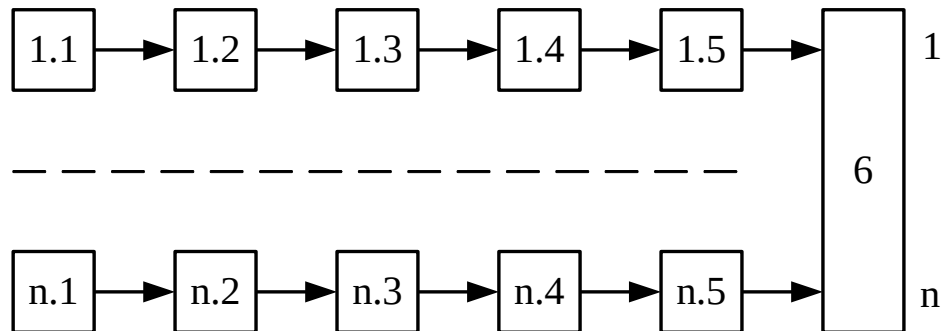
15

Порівняльна оцінка методів неруйнівного контролю і методу акустичної емісії

Традиційні методи НК	Метод акустичної емісії
Велика трудомісткість підготовчих робіт і контролю	Трудомісткість підготовчих робіт і контролю в десятки (сотні) разів менше
Неможливість розпізнавання дефектів, які розвиваються під дією експлуатаційних навантажень	Виявляються і локалізуються найбільш небезпечні види дефектів (дефекти, що розвиваються під дією експлуатаційних навантажень)
Для проведення контролю потрібно повне припинення експлуатації об'єкта	Контроль може здійснюватися в умовах реальної експлуатації або при впливі еквівалентних випробувальних навантажень при короткочасній зупинці

16

Схема багатоканальної системи АЕ контролю



- 1 – перетворювач (п'єзоелектричний);
2 – попередній підсилювач; 3 – фільтр;
4 – підсилювач; 5 – блок обробки інформації;
6 – блок визначення місця розташування дефекту.

17

Особливості перетворювачів АЕ

Сигнали АЕ знаходяться в діапазоні частот (0,5..1) МГц, і рідко перевищують 2 МГц.

Перетворювач повинен бути широкопasmовим, для передачі коротких АЕ імпульсів.

Попередній підсилювач розташовується поруч з перетворювачем, його завдання забезпечити передачу сигналу по кабелю з високим ступенем завадостійкості.

Основне завдання підсилювача забезпечити необхідний рівень сигналу для обробки сигналу, по потужності і рівномірної частотної характеристики.

В підсилювачі придушуються перешкоди. Залежно від досліджуваного параметра АЕ вибирається потрібний алгоритм обробки інформації.

Блок вимірювання координат дефекту використовує алгоритм кореляційної обробки між окремими інформаційними каналами

18

Акустичні прилади та системи -1

Розділ 2 Акустичні методи неруйнівного контролю

Лекція 17-18

Особливості практичного застосування активних методів неруйнівного контролю:

- **Методика контролю**
- **Контроль основних видів металевих виробів**

1

1. Методика контролю

- **вибір схеми контролю:** метод; тип хвиль; поверхня; кут введення.
- **вибір типу апаратури:** залежить від методу; апаратура має мати параметри (частота, чутливість), передбаченими методикою контролю, включати в себе перетворювачі і зразки, необхідні для налаштування;
- **підготовка виробу до контролю:** формулювання вимог до якості поверхні, поділ великих виробів на ділянки контролю;
- **підготовка апаратури:** перевірка апаратури, вибір та налагодження частоти, чутливості, швидкості розгортки і інших параметрів;
- **правила пошуку дефектів:** вибір траєкторії, кроку і швидкості сканування;
- **правила дослідження дефектів:** вибір параметрів дефектів, (місце розташування, розміри та ін.) і способів їх вимірювання;
- **оцінка результатів контролю.** Кінцевий результат - відбраковування виробів. У нормах вказуються параметри дефектів, вимірювання яких можливо при УЗ-контролі.

