

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв**

«На правах рукопису» УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

Л.Д. Писаренко
“ ”
2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 171 –Електроніка

Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»

на тему: **«Модернізація ультразвукового товщинометру на базі
ТУЗ-5»**

Виконав:

Студент 2 курсу, гр. ДЕ - 71мп **Коник Олександр Сергійович**

Науковий керівник:

Проф., д.т.н., **проф. Мельник І.В.**

Консультант:

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»**

Факультет (інститут) Електроніки

Кафедра Електронні прилади та пристрої

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – **171 – Електроніка (Електронні прилади та пристрої)**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

Л.Д. Писаренко

« »

2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Конику Олександрю Сергійовичу

1. Тема дисертації «Модернізація ультразвукового товщинометру на базі ТУЗ-5» науковий керівник дисертації проф., д.т.н., проф. Мельник І.В., затверджені наказом по університету від «07» 11 2018 р. № 4115-с.

2. Строк подання студентом дисертації: « » 2018 р.

2. Об'єкт дослідження:

3. Предмет дослідження:

4. Перелік завдань, які потрібно виконати:

5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:
структурна схема системи живлення, електрична принципова схема.

6. Дата видачі завдання: 01.02.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по ультразвуковим товщинометрам	10.02. 2018	
2.	Розробка алгоритму функціонування, функціональної схеми	28.02.2018	
3.	Розробка структурної системи	15.03.2018	
4.	Оформлення пояснювальної записки та плакатів. Підготовка доповіді.	05.10.2018	

Студент гр. ДЕ-71мп

О.С. Коник

Науковий керівник дисертації

І.В. Мельник

ВИЗНАЧЕННЯ, ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

У цій пояснювальній записці застосовують такі терміни з відповідними визначеннями:

h, H - товщина контрольованого виробу;

T - інтервал часу між акустичними сигналами

АС - акустична система

A-розгортка - форма представлення сигналів в прямокутних координатах на дисплеї, при якій амплітуда досліджуваного сигналу представляється відхиленням по осі ординат, а час від початку циклу відхиленням по осі абсцис

ВРЧ - тимчасове регулювання чутливості

ЖК дисплей - рідкокристалічний дисплей

Контактний перетворювач - притискається до поверхні виробу, попередньо змащеній рідиною (маслом, гліцерином і т.п.)

ЛЗ - лінія затримки

Зразок (міра) - засіб УЗ контролю у вигляді твердого тіла, признаного для зберігання і відтворення значень фізичних величин, використовуваних для перевірки або налаштування параметрів дефектоскопа і перетворювачів

ОЗУ - оперативно запам'ятовуючий пристрій

Оператор – чоловік, що володіє необхідною кваліфікацією і досвідом для здійснення управління об'єктами шляхом безпосереднього або дистанційного впливу на виконавчі механізми;

ПК - персональний комп'ютер

ПЛІС - програмована логічна інтегральна схема

ПЕП - п'єзоелектричний перетворювач

РС ПЕП- роздільно-суміщений ПЕП

C - швидкість поширення поздовжніх ультразвукових коливань;

СЗ - стандартний зразок

УЗ - ультразвуковий

Ехо-імпульс - акустичний імпульс, відбитий від неоднорідності в матеріалі або від межі об'єкта контролю.

ВСТУП

Розробка і безперервне вдосконалення передових методів і технологій виготовлення деталей і машин, висунула на перший план проблему підвищення їх надійності та довговічності. У рішенні цієї проблеми величезну роль відіграє неруйнівний контроль якості виробів.

При експлуатації і ремонті устаткування часто виникає необхідність визначити товщину стінки обладнання, виміряти розміри окремих деталей, визначити товщину біметалевих з'єднань, виміряти залишкову товщину стінок виробу, що зношується внаслідок особливостей технологічного процесу і експлуатації. Зменшення товщини стінки, як відомо, погіршує міцність виробів і може привести до аварій, якщо це не було виявлено вчасно.

У свою чергу підвищені вимоги до деталей і вузлів сучасних машин призводять до необхідності застосування легких металів і сплавів, з високою міцністю та жаростійкістю, а також до виготовлення окремих деталей і вузлів з них з дуже тонкими стінками і оболонками. Це призводить до необхідності різко підвищити точність вимірювальної апаратури і розширити її діапазон в область дуже малих товщини [1].

Головним завданням модернізації ультразвукового товщиноміра «ТУЗ-5» є підвищення точності при вимірюванні стінок виробів, за несприятливих для вимірювання умов (наявність зовнішніх електро-магнітних полів, що знижують точність проведення вимірів; неоднорідностей матеріалу та мікропошкоджень; поганого контакту між поверхнями перетворювача та зразка і т.д.).

Зазначена задача може бути вирішена за допомогою різних методів, проте мною пропонується використати алгоритми нечіткої логіки та розробити додатковий процесорний блок, для підвищення точності проведення ультразвукового контролю товщини виробів.

