

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

ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ДІАГНОСТИКИ

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для
здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Електронні компоненти, пристрої та системи» спеціальності
G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка

Укладач: С.Р. Михайлов

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 620.179.16

E45

Укладач: *Михайлов Сергій Ростиславович*, канд. техн. наук., доц.

Рецензент: *Трапезон К.О.*, канд. техн. наук, доц., доцент
кафедри акустичних та мультимедійних електронних
систем факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний
редактор: *Кузьмичев А.І.*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 08.05.2026 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол № 04/2026 від 20.04.2026 р.)*

E45 **Електронні системи контролю якості та діагностики** [Електронний ресурс] : лаб. практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Електронні компоненти, пристрої та системи» спец. G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.Р. Михайлов. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 45 с.

У навчальному посібнику наведено рекомендації до виконання комплексу лабораторних робіт з дисципліни «Електронні системи контролю та діагностики», які виконуються на сучасному ультразвуковому дефектоскопі. Тематика лабораторних робіт присвячена дослідженню луно-імпульсного методу дефектоскопії, вимірюванню швидкості розповсюдження та коефіцієнта згасання поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль в різних матеріалах, вимірюванню діаграми направленості п'єзоелектричного перетворювача, визначенню координат відбивачів у зразках та товщини зразків. Наприкінці кожної лабораторної роботи наведено перелік контрольних питань, які спрямовані на закріплення знань та розвиток практичних навичок роботи з ультразвуковим обладнанням.

Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, а також буде корисним студентам інших спеціальностей та фахівцям у галузі ультразвукового контролю.

УДК 620.179.16

Реєстр. № НП 25/26-363. Обсяг 2 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 1. Вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль.....	6
Лабораторна робота № 2. Вимірювання коефіцієнта згасання ультразвукових хвиль.....	15
Лабораторна робота № 3. Вимірювання діаграми направленості п'єзоелектричного перетворювача ультразвукового дефектоскопа.....	24
Лабораторна робота № 4. Вимірювання глибини за допомогою ультразвукового дефектоскопа.....	28
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	35
ДОДАТОК. Опис та технічна характеристика ультразвукового дефектоскопа УД2-12.....	36

ВСТУП

Рівень промислового розвитку передових країн визначається не тільки обсягом виробництва і асортиментом продукції, а і показниками її якості. Забезпечення високої якості промислової продукції можливе за рахунок широкого впровадження у виробництво ефективних систем неруйнівного контролю якості і діагностики в циклі «виготовлення - експлуатація - ремонт». З метою підвищення якості виробів підприємства постійно збільшують обсяги операції неруйнівного контролю та діагностики, а також збільшують кількість персоналу, зайнятого такими операціями. У деяких галузях промисловості витрати на контроль та діагностику продукції складає 25...35 % її загальної вартості.

Серед обладнання для проведення неруйнівного контролю якості та діагностики значне місце займають електронні системи, які для контролю використовують різноманітні електромагнітні випромінювання та поля: радіохвильове, електростатичне, магнітне, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське тощо. Широке використання отримали також методи та системи акустичного контролю, серед яких одним з основних є ультразвуковий контроль. Ультразвуковим методам контролю властиві високі чутливість та продуктивність; здатність виявляти внутрішні дефекти у виробках значної товщини; можливість контролю при односторонньому доступі; відносно низька вартість обладнання та безпека персоналу.

Тому дисципліна «Електронні системи контролю якості та діагностики», яка належить до обов'язкових компонентів циклу професійної підготовки, займає важливе місце в підготовці магістрів зі спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка. Вивчення цієї дисципліни, як і будь-якої іншої, неможливе без застосування теоретичного матеріалу на практиці.

Метою лабораторних робіт з дисципліни «Електронні системи контролю якості та діагностики» є закріплення та поглиблення теоретичних знань по

принципах дії та побудови, параметрам і характеристикам сучасних систем ультразвукового контролю, а також набуття практичних навичок для роботи з таким обладнанням.

У навчальному посібнику наведено рекомендації до виконання комплексу з 4-х лабораторних робіт, які виконуються на сучасному ультразвуковому дефектоскопі та мають спільний зміст: мету роботи, перелік апаратури та зразків, теоретичні відомості по роботі, методика проведення вимірювань, порядок виконання роботи, вимоги до звіту по роботі, контрольні запитання. Навчальний посібник містить також додаток – детальний опис та технічну характеристику ультразвукового дефектоскопа, що дозволяє отримати практичні навички для роботи з таким обладнанням.

Лабораторна робота № 1

Вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль

Мета роботи: вивчення параметрів ультразвукових коливань і експериментальне вимірювання швидкості поздовжньої й поперечної хвиль в зразках з різних матеріалів.

Апаратура і зразки, які використовуються в роботі: дефектоскоп ультразвуковий типу УД2-12; прямий п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) на частоту 2,5 МГц типу П111-2,5ДО12-002; похилий ПЕП на частоту 2,5 МГц із кутом уведення променя $\alpha = 50^\circ$ типу П121-2,5-50°-002; кабелі до ПЕП; стандартні зразки типу СО-1, СО-2 та СО-3; мінеральне масло.

1.1. Теоретичні відомості

Вимірювання швидкості ультразвукових коливань або ультразвуку в зразках з різних матеріалів виконують луно-імпульсним методом. Швидкість ультразвуку для різних типів хвиль можна розрахувати по пружним константам матеріалу середовища, а саме: по модулю пружності E , Н/м; щільності ρ , кг/м³ і коефіцієнту Пуассона μ (безрозмірна величина) [1,2].

Так, для поздовжніх хвиль швидкість ультразвуку визначається за формулою:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-\mu)}}, \quad (1.1)$$

для поперечних хвиль -

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}}. \quad (1.2)$$

Однак визначення швидкості ультразвуку за формулами (1.1) і (1.2) зводиться до вимірювання значень E , ρ і μ , що пов'язано з певними труднощами.

Луно-імпульсний метод дозволяє визначити швидкості C_l і C_t експериментальним шляхом. Хвиля, що введена у вигляді зондувального імпульсу (ЗІ) коливань у об'єкт контролю (ОК), дійшовши до внутрішніх відбивачів (дефекти, грані поверхонь), у загальному випадку буде відбиватися у вигляді луно-імпульсу (ЛІ) ультразвукових коливань. При глибині залягання відбивача H и часу проходження хвилі τ від точки введення в деталь до відбивача й назад швидкість поздовжньої хвилі C_l (рис. 1.1) визначиться за формулою:

$$C_l = \frac{2H}{\tau - 2t_{\Pi}}; \quad (1.3)$$

поперечної хвилі C_t (рис. 1.2) –

$$C_t = \frac{2H}{(\tau - 2t_{\Pi}) \cos \alpha}, \quad (1.4)$$

де: $2t_{\Pi}$ - час проходження імпульсу ультразвуку через призму ПЕП в обох напрямках (акустична затримка), с; α - кут введення променя в середовище.

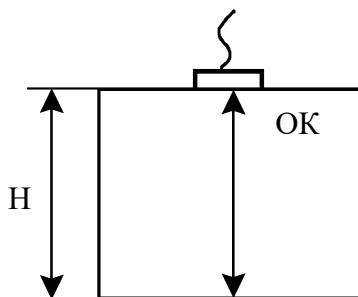


Рис. 1.1. Схема проходження поздовжньої хвилі в ОК

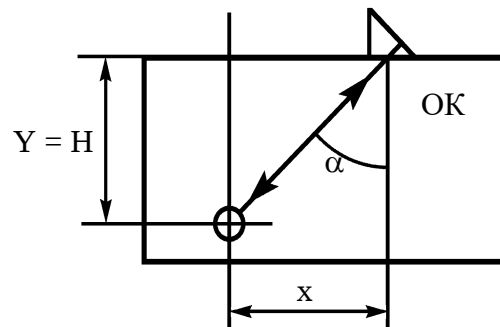


Рис. 1.2. Схема проходження поперечної хвилі в ОК

Формули (1.3) и (1.4) є основою непрямого вимірювання швидкостей C_L та C_t в різних зразках. Для визначення швидкостей C_L и C_t необхідно виміряти глибину H , час τ , знати або виміряти значення часу $2t_n$ і кут α . Акустична затримка $2t_n$ при вимірюванні швидкості C_L мала, тому нею можна знехтувати. Однак при деяких способах вимірюванні швидкості C_t вона може бути порівнянна з часом τ і її треба враховувати. Очевидно, що в будь-якому випадку непряме визначення швидкості буде наближеним.

1.1.1. Спосіб непрямого вимірювання швидкості поздовжньої хвилі в зразках із плоскопаралельними гранями

Швидкість C_L цим способом можна виміряти з використанням багатократного відбиття від донної поверхні ультразвукових хвиль, які випромінюються прямим ПЕП, установленим на протилежну грань зразка (рис. 1.3).

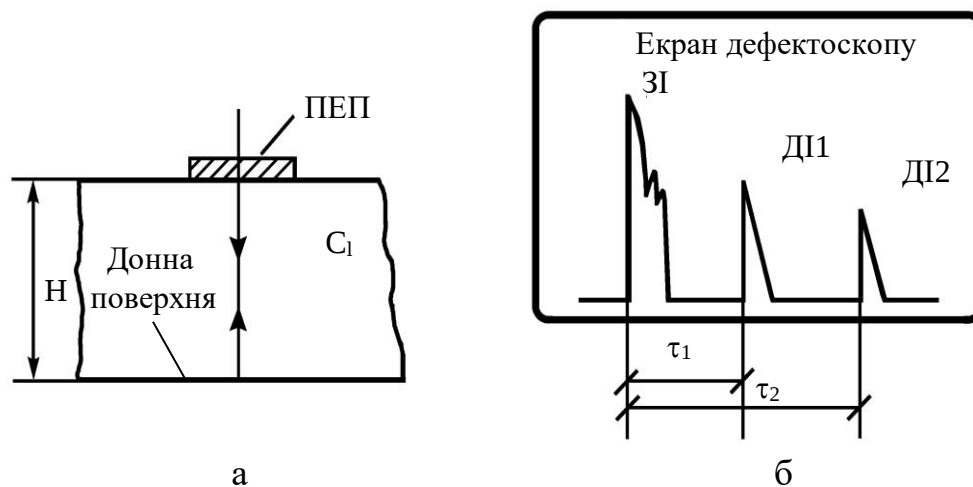


Рис. 1.3. Схема визначення швидкості поздовжньої хвилі за допомогою прямого ПЕП

Застосовуючи формулу (1.3) для першого і другого донних імпульсів (ДІ), одержуємо:

$$C_L = \frac{2H}{(\tau_2 - 2t_n) - (\tau_1 - 2t_n)} = \frac{2H}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (1.5)$$

З рівняння (1.5) видно, що величину швидкості C_1 можна отримати, вимірюючи значення часових інтервалів τ_1 та τ_2 від зондувального імпульсу до першого й другого донних луно-сигналів.