2

Вибір схеми контролю

Чинники, які мають бути враховані при виборі схеми контролю:

- 1) перетворювач повинен переміщуватись по відносно рівній поверхні;
- 2) повинна бути прозвучена кожна точка об'єму виробу, що підлягає контролю;
- 3) для підвищення надійності виявлення різноорієнтованих дефектів кожную точку бажано прозвучувати в декількох напрямках.

3

Вибір методу контролю: *ехоімпульсний метод*

Найбільше застосування для перевірки металів знаходить *ехоімпульсний метод* (більше 80% металопродукції).

Інші методи УЗ-контролю застосовують у випадках, коли вони:

- 1) дають кращі результати;
- 2) вирішують завдання, де використання ехометоду ускладнено;
- 3) використовуються як додаткові до ехометоду для більш повного виявлення і дослідження дефектів.

4

Вибір методу контролю: *тіньовий метод*

• *тіньовий метод:*

- багатопарові вироби, оскільки багаторазові відбиття від границь між шарами заважають застосуванню ехометодом;
- великі дефекти матеріалів з великим рівнем структурних завад, що не дозволяють виявити навіть донний сигнал при контролі ехометодом;
- для автоматичного контролю виробів типу листів, оскільки використовується для реалізації цих методів багатоканальна апаратура простіша і дешевша.

• *дзеркально-тіньовий метод:*

- виявляються дефекти, що дають слабе відбиття.
- є доповненням до ехометоду.
- метод також застосовують самостійно, наприклад для контролю рейок на вертикальні дефекти.

5

Вибір типу хвиль: *поздовжні та поперечні*

Застосовують для виявлення дефектів в товщі і поблизу поверхні виробів, товщина яких значно перевершує довжину хвилі.

Поздовжні хвилі використовують, коли хвилі необхідно ввести перпендикулярно або під невеликим кутом до поверхні.

Поперечні – коли кут введення повинен бути значним ($> 35^\circ$).

Переваги застосування поперечних хвиль:

- 1) менша довжина хвилі (при постійній частоті), що підвищує чутливість до виявлення дефектів;
- 2) можливість виявлення вертикально орієнтованих дефектів;
- 3) можливість дослідження важкодоступних ділянок (зварювальне з'єднання);

Там, де потрібно зменшити затухання доцільно використовувати поздовжні хвилі.

6

Вибір типу хвиль: *поздовжні та поперечні*

Застосовують для виявлення дефектів в товщі і поблизу поверхні виробів, товщина яких значно перевершує довжину хвилі.

Поздовжні хвилі використовують, коли хвилі необхідно ввести перпендикулярно або під невеликим кутом до поверхні.

Поперечні – коли кут введення повинен бути значним ($> 35^\circ$).

Переваги застосування поперечних хвиль:

- 1) менша довжина хвилі (при постійній частоті), що підвищує чутливість до виявлення дефектів;
- 2) можливість виявлення вертикально орієнтованих дефектів;
- 3) можливість дослідження важкодоступних ділянок (зварювальне з'єднання);

7

Там, де потрібно зменшити затухання доцільно використовувати поздовжні хвилі.

Вибір типу хвиль: *поверхневі хвилі*

Використовують для виявлення дефектів, які виходять на поверхню або залягають на глибині не більше довжини хвилі. Вони слідує всіх вигинів поверхні ОК.

Контроль поверхневими хвилями доцільний, коли застосування магнітних, вихрострумових і капілярних методів ускладнено, наприклад коли контрольована поверхня важкодоступна для огляду.

Приклади ефективного застосування поверхневих хвиль – експлуатаційний контроль турбінних лопаток в кожусі турбіни, паливних баків, глибини проплавлення зварювальних швів.

Поверхневі хвилі ослаблюються повільно і добре реєструють дефекти на відстані 0,5 ... 2 м від точки введення.

Загасання в матеріалі – такого ж порядку, як для об'ємних хвиль. Додаткове загасання (розсіювання) спостерігається, якщо поверхня нерівна, забруднена, увігнута.