Мета роботи: розробити дослідний зразок цифрового блоку для прийому та обробки зондуючих сигналів для ультразвукового товщиноміра.

Вимоги до розробки:

- 1) Прилад призначений для визначення залишкової товщини виробів при односторонньому доступі до них.
- 2) Відстань (товщина матеріалу) визначається розрахунковим шляхом за даними прямих вимірювань часового інтервалу і швидкості поширення пружних хвиль в матеріалі стандартних зразків на яких проводиться калібровка.

- 3) Цифровий блок призначений для роботи на частоті 10 МГц (П112-10-6/2-Т-003) і проводити вимірювання в діапазоні 0,6 – 50,0 мм.
- 4) Прилад повинен підтримувати роботу з п'єзоелектричними перетворювачами як комплектними, так і стороннього виробництва в данному діапазоні.
- 5) Цифровий блок повинен знаходитися у робочому стані за кліматичних умов заявлених для експлуатації приладу(температура середовища від мінус 30 до плюс 50 °С; відносна вологість повітря до 95% при температурі 35 °С без конденсації вологи; атмосферний тиск від 84 до 106,7 кПа).
- 6) Цифровий блок повинен бути переносним і ергономічним.
- 9) Вартість цифрового блоку і похибка вимірювання мають бути мінімізовані.

Завдання роботи:

- 1) Вивчити існуючі товщиноміри (технічна документація, рекламні та наукові публікації) для вимірювання залишкової товщини виробів при односторонньому доступі до них.
- 2) Вивчити методи, на основі яких базуються принципи роботи даних товщиномірів.
- 3) Спроекувати документацію (схеми функціональні, електричні) і провести доробку існуючого приладу
- 4) Вибрати основний алгоритм нечіткої логіки для використання у цифровому блоці.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Методи вимірювання залишкової товщини виробів

На даний момент відомий і широко застосовується на практиці цілий ряд різних методів, заснованих на взаємодії з виробом ,який оцінюють, електричного струму, магнітного поля, рентгенівського випромінювання, а також за допомогою високочастотних і низькочастотних ультразвукових коливань. Принциповою відмінністю є фізичний ефект, на якому заснована робота товщиномера.

Принцип дії магнітного товщиноміра заснований на ефекті Холла, тобто при розташуванні об'єкта контролю в магнітному полі, в ньому виникає різниця потенціалів. Магнітні товщиноміри (наприклад, Magna-Mike 8500) призначені для вимірювання товщини неферромагнітних матеріалів: пластикових, скляних, алюмінієвих ємностей, композитних деталей, пакувальних матеріалів, автомобільних панелей та ін. Також, прилади використовуються і для вимірювання товщини немагнітних покриттів. Магнітні товщиноміри можна розділити на магнітовідривні і індукційні. Робота магнітовідривних товщиномірів заснована на вимірі сили відриву магніту від об'єкта контролю. Індукційні товщиноміри визначають зміну магнітного опору. Переваги магнітних товщиномірів - широкий діапазон вимірювань, низька похибка вимірів (2-3%), висока продуктивність контролю (час одного виміру 2-3 сек).

Вихроструміві товщиноміри призначені для вимірювання товщини діелектричних матеріалів, тобто тих, які не проводять електричний струм. З їх допомогою можна контролювати товщину пластмаси, гуми, скла, різних покриттів, нанесених на металеву основу. Принцип дії вихрострумівих товщиномірів заснований на методі вихрових струмів, що полягає в порушенні вихрових струмів в об'єкті контролю і реєстрації змін поля вихрових струмів, обумовлених зміною товщини. Перевагою таких товщиномірів є малий вплив шорсткості виробу на результати вимірювання.

Найбільш широкого поширення набула ультразвукова товщинометрія. Принцип її дії полягає в поширенні ультразвукових хвиль в об'єкті контролю. Ультразвукові товщиноміри вирішують найбільш широкий спектр завдань: вони використовуються для контролю товщини стінок труб, металопрокату, гуми, лакофарбових покриттів та ін. Сучасні ультразвукові товщиноміри (такі як MG2XT, UTG-8), дозволяють одночасно контролювати як товщину основного металу, так і покриття. Товщиноміри мають широкий

діапазон вимірювань: від декількох міліметрів до десятка сантиметрів; вони компактні і високопродуктивні (час контролю 2-3 сек.). При виборі товщиноміра, підприємства найчастіше зупиняються саме на ультразвукових товщиномірах. Це пов'язано з невисокою вартістю, широким спектром вирішуваних завдань, низькою погрішністю вимірювань при високій продуктивності.

Рентгенівські товщиноміри застосовуються в промисловості для вимірювання товщини від 0,3 мм і вище. Принцип дії заснований на тому, що при проходженні випромінювання через вимірюваний матеріал відбувається часткове поглинання променів. Ступінь поглинання залежить від товщини і властивостей матеріалу (його хімічного складу).