Зазначені операції на дефектоскопі УД2-12 виконуються блоком цифрового відліку (БЦВ) у режимі "S" з використанням строба автоматичної сигналізації дефекту (АСД) і (або) ручного стробування. Перетворення рівняння (1.5) показують, що в цьому випадку визначення часу $2t_n$ не потрібно і регулятор «0» на блоці А6 при вимірюванні τ_1 та τ_2 може перебувати в будь-якому положенні (крім крайніх), що задовольняє умові $\tau_1 > 2t_n$. У іншому випадку БЦВ не може визначити інтервал τ_1 і іноді τ_2 .

1.1.2. Спосіб непрямого вимірювання швидкості поперечної хвилі

Використовуються зразок із плоскопаралельними гранями і відбивач - двогранний кут. Схема прозвучування наведена на рис. 1.4, а, при якій можливі випадки одноразового відбиття та дворазового відбиття променя (положення ПЕП U_1 та U_2 відповідно).

У положенні ПЕП U_1 час ($\tau - 2t_n$) відповідає часу проходження луно-імпульсу ультразвукових коливань безпосередньо в зразку, де τ - час проходження хвилі від п'єзопластини до відбивача й назад, воно вимірюється дефектоскопом і містить у собі акустичну затримку $2t_n$, обумовлену матеріалом призми ПЕП. Акустичну затримку необхідно знати заздалегідь. Дефектоскоп УД2-12 дозволяє компенсувати її шляхом зсуву нуля глибиноміру щодо зондувального імпульсу за допомогою регулятора «0» на блоці А6 верхньої панелі дефектоскопа. Для компенсації значення $2t_n$ необхідно послідовно виконати наступні операції:

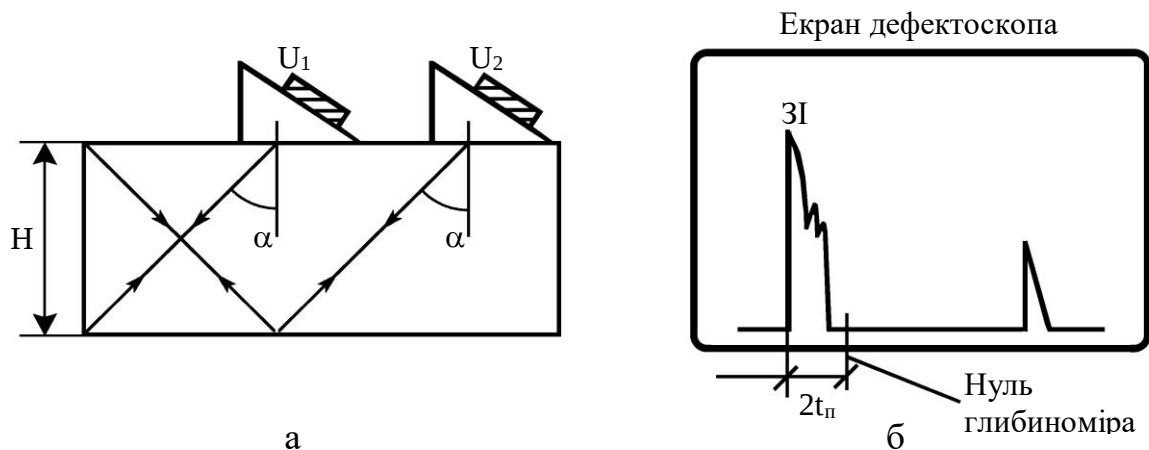


Рис. 1.4. Схема прозвучування зразка із плоскопаралельними гранями

1. Встановити ПЕП на верхню поверхню напівкруглого стандартного зразка СО-3 так, щоб відбиття ультразвукових коливань здійснювалося від напівкруглої поверхні дна зразка і перший відбитий сигнал досягав максимального значення.
2. Довести амплітуду сигналу до певного рівня, наприклад до середини екрану, але не менше двох великих клітин на екрані ЕПТ (виконується за допомогою кнопок «Ослаблення dB» і (або) регулятора «D» на блоці А8).
3. Застробувати сигнал стробом АСД (регулятори «ГЧ» і «ЧЧ»- на блоці А10) або ручним стробуванням (регулятор «ГЧ» - на передній панелі).
4. Регулятором «0» на блоці А6 виставити на БЦО в режимі «μS» час поширення ультразвукових коливань 33,7 мкс (радіус зразка СО-3 - 55 мм).

1.1.3. Таблиця способів непрямого вимірювання швидкостей C_l і C_t

Способи вимірювання швидкостей C_l і C_t є основними і наведені в табл.

- 1.1. Для вимірювання швидкості C_l вимірюють значення часових інтервалів τ_1 та τ_2 від зондувального імпульсу до першого та другого донних луно-сигналів (рис. 1.3, б). Далі за формулою (1.5) розраховують швидкість C_l . Для вимірювання швидкості C_t вимірюють час проходження хвилі від п'єзопластини до двогранного кута τ . Далі за формулою (1.4) розраховують швидкість C_t .

Таблиця 1.1

Способи непрямого вимірювання швидкостей C_l і C_t

Хвиля	Поздовжня	Поперечна
Метод вимірювання	Луно-імпульсний	
Принцип вимірювання	За двома донними сигналами у зразку із плоскопаралельними поверхнями	По луно-сигналу від кутового відбивача на глибині Н
Розрахункова формула	$C_l = \frac{2H}{\tau_2 - \tau_1}$	$C_t = \frac{2H}{(\tau - 2t_{\text{п}}) \cos \alpha}$
Порядок вимірювання швидкості	Сенсорним перемикачем встановити на БЦВ режим « μS »	
	Встановити ПЕП на зразок та отримати послідовність донних луно-імпульсів	Встановити ПЕП на зразок та отримати максимум луно-сигналу від кутового відбивача
	Атенюатором, а також регуляторами "▷" (на блоці А8) і "АМПЛ" (на блоці А7) підведіть до заздалегідь обраного рівня вершину сигналу:	
	першого донного сигналу	луно-сигналу
	Застробувати сигнал регуляторами «  » і «  » (на блоці А10) або ручним стробуванням «  » (на передній панелі)	
	По БЦВ визначити значення	
	τ_1	τ
	Підвести строб до обраного рівня вершини другого донного сигналу	—
	Застробувати сигнал	—
	По БЦВ визначити значення τ_2	—
	З урахуванням отриманих значень по розрахунковій формулі визначити швидкість поширення ультразвукових коливань	

1.2. Порядок виконання роботи

Робота складається із трьох етапів:

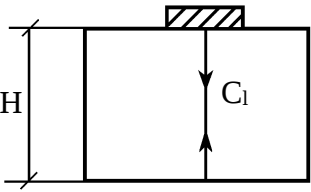
1. Вимірювання швидкості поширення поздовжніх хвиль C_l у зразках зі сталі й оргскла із плоскопаралельними поверхнями;
2. Вимірювання швидкості поширення поперечних хвиль C_t у зразках зі сталі із плоскопаралельними поверхнями;
3. Аналіз і обробка результатів вимірювань, висновки.

1.2.1. Вимірювання швидкості C_1

1. Включити дефектоскоп і підключити до нього за сполученою схемою прямий ПЕП (П111-2,5ДО12-002).
2. Виконати настройку УД2-12 за технологічною картою (див. рис. П.3).
3. Відповідно до зазначеної схеми прозвучування триразово виконати процедуру вимірювання C_1 (див. табл. 1.1) на зразках зі сталі та оргскла. Результати вимірювань і розрахунків занести відповідно у табл. 1.2 і 1.3.

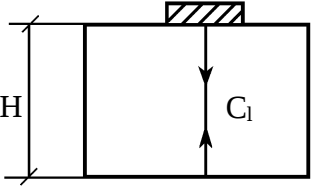
Таблиця 1.2

Результати вимірювання та розрахунків швидкості C_1 (зразок зі сталі)

Схема прозвучування	Номер вимірювання	Н, мм	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	C_1 , мм/мкс	C_1 , м/с
	1					
	2					
	3					
	Середнє значення					

Таблиця 1.3

Результати вимірювання та розрахунків швидкості C_1 (зразок з оргскла)

Схема прозвучування	Номер вимірювання	Н, мм	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	C_1 , мм/мкс	C_1 , м/с
	1					
	2					
	3					
	Середнє значення					

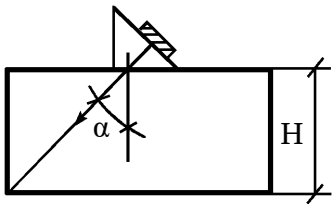
1.2.2. Вимірювання швидкості C_t

1. Включити дефектоскоп і підключити до нього за сполученою схемою похилий ПЕП з кутом уведення $\alpha = 50^\circ$ (П121-2,5-50°-002).

2. По зазначеній схемі прозвучування триразово виконати процедуру вимірювання швидкості C_t на зразку із плоскопаралельними гранями. Результати вимірювань і розрахунків занести відповідно у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Результати вимірювання та розрахунків швидкості C_t на зразку з плоскопаралельними гранями

Схема прозвучування	Номер вимірювання	H, мм	τ , мкс	C_t , мм/мкс	C_t , м/с
	1				
	2				
	3				
	Середнє значення				

1.3. Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені таблиці зі схемами прозвучування, результатами вимірювань і розрахунків; формули, по яких виконувалися розрахунки; висновки.

1.4. Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте види і типи ультразвукових хвиль.
2. Дайте визначення поздовжньої хвилі.
3. Дайте визначення поперечної хвилі.
4. Які параметри характеризують хвилю?

4. Що таке швидкість хвилі? Чим вона відрізняється від швидкості коливального руху часток у хвилі?
5. Чим характеризуються тиск і інтенсивність акустичної хвилі?
6. Дайте визначення прямого п'єзоелектричного ефекту.
7. Дайте визначення зворотнього п'єзоелектричного ефекту.

**Вимірювання коефіцієнта згасання ультразвукових хвиль
ультразвуковим дефектоскопом**

Мета роботи: вимірювання амплітуди луно-сигналів і коефіцієнта згасання ультразвукових хвиль.