8

Вибір типу хвиль: *головні хвилі*

Застосовують для виявлення *підповерхневих дефектів*.

Вони швидко згасають з відстанню з причини трансформації в бічні поперечні хвилі в кожній точці поверхні.

Можливо виявлення дефектів на глибині 1...10 мм від поверхні.

Для збудження і прийому головних хвиль зазвичай застосовують похилі РС-перетворювачі з кутом падіння, рівним першому критичному.

Виявлення дефектів під: 1) валиком опуклості зварювального шва, 2) дрібною різьбою, 3) антикорозійним наплавленням.

Приклад. Перетворювач головних хвиль з частотою 5 МГц. Перетворювач не має мертвої зони. На глибинах 0,5 ... 29,5 мм від поверхні в бета-титані (має високий рівень структурних завад) виявляються плоскодонні отвори діаметром 0,8 мм.

9

Вибір типу хвиль: *хвилі в пластинах і стрижнях*

Хвилі в пластинах на частотах порядку декількох мегагерц застосовують для контролю листів, оболонок судин, труб товщиною < 3 ... 6 мм. Хвилі в пластинах дозволяють виявляти дефекти, розташовані як поперек, так і вздовж пластини (типу розшарування). Для контролю зазвичай застосовують нижчі моди хвиль Лемба.

Хвилі в стрижнях застосовують для контролю тонких прутків, дроту. Подібні їм хвилі використовують для контролю труб і рейок на великих відстанях (порядку 20 ... 50 м). У цих випадках частоту знижують з мегагерцевого діапазону до десятків кілогерц.

10

Підготовка до контролю

Для ручного контролю необхідно:

- 1) дефектоскоп;
- 2) відповідні перетворювачі;
- 3) зразки для настройки і перевірки апаратури;
- 4) контактна рідина і пристосування для її нанесення;
- 5) масштабна лінійка;
- 6) олівець і папір для запису результатів;
- 7) маркер для розмітки поверхні;
- 8) додаткові пристосування (АВД діаграми перетворювачів)

11

Параметри апаратури, що підлягають налаштуванню та перевірці

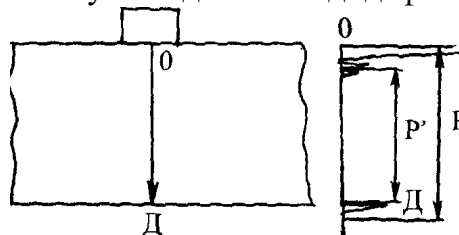
1. Частота УЗ.

Частоту УЗ вибирають якомога вищою, оскільки ефективно виявляються дефекти розміром більше половини довжини хвилі.

Підвищенню частоти перешкоджають збільшення загасання УЗ у виробі і погіршення проходження УЗ через його нерівну поверхню.

2. Налаштування розгортки.

Розгортка повинна бути налаштована так, щоб весь шлях УЗ-імпульсу, на якому можуть виникнути відбиття від дефектів, було видно на екрані дефектоскопа.



12

Параметри апаратури, що підлягають налаштуванню та перевірці

3. Налаштування чутливості.

Визначає можливість виявлення мінімальних дефектів.

Для налаштування чутливості апаратури найбільш зручно використовувати зразки з матеріалу виробу. Бажано, щоб штучні дефекти в зразках імітували природні.

У практиці контролю застосовують поняття "рівень фіксації" (або контрольний рівень) – це площа плоскодонного відбивача, який повинен виявлятися дефектоскопом у всьому контрольованому виробі.



13

Підготовка поверхні

Оптимальна шорсткість поверхні для контролю контактним способом прямим перетворювачем $Rz\ 10 - 20\ \mu\text{м}$, а похилим перетворювачем $Rz\ 20 - 40\ \mu\text{м}$.

Більш гладка поверхня небажана, оскільки при русі перетворювач буде зшкрібати контактну рідину, попередньо нанесену на поверхню виробу.