Апаратура і зразки, які використовуються в роботі: дефектоскоп ультразвуковий УД2-12; прямий п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) на частоту 2,5 МГц (П111-2,5ДО12-002); похилий ПЕП на частоту 2,5 МГц із кутом введення променя $\alpha = 50^\circ$ (П121-2,5-50°-002); кабелі до ПЕП; стандартні зразки типу СО-1 та СО-2; мінеральне масло.

2.1. Теоретичні відомості

По мірі віддалення ультразвукової хвилі від джерела коливань її амплітуда, тиск і інтенсивність зменшуються за експоненціальним законом, що обумовлено згасанням. Воно визначається фізико-механічними характеристиками середовища та типом хвилі. Ступінь згасання визначається коефіцієнтом згасання δ [3,4].

Коефіцієнт δ , 1/м, складається з коефіцієнтів поглинання δ_n і розсіювання δ_r :

$$\delta = \delta_n + \delta_r. \quad (2.1)$$

При поглинанні ультразвукової хвилі внаслідок неідеальної пружності міжмолекулярних сил частина потоку звукової енергії перетворюється у тепловий потік за рахунок внутрішнього тертя й теплопровідності середовища. Коефіцієнт поглинання δ_n у твердих середовищах (метали, скло) пропорційний частоті f коливань хвилі та температурі середовища. Чим більше частота

ультразвуку, тим більше циклів коливань в одиницю часу і тем більше втрати при перетворенні енергії ультразвуку в тепло. Зі збільшенням температури практично всі матеріали збільшують свою в'язкість, при цьому слабшають їхні пружні властивості, що веде до зростання $\delta_{\text{п}}$.

При розсіюванні потік звукової енергії залишається звуковим, але виходить з пучка, що поширюється направлено. Метали, які застосовуються на практиці, мають зернисту структуру. Розміри зерен залежать від хімічного складу, виду механічної й термічної обробки деталей. Згасання хвиль у них визначається двома факторами - рефракцією й розсіюванням - внаслідок анізотропії механічних властивостей. У результаті рефракції фронт хвилі відхилюється від прямолінійного напрямку поширення й амплітуда сигналів, що приймаються, різко падає. Крім того, хвиля, що падає на поверхню границі зерна, випробовує часткове відбиття, заломлення ультразвуку й трансформацію, що й визначає механізм розсіювання. Розсіювання, на відміну від рефракції, призводить не тільки до ослаблення сигналу, але й до утворення шумів. Явище розсіювання тим сильніше, чим більше середній розмір зерна в порівнянні з довжиною ультразвукової хвилі.

Явища поглинання й розсіювання ослаблюють ультразвукову хвилю тим сильніше, чим більший шлях у середовищі вона проходить. При цьому амплітуда коливань ξ і звуковий тиск P знижуються в « e^{δ} » разів на кожен одиницю довжини шляху r , який проходить хвиля, а інтенсивність I , як енергетична характеристика, - в $e^{2\delta}$ разів, тобто

$$\xi = \xi_0 e^{-\delta r}; \quad P = P_0 e^{-\delta r}; \quad I = I_0 e^{-2\delta r}. \quad (2.2)$$

Звичайна робота з ПЕП при прозвучуванні здійснюється в далекій зоні його акустичного поля, основною характеристикою якої є рівномірне зменшення тиску при віддаленні від випромінювача, тому до зменшення величин ξ , P , та I повинно додаватися зменшення від розкриття ультразвукового променя в далекій зоні. Це зменшення, яке обумовлено

дифракційним розходженням ультразвукового променя, зворотно пропорційно відстані r від ПЕП до відбивача:

$$\pi \frac{L_{\delta}}{r} = \pi \frac{a^2}{r\lambda} \quad (\text{так як } L_{\delta} = \frac{a^2}{\lambda}), \quad (2.3)$$

де L_{δ} – довжина ближньої зони ПЕП;

$2a$ – діаметр його п'єзопластини.

Наприклад, для звукового тиску P на відстані r від ПЕП можна записати:

$$P = \frac{\pi a^2}{r\lambda} P_0 e^{-\delta r}. \quad (2.4)$$

Так як тиск P у акустичному законі Ома еквівалентний електричній напрузі U на п'єзопластині ПЕП, то амплітуду зондувальних і відбитих сигналів, з якими оперують при роботі з дефектоскопом, позначають через U з відповідними індексами. Тоді для амплітуди сигналу ультразвукової хвилі в середовищі на відстані r від ПЕП з урахуванням рівняння (2.4) можна записати:

$$U = \frac{\pi a^2}{r\lambda} U_0 e^{-\delta r}. \quad (2.5)$$

2.2. Методика непрямого вимірювання коефіцієнта згасання ультразвукових хвиль

2.2.1. Вимірювання коефіцієнта згасання поперечної хвилі δ_t

Так як коефіцієнт згасання поперечної хвилі δ_t характеризує ослаблення амплітуди хвилі залежно від відстані r , пройденої хвилею (див. формулу (2.5)), то достатньо порівняти дві амплітуди на двох фіксованих відрізках шляху, пройдених хвилею. Для цього виберемо спосіб прозвучування зразка висотою H (рис. 2.1) з кутовими відбивачами поперечною хвилею від похилого ПЕП з кутом введення α .

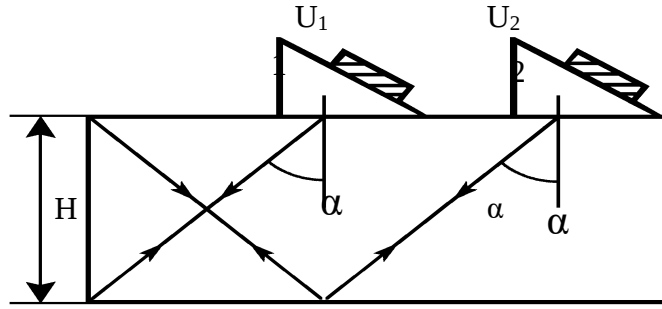


Рис. 2.1. Схема прозвучування зразка висотою H поперечною хвилею від похилого ПЕП

При установці ПЕП у положення 1 шлях, пройдений хвилею (однократне відбиття), $r_1 = \frac{2H}{\cos(\alpha)}$, а при установці ПЕП у положення 2 (дворазове відбиття) -

$$r_1 = \frac{4H}{\cos(\alpha)}.$$

Відповідно амплітуди хвиль із урахуванням рівняння (2.5) визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{\pi a^2}{\lambda r_1} U_0 e^{-\delta_t r_1} = \frac{\pi a^2}{2H\lambda} U_0 e^{-\delta_t \frac{2H}{\cos \alpha}} \cos \alpha; \\ U_2 &= \frac{\pi a^2}{\lambda r_2} U_0 e^{-\delta_t r_2} = \frac{\pi a^2}{2H\lambda} U_0 e^{-\delta_t \frac{4H}{\cos \alpha}} \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Ослаблення хвилі оцінюється відношенням значень амплітуд хвиль:

$$\frac{U_2/U_0}{U_1/U_0} = \frac{\frac{\pi a^2}{4H\lambda} \cos \alpha e^{-\delta_t \frac{4H}{\cos \alpha}}}{\frac{\pi a^2}{2H\lambda} \cos \alpha e^{-\delta_t \frac{2H}{\cos \alpha}}} = \frac{1}{2} e^{-\delta_t \frac{2H}{\cos \alpha}}. \quad (2.7)$$

Вираз (2.7) але вже в децибелах прийме вигляд:

$$20 \lg \frac{U_2}{U_0} - 20 \lg \frac{U_1}{U_0} = 20 \lg \frac{1}{2} \delta_t \frac{2H}{\cos \alpha} 20 \lg e, \quad (2.8)$$

звідки

$$\delta_t = \frac{20\lg \frac{1}{2} - 20\lg \frac{U_2}{U_0} + 20\lg \frac{U_1}{U_0}}{2H20\lg e} \cos \alpha. \quad (2.9)$$

Тут $20 \lg e = 8,685$; $20 \lg(1/2) = -6$ дБ.

$$\text{Позначимо: } 20\lg \frac{U_2}{U_0} = U_{II}; \quad 20\lg \frac{U_1}{U_0} = U_I. \quad (2.10)$$

Значення U_I та U_{II} при роботі з дефектоскопом УД2-12 знімаються із кнопочного атенюатора в негативних децибелах, тоді остаточно формула для визначення коефіцієнта згасання поперечної хвилі прийме вигляд:

$$\delta_t = \frac{U_I - U_{II} - 6}{17,37H} \cos \alpha. \quad (2.11)$$

Таким чином, для непрямого вимірювання коефіцієнта згасання δ_t поперечної хвилі при даній схемі прозвучування в зразку (паралелепіпеді) висотою H необхідно виміряти амплітуду ехо-сигналів U_I й U_{II} у від'ємних децибелах на шляху одно- і дворазового відбиття від двограних кутів.

2.2.2. Вимірювання коефіцієнта згасання поздовжньої хвилі δ_l

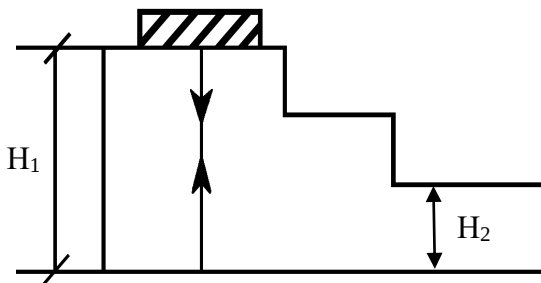


Рис. 2.2. Схема прозвучування зразка зі сходами

Найбільш доступним способом вимірювання коефіцієнта згасання поздовжньої хвилі є спосіб, при якому вимірюються та порівнюються амплітуди донних луно-сигналів у зразку зі сходами (рис. 2.2) при прозвучуванні його прямим ПЕП на ділянках різної висоти, наприклад H_1 та H_2 .

Відношення амплітуд хвиль:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{U_0} &= \frac{\pi a^2}{\lambda 2H_1} e^{-\delta_1 2H_1}; \\ \frac{U_2}{U_0} &= \frac{\pi a^2}{\lambda 2H_2} e^{-\delta_1 2H_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Порівняння амплітуд у децибелах дає наступну формулу для непрямого вимірювання:

$$\delta_1 = \frac{U_I - U_{II} + 2 \lg \frac{H_2}{H_1}}{17,37(H_2 - H_1)}. \quad (2.13)$$

Можна зробити вимірювання і на одній сходинці, але використати не тільки перший донний луно-сигнал, але й другий або третій луно-сигнали і т.д. При використанні, наприклад, першого і другого донних луно-сигналів відповідні відрізки шляху, пройдені ними, будуть відрізнятися один від одного у два рази. Тоді формула (2.13) для даного випадку прийме вигляд:

$$\delta_1 = \frac{U^{(I)} - U^{(II)} - 6}{17,37H}, \quad (2.14)$$

де: $U^{(I)}$, $U^{(II)}$ - амплітуда першого і другого донного луно-сигналу відповідно у від'ємних децибелах; H - висота сходинки.