Грубіша, ніж рекомендовано, поверхня призведе до нестабільності акустичного контакту.

Вироби з грубою поверхнею краще контролювати на знижених частотах, застосовувати в цьому випадку як контактну рідину густіші масла або гліцерин.

При контролі щілинним і особливо імерсійним способами шорсткість поверхні допускається значно більша, ніж при контактному способі.

14

Контактні рідини

- гліцерин;
- мастило на основі шпалерного клею;
- мастило на основі декстрину;
- технічні масла: трансформаторне масло, автол, солідол;
- феромагнітна рідина;
- водяний гель (консистенція гелю приблизно така ж, як у солідолу, але він абсолютно нешкідливий, не залишає ніяких плям, але викликає іржавіння заліза).

15

Проведення контролю

Пошук дефектів ведуть шляхом переміщення перетворювача по поверхні виробу або виробу щодо перетворювача - скануванням.

Переміщення здійснюють так, щоб виявити дефекти у всьому об'ємі контрольованого матеріалу.

Крок сканування зазвичай не більше півширини п'єзoeлементa перетворювача. Швидкість ручного сканування $< 150 \text{ мм / с}$,

Ознаками виявлення дефектів є:

- при контролі методами відбиття – поява на розгортці в зоні контролю ехосигнала вище рівня фіксації;
- при контролі ЗТ-методом - зменшення донного сигналу;
- при контролі тіньовим методом - зменшення наскрізного сигналу до рівня, меншого рівня фіксації.

Рівень фіксації повинен перевищувати рівень перешкод не менше ніж в 2 рази

16

Оцінка якості

Застосовують одно- і дворівневу системи оцінки якості за результатами контролю.

За *однорівневою* системою виробу відносять або до придатних, або до бракованих.

За *дворівневою* системою виробу за результатами контролю оцінюють балами (від 1 до 3). 3 бали – виріб безумовно придатний; 1 – безумовно бракований; 2 – про дефекти потрібна додаткова інформація.

приклад: проводиться автоматичний контроль листів тіньовим методом. Рівень фіксації задають по зменшенню амплітуди наскрізного сигналу до певного рівня, наприклад на 6 дБ.

Якщо амплітуда наскрізного сигналу зменшилася на 6 дБ або ще сильніше, то дана ділянка містить дефект, допустимість якого оцінюють по умовній площі дефектної ділянки, сумарній площі всіх дефектних ділянок, відстаням між дефектними ділянками.

17

Оформлення результатів контролю

Результати контролю виробу фіксуються в *журналі* і в *протоколі* з контролю.

Висновок про якість необхідно записати в альтернативній формі: відповідає чи ні виріб технічним вимогам. Дефектні місця у виробі повинні бути відзначені.

Всі названі документи за результатами контролю підписує фахівець другого або третього рівня кваліфікації, відповідальний за контроль.

Дефектограми (ескіз виробу, на якому зображені виявлені дефекти) в разі необхідності повинні додаватися до запису в журналі і висновку з контролю.

Висновок за результатами контролю має містити такі відомості:

- про контрольований виріб (назва, тип, номер, матеріал);
- про засоби і способи контролю; - про результати контролю;
- загальний висновок про якість; - про осіб, які виконали контроль.

18

Контроль листового прокату

Листовий прокат на металургійних заводах-постачальниках контролюють відповідно до ГОСТ 12503-75 і ГОСТ 22727-88. Зазвичай УЗ-контроль ведуть з використанням автоматизованих установок.

В автоматизованих установках УЗ-контролю лист рухається по рольгангу в ванні, заповненій водою, і проходить між двома акустичними лінійками з наборами перетворювачів.

На підприємствах-споживачах, якщо це необхідно, виконують ручний контроль листів і листових деталей. Особливість ручного контролю полягає в тому, що листи прозвучують зазвичай тільки прямим перетворювачем для виявлення дефектів, орієнтованих в площині прокату. Контроль проводять одночасно ехометодом і дзеркально-тіньовим методом.