Видно, що, як і у випадку непрямого вимірювання δ_t , для вимірювання δ_1 необхідно виміряти амплітуду луно-сигналів U_I й U_{II} або $U^{(I)}$ і $U^{(II)}$ у від'ємних децибелах і відстань від ПЕП до відбивача.

2.3. Порядок виконання роботи

Робота складається із трьох етапів:

1. Вимірювання коефіцієнта згасання поперечних хвиль;
2. Вимірювання коефіцієнта згасання поздовжніх хвиль;
3. Аналіз і обробка результатів вимірювань, висновки.

2.3.1. Вимірювання коефіцієнта згасання поперечних хвиль δ_t

1. Включити дефектоскоп УД2-12 і підключити до нього за сполученою схемою похилий ПЕП з кутом введення променя $\alpha = 50^\circ$ і частотою 2,5 МГц (П121-2,5-50-002).
2. Не менше трьох разів у відповідності зі схемою прозвучування стандартного зразка СО-2, зазначеної в табл. 2.1, виміряти максимальну амплітуду ехо-сигналів U_I й U_{II} від двограних кутів у зразку зі сталі. Розрахунок коефіцієнта згасання δ_t , зробити за формулою (2.11). Результати вимірювань і розрахунків занести в табл. 2.1.

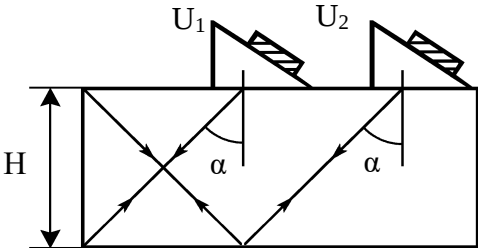
2.3.2. Вимірювання коефіцієнта загасання поздовжньої хвилі δ_l

Схема прозвучування зразка зі сталі наведена у табл. 2.2.

1. Включити дефектоскоп і підключити до нього за сполученою схемою прямий ПЕП на частоту 2,5 МГц (П111-2,5ДО12-002).

Таблиця 2.1

Результати вимірювань і розрахунків (зразок зі сталі)

Схема прозвучування	Номер вимірювання	Н, мм	U_I , дБ	U_{II} , дБ	δ_t , 1/мм
	1				
	2				
	3				
	Середнє значення				

2. Встановити прямий ПЕП на верхню поверхню стандартного зразка СО-2 та не менше трьох разів у відповідності зі схемою прозвучування, зазначеної в табл. 2.2, виміряти максимальну амплітуду першого $U^{(I)}$ і другого $U^{(II)}$ донних

луно-сигналів. Коефіцієнт δ_l розрахувати за формулою (2.14). Результати вимірювань і розрахунків занести в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати вимірювань і розрахунків (зразок зі сталі)

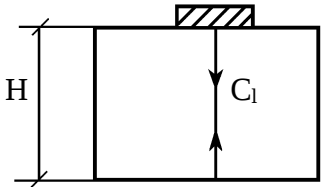
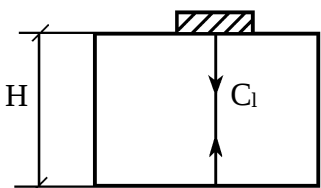
Схема прозвучування	Номер вимірювання	Н, мм	$U^{(I)}$, дБ	$U^{(II)}$, дБ	δ_l , 1/мм
	1				
	2				
	3				
	Середнє значення				

Схема прозвучування зразка з оргскла наведена у табл. 2.3.

1. Включити дефектоскоп і підключити до нього за сполученою схемою прямий ПЕП на частоту 2,5 МГц (П111-2,5ДО12-002).

Таблиця 2.3

Результати вимірювань і розрахунків (зразок з оргскла)

Схема прозвучування	Номер вимірювання	Н, мм	$U^{(I)}$, дБ	$U^{(II)}$, дБ	δ_l , 1/мм
	1				
	2				
	3				
	Середнє значення				

2. Встановити прямий ПЕП на верхню поверхню у положення над прорізом стандартного зразка СО-1 із оргскла та не менше трьох разів у відповідності зі схемою прозвучування, зазначеної в табл. 2.3, виміряти максимальну амплітуду першого $U^{(I)}$ і другого $U^{(II)}$ донних луно-сигналів. Коефіцієнт δ_l розрахувати за формулою (2.14). Результати вимірювань і розрахунків занести в табл. 2.3

2.4. Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені таблиці зі схемами прозвучування, результатами вимірювань і розрахунків; формули, за якими виконувалися розрахунки; висновки.

2.5. Контрольні запитання

1. Від чого залежить згасання ультразвуку у твердих середовищах?
2. За яким законом зменшуються амплітуда коливань і звуковий тиск ультразвукової хвилі по мірі її віддалення від джерела коливань?
3. Що таке розсіювання ультразвуку, чим воно характеризується?
4. Що таке поглинання ультразвуку, чим воно характеризується?
5. Як потрібно враховувати згасання при використанні ультразвукових коливань?

Вимірювання діаграми направленості п'єзоелектричного перетворювача ультразвукового дефектоскопа

Мета роботи: вивчення методу експериментального визначення діаграми направленості (ДН) похилих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП).

Апаратура і зразки, які використовуються в роботі: дефектоскоп УД2-12; похилий п'єзоелектричний перетворювач типу П121-2,5-50°-002 на частоту 2,5 МГц із кутом введення 50°; кабель до ПЕП; стандартні зразки СО-2 і СО-3; лінійка з міліметровими поділками; мінеральне масло.

3.1. Метод експериментального визначення ДН поля похилого ПЕП

Об'єктом дослідження є ПЕП типу П121-2,5-50°-002 з кутом введення $\alpha = 50^\circ$, що працює на частоті $f = 2,5$ МГц, об'єктом контролю - стандартний зразок СО-2, на який нанесені шкали, проградуєвані в значеннях кута заломлення променя (рис. 3.1, б).

Діаграма направленості у вигляді функції $\Phi(\alpha)$ у полярній системі координат може бути визначена по огинаючій амплітуд луно-сигналів від ненаправленого відбивача в зразку з контрольованого металу, виміряної за допомогою типової апаратури (рис. 3.1, а). У загальному випадку ДН $\Phi(\alpha)$ ПЕП пов'язана із огинаючою амплітуд луно-сигналів $v(x)$ від ненаправленого відбивача (циліндричний поперечний отвір) на глибині H_0 в зразку контрольованого металу функцією [5,6]:

$$\Phi(\alpha) = \Phi\left(\arctg \frac{x}{H_0}\right) = \sqrt{v(x)} \left[H_0^2 \left(\frac{x^2}{H_0^2} + 1 \right) \right]^{\frac{n}{2}} \exp \left[2\delta_{t2} H_0 \left(\frac{x^2}{H_0^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (3.1)$$

де n - показник, обумовлений типом ненаправленого відбивача (для сфери $n = 2$, для циліндра - $n = 1,5$).

Огинаючи амплітуд луно-сигналів $v(x)$ при переміщенні ПЕП із кроком 1 - 2 мм вимірюють за допомогою дефектоскопа, що має атенюатор.

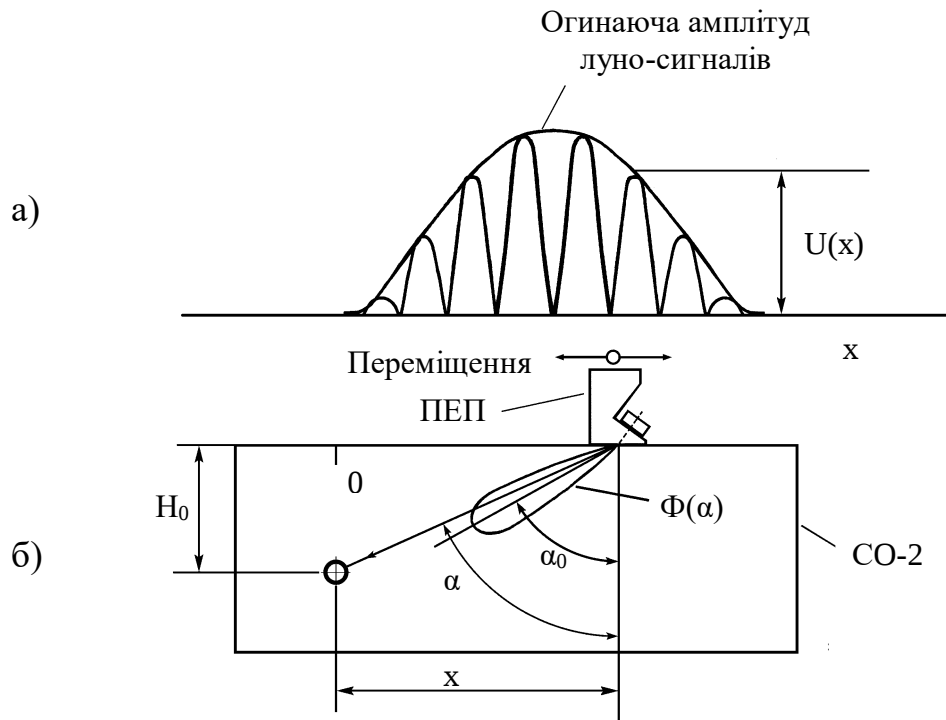


Рис. 3.1. Огибающая амплитуд луно-сигналов

При використанні стандартного зразка СО-2 безпосередньо вимірюють $v(\alpha)$ як функцію кута заломлення α , а при перерахуванні її в діаграму направленості $\Phi(\alpha)$ нехтують згасанням ультразвуку на шляху до відбивача.

3.2. Порядок виконання роботи

1. Включити дефектоскоп з похилим п'єзоелектричним перетворювачем типу П121-2,5-50°-002.

2. Визначити по стандартному зразку СО-3 місце виходу променя ПЕП. Для цього встановити ПЕП над центральною рискою СО-3 і за допомогою його невеликих переміщень знайти положення, що відповідає максимальному луно-

сигналу від фокусуючої поверхні зразка. Місце виходу при цьому розташовано точно над центральною рискою СО-3.