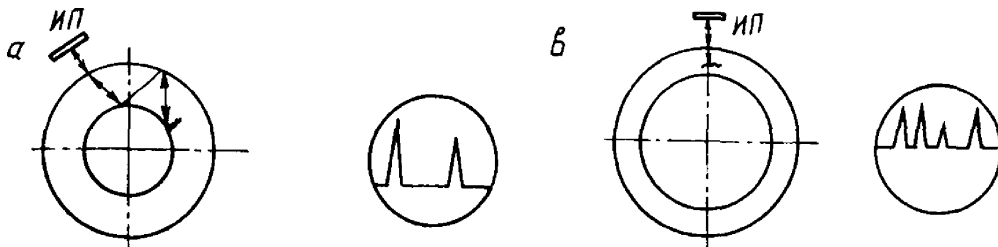
Частоти 2 ... 5 МГц, рівень фіксації $\geq 3 \text{ мм}^2$.

19

Контроль труб

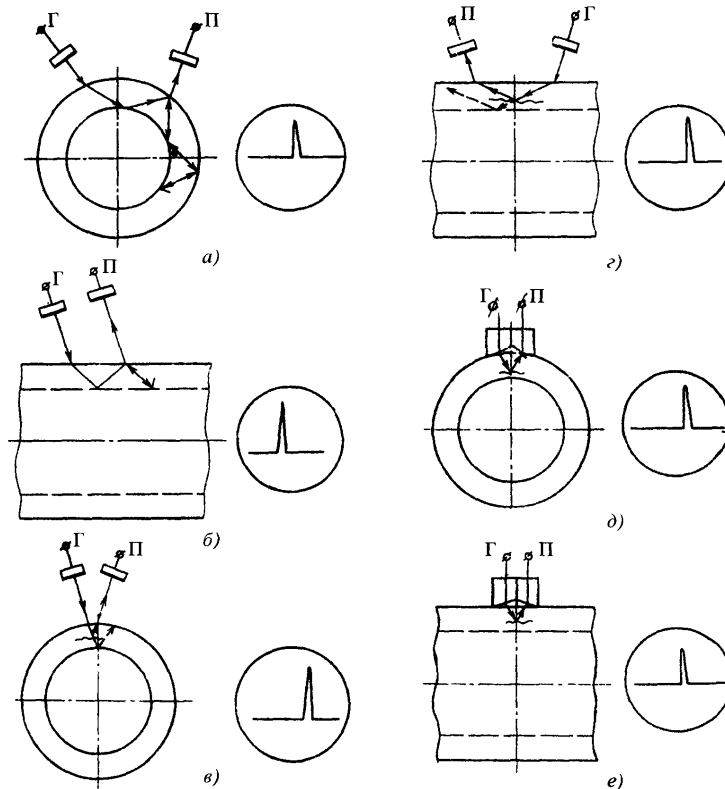
УЗ-контроль – основний метод контролю суцільності труб (ГОСТ 17410-78).

З його допомогою виявляють 1) внутрішні дефекти в стінці труби, а також 2) більшість дефектів на внутрішній і зовнішній поверхні. Зазвичай УЗ-контроль труб застосовують в комплексі з іншими методами дефектоскопії (візуальним, методом вихрових струмів).



20

Контроль труб



21

Вимірювання товщини виробів

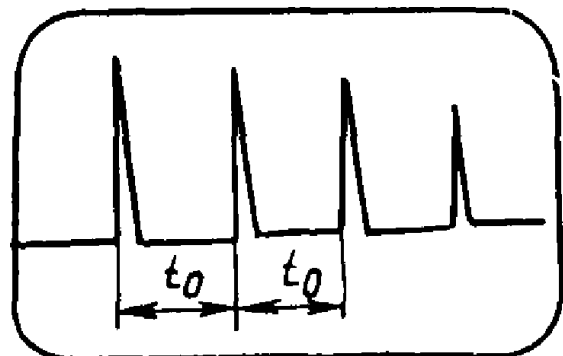
Методи:

1) *ехоімпульсний*:

- за тривалістю проходження УЗ-імпульсу ($f = 5-10$ МГц; $\Delta = 0,1$ мм)
- за частотою повторення багаторазових відбиттів. ($h = 1$ мм; $\Delta = 0,02$ мм)

2) *резонансний* ($h = 0,1 \dots 300$ мм; $\Delta = (0,1 - 3)\%$ від h);

3) *тіньовий* метод (рідко).