3. Установити ПЕП на стандартний зразок СО-2 у положення, при якому амплітуда луно-сигналу від циліндричного відбивача ($\varnothing = 6$ мм) максимальна, і проти мітки на шкалі відрахувати кут вводу променя α_0 . Регуляторами "▷" (на блоці А8) і "АМПЛ" (на блоці А7), а також за необхідністю за допомогою кнопок атенюатора «Ослаблення dB» на передній панелі дефектоскопу встановити амплітуду луно-сигналу від циліндричного відбивача, рівну 7 або 8 великих клітинок на екрані ЕПТ. Переміщуючи ПЕП вліво і вправо, визначити значення кутів $\alpha_{\min}$ та $\alpha_{\max}$, при яких ще можна виміряти амплітуду луно-сигналів від відбивача. Значення $\alpha_{\min}$, α_0 та $\alpha_{\max}$ занести в табл. 3.1.

4. Переміщуючи ПЕП по зразку у межах значень від $\alpha_{\min}$ до $\alpha_{\max}$ по шкалі, виміряти значення амплітуди $v(\alpha)$ ехо-сигналів в мм на екрані ЕПТ від циліндричного відбивача $\varnothing 6$ мм при суміщенні місця виходу променя з кожною поділкою на шкалі СО-2. В процесі кожного вимірювання забезпечувати надійний акустичний контакт і повторюваність результатів. Результати занести в табл. 3.2.

5. Розділити кожне значення функції $v(\alpha)$ на максимальне значення, отримане при куті вводу променя α_0 , тобто на $v(\alpha_0)$. Отримані таким чином відносні значення ДН $\Phi(\alpha)$ занести в табл. 3.1.

6. По результатами розрахунку побудувати на міліметровому папері ДН $\Phi(\alpha)$.

Таблиця 3.1

Результати вимірювань значень α_0 , $\alpha_{\min}$ та $\alpha_{\max}$

α_0 , гр.	$\alpha_{\min}$, гр.	$\alpha_{\max}$, гр.

Таблиця 3.2

Результати вимірювань для розрахунку ДН

α , гр.															
$\nu(\alpha)$, мм															
$\Phi(\alpha)$															

3.3. Зміст звіту

У звіті повинні бути представлені таблиці з експериментальними і розрахунковим даними, а також діаграма направленості поля ПЕП, побудована за даними вимірювань та розрахунку.

3.4. Контрольні запитання

1. Розкрийте поняття "діаграма направленості" в ультразвуковому контролі.
2. Від яких параметрів прямого ПЕП залежить ДН його поля?
3. Які параметри похилого ПЕП визначають направленість поля поперечної хвилі, що збуджується ним?
4. Як змінюється ширина пелюстка ДН у міру зменшення швидкості повздовжньої хвилі в призмі перетворювача?
5. Як впливає матеріал об'єкта контролю на формування ДН поля ПЕП?
6. Яка методика визначення ДН похилого ПЕП по огинаючій амплітудно-сигналі від ненаправленого відбивача.

Вимірювання глибини за допомогою ультразвукового дефектоскопа

Мета роботи: придбання навичок настроювання глибиноміра дефектоскопа УД2-12, визначення координат відбивачів і товщини зразків.

Апаратура і зразки, які використовуються в роботі: ультразвуковий дефектоскоп УД2-12; прямий п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) на частоту 2,5 МГц (П111-2,5ДО12-002); похилий ПЕП на частоту 2,5 МГц із кутом введення променя $\alpha = 50^\circ$ (П121-2,5-50°-002); стандартні зразки СО-1, СО-2 та СО-3; лінійка з міліметровими поділками, штангенциркуль.

4.1. Теоретичні відомості

За допомогою глибиноміра вимірюють координати відбивачів (дефектів) і товщину контрольованого шару, а також визначають контрольований шар на заданій глибині об'єкта контролю.

Робота глибиноміра ґрунтується на вимірюванні часу розповсюдження ультразвукових коливань від моменту випромінювання зондувального імпульсу до моменту прийому луно-сигналу з перерахунком у необхідну координату. Для прямих ПЕП (рис. 4.1, а) формула перерахунку в глибину залягання відбивача має вигляд [7,8]:

$$H = C_1 T / 2, \quad (4.1)$$

де: H – глибина дефекту, мм;

C_1 – швидкість поздовжньої хвилі, мм/мкс;

T – час між зондувальним імпульсом (ЗІ) і луно-імпульсом, мкс (рис. 4.1, б).

Для похилих ПЕП (рис. 4.2, 4.3) формули перерахунку в координати залягання відбивача мають вигляд:

$$L = [C_t(T - 2t_{\Pi})/2] \sin \alpha; \quad (4.2)$$

$$H = [C_t(T - 2t_{\Pi})/2] \cos \alpha, \quad (4.3)$$

де: C_t – швидкість поперечної хвилі, мм/с; t_{Π} – час поширення ультразвукової хвилі в призмі ПЕП, або акустична затримка, мкс.

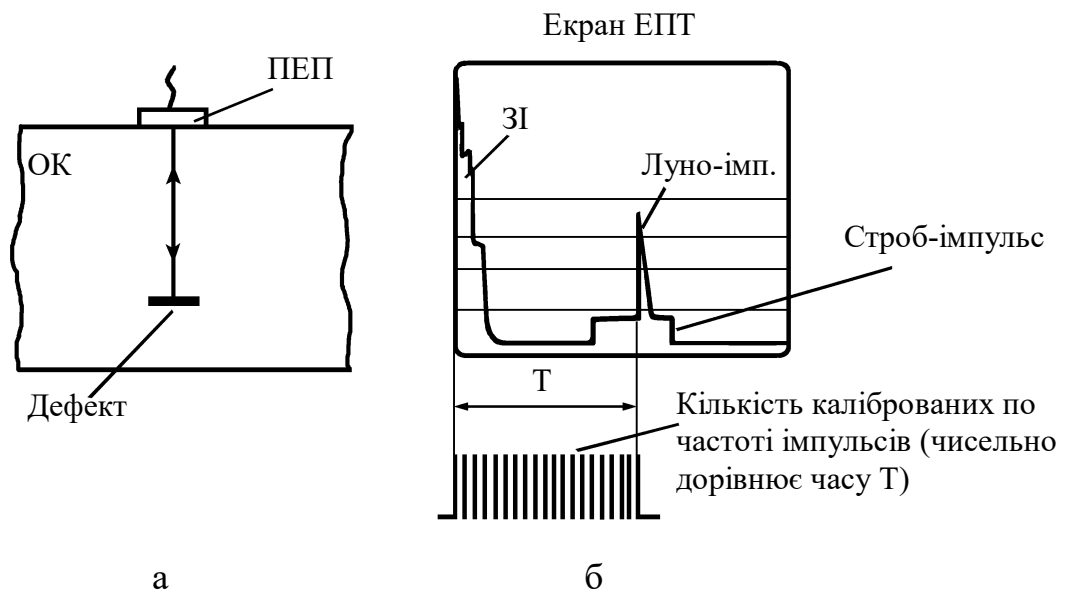


Рис. 4.1. Схема приймання відбитого сигналу для прямого ПЕП

З рис. 4.2 видно, що $L = X$ - зсув дефекту відносно ПЕП, $H = Y$ - глибина залягання відбивача. В УД2-12 всі координати визначаються в декартовій системі координат.

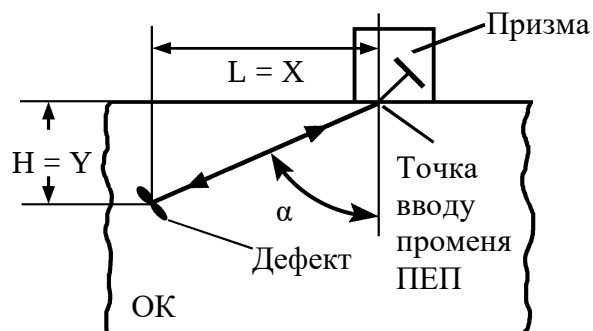


Рис 4.2. Схема приймання відбитого сигналу для похилого ПЕП

У сучасних дефектоскопах, наприклад в УД2-12, вимірювання часу T між ЗІ, першим застробованим і луно-сигналом, що перевищує певний рівень, відбувається автоматично. (В УД2-12 певний рівень дорівнює двом більшим клітинкам на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ)).

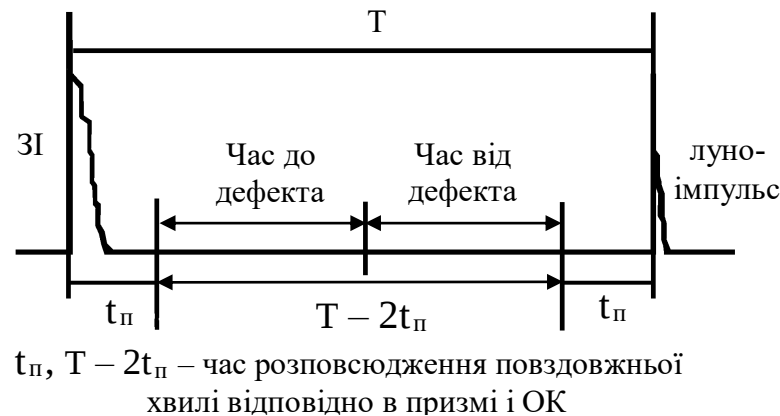


Рис. 4.3. Імпульси на екрані дефектоскопа для похилого ПЕП

При будь-яких способах настроювання глибиноміра в ультразвукових дефектоскопах методика одна і та ж сама: спочатку настроюють "нуль глибиноміра", а потім виставляють значення координат відбивача щодо цього "нуля" за відомим значенням або відстані, мм, або часу, мкс.

Органи управління дефектоскопа УД2-12 (рис. 4.4) для настроювання глибиноміра розташовані на його верхній панелі (ВП). Регулятор «0» на блоці А6 призначений для установки нуля глибиноміра (значення компенсації часу поширення ультразвукових коливань); у крайньому правому положенні регулятора компенсація дорівнює нулю.

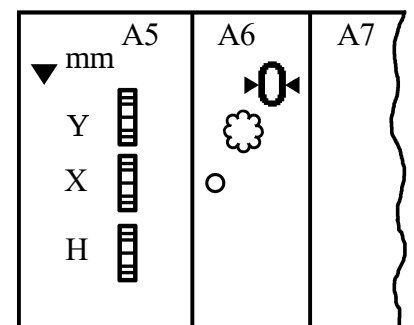


Рис. 4.4. Розташування регуляторів настройки глибиноміра

Гніздо "З" на блоці А6 призначено для контролю (вимірювання) тривалості компенсації $2t_п$. Регулятори «V mmH», «V mmX» та «V mmY» на блоці А5 призначені для калібрування глибиноміра при вимірюванні відповідно

координат Н, Х та Y. Необхідність зсуву нуля глибиноміра (рис. 4.5) відносно зондувального імпульсу за допомогою регулятора «0» обумовлена наявністю акустичної затримки $2t_{\Pi}$ – часу поширення ультразвукових коливань у ПЕП.

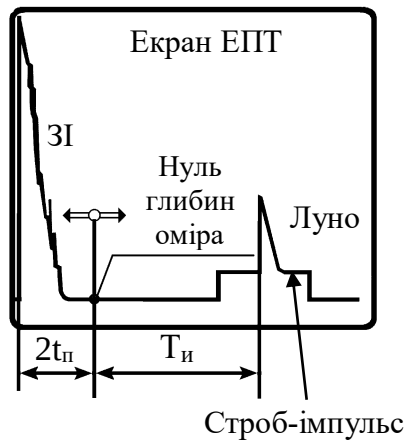


Рис. 4.5. Схема екрана дефектоскопа при настроюванні глибиноміра

Установка нуля глибиноміра необхідна завжди для компенсації в даному ПЕП.

Регуляторами « ∇ mmН», « ∇ mmХ» та « ∇ mmY» встановлюють по суті коефіцієнти $K_1 \div K_3$ перерахування часового інтервалу (між нулем глибиноміра й необхідним відбитим сигналом) у відповідну координату Н, Х або Y, тому вирази (4.1) - (4.3) можна переписати так:

$$H = C_1 \frac{T}{2} = K_1 T; \quad (4.4)$$

$$X = \left[C_t \left(\frac{T - 2t_{\Pi}}{2} \right) \right] \sin \alpha = K_2 T_{\Pi}; \quad (4.5)$$

$$Y = \left[C_t \left(\frac{T - t_{\Pi}}{2} \right) \right] \cos \alpha = K_3 T_{\Pi}. \quad (4.6)$$

У формулах (4.4) - (4.6) коефіцієнти перерахування $K_1 \div K_3$ визначаються швидкістю поширення ультразвукових хвиль та кутом введення ультразвукових коливань в ОК.

4.2. Методика настроювання

4.2.1. Настроювання глибиноміра для похилого ПЕП

1. Підключити до дефектоскопа похилий ПЕП (П121-2,5-50°-002)
2. Встановити ПЕП на поверхню стандартного зразка СО-3 таким чином, щоб отримати на екрані ЕПТ максимальний луно-сигнал від напівкруглої поверхні дна стандартного зразка. Визначити (уточнити) точку введення променя. Застробувати отриманий луно-сигнал (тобто встановити регуляторами

«» и «» на блоці А10 (ВП) строб АСД так, щоб луно-імпульс був розташований посередині стробу) . В режимі БЦВ « μS » при віджатій кнопці « ∇ » на блоці А6 (ВП) регулятором «» виставити значення 33,7 мкс, що відповідає радіусу зразка СО-3 55 мм, при цьому луно-сигнал повинен знаходитися посередині стробу і мати амплітуду не менше двох великих клітин на екрані ЕПТ.

3. Встановити ПЕП на поверхню стандартного зразка СО-2 в положення максимуму луно-сигналу від отвору $\varnothing$ 6 мм на глибині 44 мм. Застробувати луно-сигнал. Уточнити (визначити) кут введення променя за шкалою α .

4. Не рухаючи ПЕП на зразку СО-2, виміряти лінійкою відстань від нуля шкали α до точки виходу променя ПЕП, і цю відстань, зменшену на 2 мм, виставити в режимі БЦВ «mmX» регулятором « ∇ mmX» на блоці А5 (ВП);

5. У режимі БЦВ « mmY » регулятором « ∇ mmY» на блоці А5 (ВП) виставити значення 42, що є зменшеною на 2 мм глибиною, на якій розташований отвір $\varnothing$ 6 мм у зразку СО-2.

4.2.2. Настроювання глибиноміра для прямого ПЕП

1. Підключити до дефектоскопа прямий ПЕП (П111-2,5-ДО12-002).
2. Установити регулятор «» на блоці А6 (ВП) у середнє положення.
3. Установити ПЕП на поверхню зразка СО-2 поза отворами. Одержати на екрані зображення першого донного імпульсу з амплітудою близько 2/3 вертикальної шкали (ВШ) табло екрана ЕПТ.
4. Застробувати перший донний імпульс.
5. У режимі БЦВ « μS » при віджатій кнопці « ∇ » на блоці А6 регулятором «» виставити значення 20 μS (для стандартного зразка СО-2 з висотою Н = 59 мм).
6. У режимі БЦВ «mmH» регулятором « ∇ mmH» (А5) виставити значення 59.

4.3. Порядок виконання роботи

1. Освоїти методику настроювання глибиноміра при використанні прямого й похилого ПЕП, виконавши зазначену в п. 4.2 відповідну послідовність операцій по декілька разів.
2. Налаштувати глибиномір для похилого ПЕП (п. 4.2.1).
3. Установити похилий ПЕП (П121-2,5-50°-002) на поверхню зразка СО-2, на якій розташована шкала вимірювання кута введення променя α .
4. Виміряти похилим ПЕП координати відбивача у вигляді нижнього двогранного кута на зразку СО-2.
5. Установити похилий ПЕП на бічну поверхню зразка СО-2.
6. Виміряти похилим ПЕП, розташованим на бічній поверхні зразка СО-2, координати відбивача у вигляді нижнього двогранного кута.
7. Намалювати ескізи зразків та схеми прозвучування (табл. 4.1) і занести результати вимірювання у табл. 4.1.
8. Налаштувати глибиномір для прямого ПЕП (п. 4.2.2).
9. Установити прямий ПЕП (П111-2,5-ДО12-002) на поверхню зразка СО-2, на якій розташована шкала вимірювання кута введення променя α , над отвором $\varnothing$ 6 мм.
10. Виміряти прямим ПЕП глибину залягання отвору $\varnothing$ 6 мм у зразку СО-2.
11. Установити прямий ПЕП на бічну поверхню зразка СО-2.
12. Виміряти прямим ПЕП товщину зразка СО-2.
13. Намалювати ескізи зразків та схеми прозвучування (табл. 4.1) і занести результати вимірювання у табл. 4.1.
14. Нанести у табл. 4.1 розрахункові формули для всіх схем прозвучування.
15. Зробити оцінку похибок вимірювання.

Таблиця 4.2

Результати виконання лабораторної роботи

Ескіз зразка і схема прозвучування	Тип ПЕП	Координати відбивачів			Розрахункові формули
		X, мм	Y, мм	H, мм	
	Похилий				
	Похилий				
	Прямий				
	Прямий				

4.4. Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені методика настроювання глибиноміра з описом кожного кроку процесу настроювання, представлені таблиці з експериментальними даними і висновки.

4.5. Контрольні запитання

1. Які органи управління дефектоскопа УД2-12 використовуються для настроювання глибиноміра?
2. Як здійснити настроювання глибиноміра дефектоскопа УД2-12 при роботі із прямим ПЕП?
3. Як настроїти глибиномір дефектоскопа УД2-12 по еталонним відбивачам при роботі з похилим ПЕП, що збуджує і реєструє поперечну хвилю?
5. Що таке строб-імпульс і для чого він використовується?
6. У чому виражаються координати відбивачів (дефектів) при контролі прямим і похилим ПЕП?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.
2. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
3. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: Навч. посібник. — Київ: Азимут-Україна, 2004. - 552 с.
4. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основи акустики: навч. посібник. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
5. Електронні системи контролю якості та діагностики: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / Л.Д. Писаренко, С.Р. Михайлов – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 200 с. Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського, протокол № 6 від 31.01.2020 р. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40864>
6. Радіофізичні методи діагностики матеріалів і середовищ: підручник / Г.С. Воробйов, Г.О. Пономарьова, С. Р. Михайлов та ін. – Суми: Сумський державний університет, 2014.–222 с. ISBN 978-966-657-548-0
7. Електронні системи контролю якості та діагностики [Електронний ресурс] : конспект лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Електронні компоненти, пристрої та системи» спец. 171 Електроніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.Р. Михайлов. – Електрон. текст. дані (1 файл: 3045 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 169 с. Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського, протокол № 3 від 07.12.2023 р. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63683>
8. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27002>

Опис та технічна характеристика ультразвукового дефектоскопа УД2-12

Конструктивно дефектоскоп виконаний у вигляді десяти блоків (табл. Д.1), каркаса та зйомних верхнього й нижнього кожухів (рис. Д.1).



Рис. Д.1. Конструкція дефектоскопа

Вставлені в роз'єми комутаційні блоки А5 - А10 щільно прилягають один до одного і утворюють пульт керування, на верхню панель (ВП) дефектоскопа виведені органи керування для настройки, а на передню панель (ПП) (за допомогою легкоз'ємних ручок і кнопок) - основні оперативні

органи керування (рис. Д.2): 1 - сенсорний перемикач режиму БЦВ; 2, 3 - кнопки "Розжарення" і "Робота" (при натисканні одночасно обох кнопок включається дефектоскоп); 4 - кнопки атенюатора для вводу відповідного ослаблення; 5 - ручка для ручного стробування сигналу на екрані ЕПТ; 6 - екран ЕПТ; 7 - цифровий індикатор БЦВ; 8 - індикатор "Розжарення"; 9 - індикатор режиму БЦВ; 10 - світловий індикатор автоматичної сигналізації дефектів (АСД): I - червона, II - жовта, III - зелена лампи; 11 і 12 - вихідний й вхідний роз'єми дефектоскопа для підключення ПЕП.

На задній стінці панелі (рис. Д.3) розміщені кнопки установки частоти внутрішньої синхронізації (125 або 500 Гц); кнопка « $\times 2$ », при натисканні якої дані частоти збільшуються вдвічі (250 або 1000 Гц); кнопка переключення режиму синхронізації "Зовн./Внутр."; роз'єми виходу й входу зовнішньої синхронізації; клема заземлення і плавкі вставки.

За своєю конструкцією дефектоскоп УД2-12 належить до переносних

приладів. Комплектується він тринадцятьма п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП) конструкції "Приз", серед яких є прямі і похилі ПЕП з кутами введення $\alpha = 40, 50, 65$ і 70° , що працюють на частотах 1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0 МГц. Дефектоскоп УД2-12 здатний прозвучувати об'єкт контролю на глибину до 5 м, забезпечує чутливість до 102 дБ. Все це дозволяє виявляти дефекти типу порушення суцільності, вимірювати глибину і координати їхнього залягання.