22

Контроль зварювальних з'єднань

Шви зварювальних з'єднань – один з масових об'єктів УЗ-контролю.

УЗ-контроль зварних швів проводять відповідно до ГОСТ 14782-76 що регламентує методику контролю та критерії оцінки якості швів за його результатами.

* Підготовка до контролю:

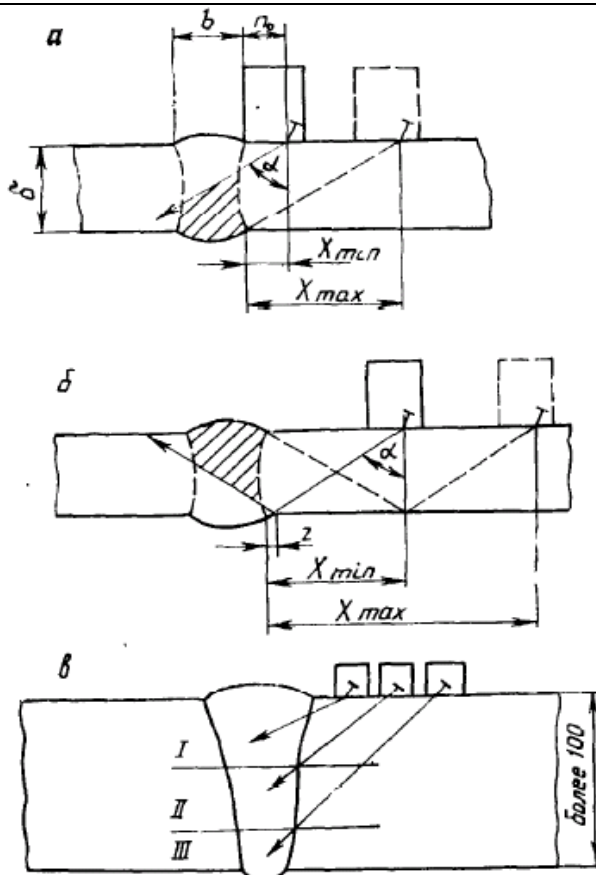
1) вибір основних параметрів контролю і параметрів сканування виходячи з типорозмірів з'єднання, що підлягає контролю, і наявної (НТД) на контроль;

2) настройка дефектоскопа по контрольних зразках на задані параметри;

3) очищення поверхні сканування від бризок металу, бруду, що відшаровується окалини;

4) нанесення контактує мастильного матеріалу на поверхню сканування; забезпечення зручних умов для проведення контролю.

23



24

Контроль стикових з'єднань

Параметри дефектоскопа та похилих перетворювачів для контролю стикових з'єднань

Зварювальні стикові з'єднання зазвичай контролюють *ехоімпульсним* методом *похилим суміщенням* перетворювачем з двох сторін шва і по одній поверхні стику при цьому застосовують прямий і одноразово відбитий промені

Номинальная толщина свариваемых элементов, мм	Частота, МГц	Размер пьезопластины, мм	Угол ввода, °	Уровень фиксации, мм ²
2 ... 3,5	10	3 ... 4	70 ... 75	0,5 ... 1
3,5 ... 10	4 ... 5	4 ... 6	60 ... 70	1 ... 2
10 ... 60	2 ... 2,5	10 ... 15	50 ... 70	2 ... 7
60 ... 200	1,5 ... 2	15 ... 20	35 ... 50	7 ... 15
200 ... 2000	1 ... 1,5	30 ... 50	35 ... 45	15 ... 50

Контроль кутових з'єднань