Таблиця Д.1

Основні блоки дефектоскопа

Назва блоку	Позначення на ВП	Функціональні вузли, що містяться в блоці і не відображені в його назві
Блок цифрового відліку (БЦВ)	—	—
Блок електронно-променевої трубки (ЕПТ)	A5	Калібратор глибиноміра (частина)
Блок розгортки (БР) або генератор напруги розгортки	A6	Калібратор глибиноміра (частина), БЦВ (частина)
Генератор імпульсів збудження (ГІЗ), генератор зондувальних імпульсів (ГЗІ)	A7	—
Вимірювач відношень (ВВ)	A8	ВРЧ
Пристрій приймальний (ПП), приймально-підсилювальний тракт (ППТ)	A9	Компенсована відсічка
Блок автоматичного сигналізатора дефектів (АСД)	A10	—
Блок живлення (може бути замінений акумулятором)	—	—
Стабілізатор напруги	—	Перетворювач напруги (частина); генератор синхронізуючих імпульсів
Перетворювач	—	—

Дефектоскоп УД2-12 є приладом загального призначення (у маркуванні дефектоскопа немає букви "С"). У маркуванні перша цифра "2" вказує на те, що

прилад належить до дефектоскопів другої групи складності, а отже, у ньому реалізовані наступні функції: фіксація наявності дефекту, вимірювання амплітуди відбитого сигналу, визначення координат відбивача. Крім того, при певній настройці можна визначати по блоку цифрового відліку еквівалентну площу дефекту (тобто виконується функція приладів третьої групи складності).

Найбільш повно можливості дефектоскопа УД2-12 для контролю різних ОК зі збереженням відносної простоти їх використання реалізуються за допомогою технологічних карт настроювання. Наприклад, на рис. Д.3 наведена технологічна карта для настройки УД2-12, яка дає можливість дефектоскопісту зафіксувати положення органів управління дефектоскопа (один раз на зміну, перед початком контролю та ін.).

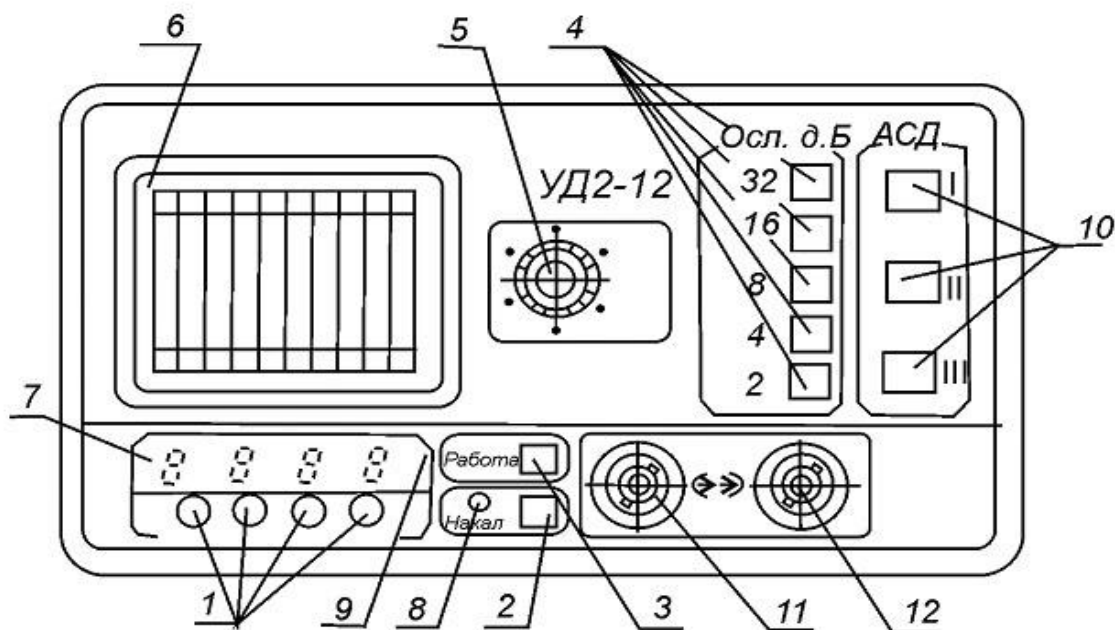


Рис. Д.2. Передня панель дефектоскопа УД2-12

Функціональна схема дефектоскопа наведена на рис. Д.4, на ній показані основні блоки: генератор синхронізуючих імпульсів (ГСІ), генератор зондувальних імпульсів (ГЗІ), приймально-підсилювальний тракт (ППТ), генератор напруги розгортки (ГНР), блок електронно-променевої трубки, блок часового регулювання чутливості (ЧЧР), автоматичний сигналізатор дефектів

(АСД), блок цифрового відліку, що включає в себе блок відношень, глибиномір, додатковий індикатор. У свою чергу ППТ містить послідовно з'єднані діодний обмежувач, атенюатор, підсилювач високої частоти (ПВЧ), амплітудний детектор (АД) і відеопідсилювач (ВП). Дефектоскоп реалізує луно-метод, тіньовий і дзеркально-тіньовий методи. На схемі також позначені кнопки і ручки потенціометрів настроювальних органів управління ВП.

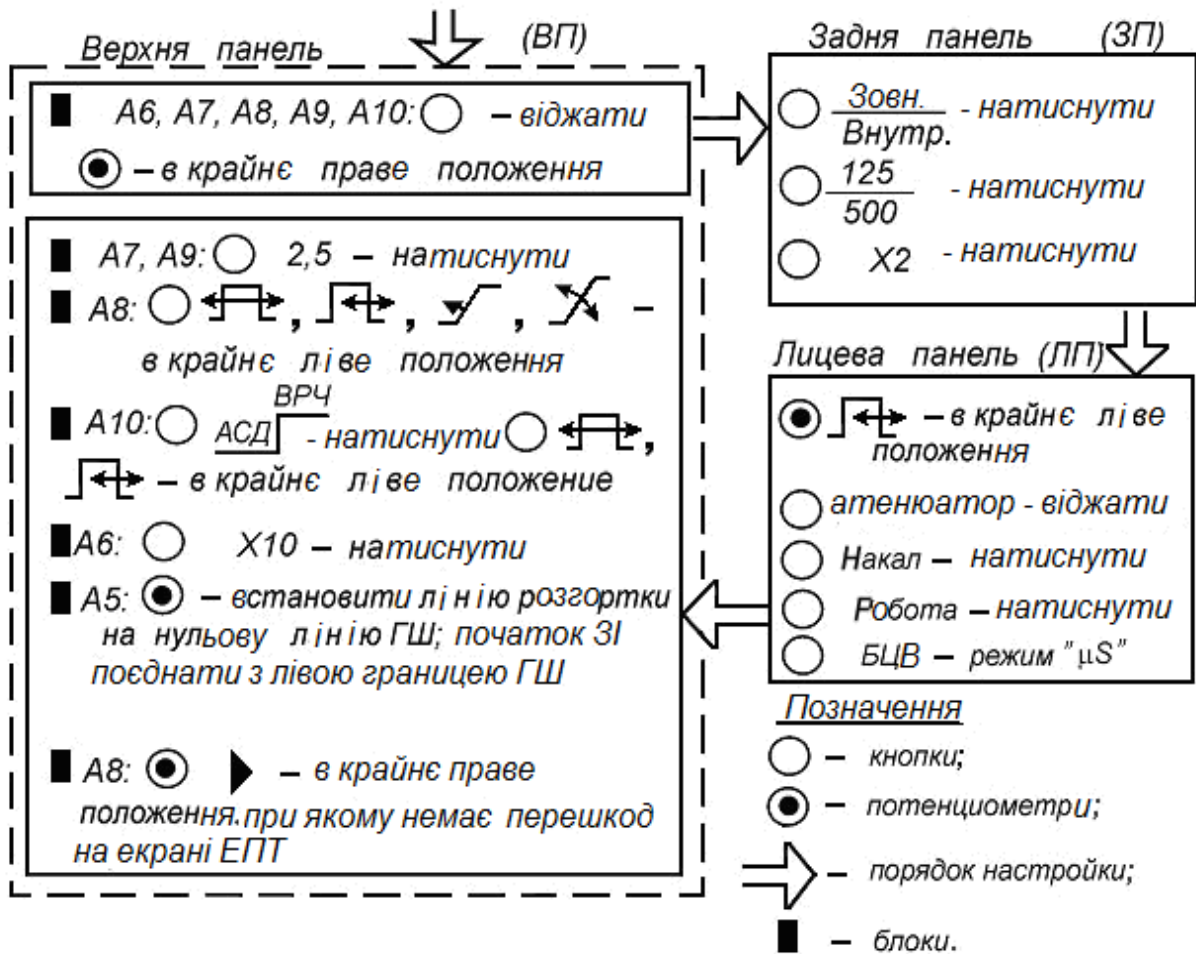


Рис. Д.3. Технологічна карта настроювання дефектоскопа

Робота дефектоскопа. Діаграми напруг в основних точках дефектоскопа наведені на рис. Д.5.

ГСІ забезпечує синхронізацію роботи вузлів дефектоскопа, реалізуючи імпульсний режим випромінювання-прийому ультразвукових коливань. Він фактично управляє роботою ГЗІ, ВРЧ, ГНР, АСД і глибиноміра, забезпечуючи своїми синхроімпульсами їхній запуск. ГСІ може працювати в режимі

[illegible]

Частота внутрішньої синхронізації може встановлюватися на 125, 250, 500, 100 Гц. Найбільше часто ГСІ використовують у режимі самозбудження. Частота ГСІ обмежується зверху умовою повного згасання всіх прийнятих сигналів у періоді між сусідніми ЗІ, знизу - швидкістю сканування ПЕП.

40

ОК. Тривалість ЗІ в дефектоскопі УД2-12 знаходиться в межах 4 - 6 мкс. Якщо при цьому працювати на частоті ультразвукових коливань 2,5 МГц, то в імпульсі укладається порядка 10 коливань. Амплітуда ЗІ перебуває в межах 180 - 300 В.

Імпульси високоякісних електричних коливань із виходу ГЗІ надходять на контактні площадки п'єзопластини ПЕП, яка в результаті зворотного п'єзоефекту перетворює їх у механічні. Останні при наявності акустичного контакту поширюються в ОК. Дійшовши до границі з яким-небудь стороннім середовищем, механічні коливання перевідбиваються, потрапляють на п'єзопластину ПЕП і перетворюються нею в результаті прямого п'єзоефекту знову в імпульси високочастотних електричних коливань, які далі надходять на вхід ППТ дефектоскопа.

Розглянемо роботу приймально-підсилювального тракту ППТ. У практиці контролю часто застосовують сполучений режим роботи ПЕП, який випромінює і приймає коливання. При цьому в процесі випромінювання із ГЗІ на ПП надходить напруга в десятки й сотні вольт. Вона може потрапити на вхід ППТ й

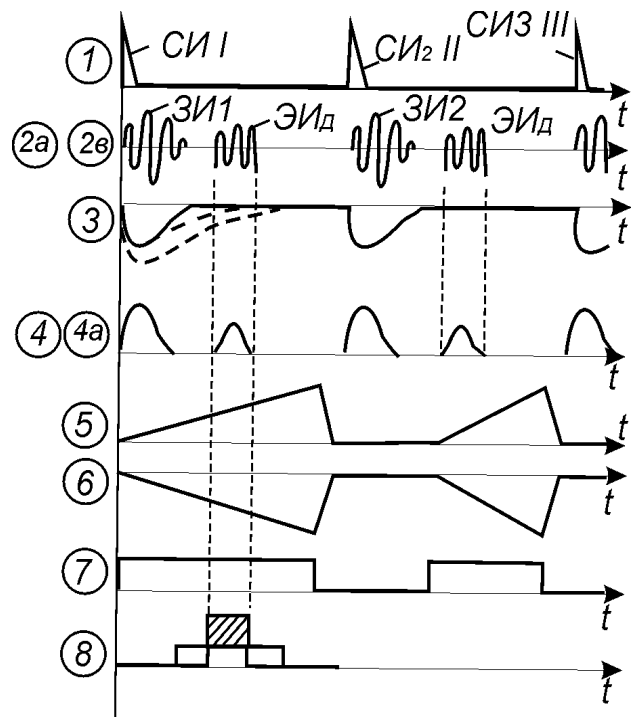


Рис. Д.5. Діаграми напруг

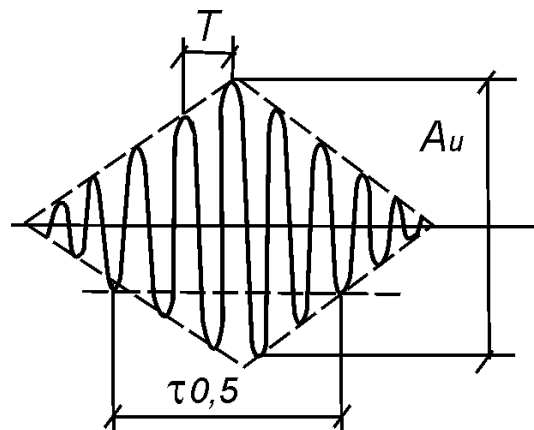


Рис. Д.6. Форма зондувальних імпульсів

вивести його з ладу, тому на його вході встановлюють обмежувач, як правило, діодний, що обмежує рівень електричного сигналу із ГЗІ на вході ППТ до 1 В, а під час приймання пропускає сигнали із ПП порядку десятків і сотень мікрівольт.

ППТ призначений для підсилення і детектування сигналів, що реєструються ПЕП (від сотень мікрівольт до одиниць і десятків мілівольт).

Сигнал при прийманні через діодний обмежувач надходить на вхід атенюатора. Атенюатор являє собою калібрований дільник кнопкового типу. Крок зміни – 2 дБ. Сума децибел по натиснутих кнопках є загальним ослаблення сигналу, що дозволяє порівнювати в децибелах рівні луно-сигналів від різних відбивачів і використовується, що дуже важливо, для налаштування чутливості дефектоскопа і вимірювання амплітуди прийнятих сигналів. Причому, амплітуда сигналу є інформаційною ознакою дефекту.

ПВЧ призначений для підсилення високочастотних імпульсів коливань до напруги, при якій можна проводити детектування (не менше 1В). Регулятор "Підсилення" може міняти підсилення ПВЧ на 46 дБ. Він широкополосний і працює на всіх частотах, що генеруються ГЗІ.

ВРЧ дозволяє змінювати в часі коефіцієнт підсилення ПВЧ. Для цього він виробляє керуючу напругу з ділянкою експоненціально зростаючої форми. Це дає можливість скоротити час відновлення ПВЧ після його перевантаження із ЗІ (тобто придушити ЗІ чи прибрати шуми ПЕП) і тим самим зменшити мертву зону; компенсувати в деякій мірі ослаблення ультразвуку в ОК, обумовлене розходженням променя і, як наслідок, його згасанням (тобто вирівняти чутливість по глибині ОК). ВРЧ повинна бути або настроєна, або виключена.

АД перетворює високочастотний сигнал електричних коливань у відеоімпульсний сигнал. Це дозволяє покращити якість зображення на екрані ЕПТ і спростити подальшу обробку сигналу. АД - це послідовна сукупність випрямляча і згладжуючого фільтра. В результаті детектування формується однополярна огинаюча.

ВП робить подальше підсилення прийнятого сигналу до напруги, необхідної для спостереження його на екрані УД2-12, і додатково виконує функцію придушення шумів, що реалізована у вигляді схеми компенсованої відсічки, тобто відсічки зі збереженням рівня корисного сигналу. При цьому сигнали, що перевищують певний рівень, надходять на екран без придушення. Сигнали нижче рівня відсічки (шуми) можуть бути частково або повністю придушені. Така відсічка дозволяє коректно порівнювати амплітуди сигналів між собою. Встановлювати великий рівень відсічки не рекомендується, оскільки із шумами можна придушити і корисний сигнал.

В електронно-променевій трубці в результаті термоелектронної емісії з катода випускається потік електронів. Завдяки модулятору і прискорювальним електродам потік електронів фокусується в промінь, що спрямовується до екрана через дві пари взаємно перпендикулярних пластин. Система відхилення променя тут електростатична. Внутрішня поверхня екрана покрита люмінофором - речовиною, здатною світитися при зіткненні з нею потоку електронів. На екрані ЕПТ у певному масштабі відтворюється процес розповсюдження ультразвукових коливань в ОК. Для цього вертикально відхиляючі пластини (у ЕПТ розташовані горизонтально, а електронний промінь відхиляється у вертикальній площині) підключаються до виходу ППТ, тобто до виходу ВП. На горизонтально відхиляючі пластини (розташовані вертикально), подаються пилкоподібні напруги протилежних полярностей (сигнал розгортки), що виробляються ГНР.

Строга лінійність прямого ходу променя ЕПТ визначає рівномірний масштаб розгортки на екрані по горизонталі. Для унеможливлення спостереження зворотного ходу променя ГНР формує імпульс підсвічення, що подається на модулятор ЕПТ. Тривалість цього імпульсу дорівнює тривалості прямого ходу променя, що у свою чергу визначає розміри зони контролю, тобто товщину тієї ділянки ОК, де можуть бути зареєстровані луно-сигнали від дефекту. Зміна тривалості пилкоподібної напруги обох полярностей і імпульсу

підсвічення відбувається синхронно. При цьому амплітуда пилкоподібної напруги залишається постійною при будь-якій тривалості розгортки.

У дефектоскопі УД2-12 реалізовані два режими контролю: "від поверхні" (режим синхронного запуску розгортки) і "по шарах" (режим затриманої розгортки). Режим по шарах доцільно застосовувати при контролі деталей, оскільки в режимі від поверхні масштаб зображення по горизонталі на екрані може виявитися занадто дрібним, що не дозволить роздільно спостерігати близько розташовані відбивачі.

АСД робить часову і амплітудну селекцію сигналів з виходу ППТ і здійснює керування додатковими вбудованими індикаторами: звуковим і світловим. Часова (тобто по товщині ОК) селекція необхідна для того, щоб на додаткові індикатори не надходили ЗІ, а також луно-сигнали від відбивачів поза зоною контролю. Для цього формують строб-імпульс, параметри якого можна змінювати в певних межах. Амплітудна селекція необхідна для того, щоб додаткові індикатори спрацьовували тільки в тому випадку, якщо застробовані сигнали перевищують певний рівень (для луно-методу) або стають менше даного рівня (для тіньового і дзеркально-тіньового методів). В УД2-12 формується три пороги АСД, і до них прив'язані три індикаторні лампи: зелена - нижній, жовта - середній, червона - верхній пороги спрацьовування АСД. Рівні порогів регулюються по висоті екрана, непотрібні пороги можна "загнати" нагору за екран. Прийняті два пороги чутливості: пошуку й оцінки, які можна прив'язати до яких-небудь двох з названих індикаторних ламп, зазвичай червоної й зеленої. При роботі з використанням луно-методу горить завжди тільки одна індикаторна лампа. Звуковий індикатор збуджується тільки тоді, коли горить зелений індикатор і натиснута кнопка «» на блоці А10, а також протягом деякого часу після віджаття цієї кнопки або відключення зеленої лампи. Така робота звукового індикатора виключає пропуск зміни сигналу по амплітуді нижнього рівня порога спрацьовування, навіть якщо зелена лампа включалася на дуже короткий час, і дефектоскопіст зорозумів не зафіксував її

включення. При перевищенні жовтого або червоного рівня звуковий індикатор не спрацьовує. При тіньовому чи дзеркально-тіньовому методі звуковий індикатор не збуджується доти, поки є перевищення всіх рівнів, але якщо амплітуда стане нижче зеленого, то він збуджується.

Робота глибиноміра заснована на вимірюванні часу розповсюдження ультразвукових коливань від моменту випромінювання ЗІ до моменту прийому відбитого сигналу з перерахуванням у необхідну координату. У дефектоскопі УД2-12 вимірювання цього часу відбувається автоматично.

ГНР виробляє два пилкоподібних протилежних по полярності сигнали і імпульс підсвічення, виходи для яких фізично розділені. Імпульс підсвічення надходить на модулятор ЕПТ, а пилкоподібні сигнали – кожний на свою горизонтальну відхиляючу пластину.

Підготовка до роботи дефектоскопа вимагає забезпечити його заземлення, для чого гнучким дротом з'єднують шину захисного заземлення приміщення із клемою "Корпус" на задній панелі приладу. Після виконання цієї операції кабель живлення підключають до джерела мережевої напруги, а кабель із ПЕП - до вихідного і вхідного роз'ємів дефектоскопа, розташованих на передній панелі. Перед роботою з дефектоскопом необхідно засвоїти призначення, позначення і розташування основних органів керування, які знаходяться на передній та верхній панелях. Органи керування виконані у вигляді кнопок, потенціометрів, оснащених ручками і торцевими прорізами "під шліц"