Принцип дії радіоізотопних товщиномірів такий же, як і у рентгенівських товщиномірів, використовуються джерело і приймач радіоізотопного випромінювання. Вимірювачі мають менші габарити, невисоку відносну вартість і простіші в експлуатації [1].

Так як завданням є модернізація ультразвукового товщиноміра, то в оглядовій частині роботи буде зосереджено увагу на акустичних методах контролю товщини виробу.

За фізичними принципами вимірювання товщини, акустичні товщиноміри поділяють на резонансні та ехо-імпульсні ультразвукові товщиноміри.

1.1.1. Резонансний ультразвуковий метод

Резонансні ультразвукові товщиноміри і їх різновиди (імпульсно-резонансні, Іммерсійна-резонансні і ін.), засновані на вимірюванні частоти, на якій в контрольованому виробі виникають стоячі хвилі, т. е. настає акустичний резонанс. Головною перевагою цих приладів перед ехо-імпульсними є можливість контролю виробів товщиною до десятих часток міліметрів з похибкою не більше 1-2%, тоді як мінімальна товщина металевих виробів, в яких виміри проводилися сучасними ехо-імпульсними методами, складала не менше 1 мм. Однак резонансним товщиномірам притаманний ряд істотних недоліків, від яких в значній мірі вільні ехо-імпульсні прилади: це конструктивна складність і складність експлуатації, необхідність високої чистоти і паралельності поверхонь підконтрольного виробу, вузький діапазон контрольованих товщин (як правило, не більше 5-10 мм) і т. д.

Слід зазначити також один з найсерйозніших недоліків резонансних товщиномірів контактного типу. Він полягає у впливі притиснутої

п'єзопластини на резонансну частоту виробу, що коливається. Залежно від товщини шару контактної мастила пік резонансної частоти зміщується, що викликає похибка в 1-3% [4].

Таким чином резонансний метод, при всіх його перевагах, непридатний для розробки толщиномерів, який повинен використовуватися в широкому діапазоні товщин. Розглянемо ехо-імпульсний ультразвуковий товщиномір, яким і являється ТУЗ-5.

1.1.2. Ехо-імпульсний ультразвуковий метод

Крім класичного ехо-імпульсного методу вимірювання товщини, про який мова піде нижче, існує цілий ряд різновидів імпульсного і фазового методів (геометричний ехо-метод, метод прямокутного імпульсу, метод вимірювання частоти повторення імпульсів, багаторазово відбитих в обсязі контрольованого виробу від його поверхонь, імпульсно-фазовий метод, різницево-частотний і ін). Однак ці різновиди методів вимірювання товщини, детально розглянуті в цілому ряді робіт, в даний час або взагалі не використовуються на практиці через принципово низьку точності вимірів, яку вони забезпечують, і низьку якість контролю (наприклад, ехо-метод) або призводять до невиправданого ускладнення апаратури, яке прийнятне тільки в тих випадках, коли вимагається прецизійне (з похибкою менш 0,1%) вимірювання товщини особливо відповідальних виробів. Наприклад, відомий метод вимірювання багаторазових відбиттів, або метод синхрокільця, при якому вимірюється частота повторення сигналів на виході генератора з затримуючим зворотним зв'язком, де роль акустичної лінії затримки виконує стінка вимірюваного виробу.

Класичний ехо-імпульсний метод вимірювання товщини опирається на здатності ультразвукових хвиль відбиватися від границі двох середовищ, що відрізняються характеристичним акустичним імпедансом (питомим хвильовим опором). В основі методу лежить вимірювання часу пробігу ультразвукових коливань (імпульсів) між поверхнями контрольованого об'єкта (покриття або тонкої стінки виробу) [4].

Для випромінювання і прийому ультразвукових імпульсів застосовуються суміщені і роздільно-суміщені п'єзоелектричні перетворювачі (надалі - перетворювачі або ПЕП).

Електричні імпульси зазвичай створюються ударним генератором. В процесі вимірювання електричні імпульси перетворюються перетворювачем

в акустичні, що проходять через акустичні лінії затримки і шар контактної рідини (наприклад, воду або машинне масло) в покриття (виріб) з частковим відбиттям від протилежного його боку (Малюнок 1.1.2.1.). Після відбиття від протилежного боку виробу, вони знову проходять через покриття (виріб), шар контактної рідини, акустичну лінію затримки і перетворюються перетворювачем в електричні імпульси, що надходять на вхід вторинного вимірювального перетворювача.

Використання ультразвукових низькочастотних пьезоперетворювачів необхідно в тих випадках, коли необхідна підвищена чутливість контролю (вимірювання малої товщини - десятих часток мм). Це, в свою чергу, тягне за собою збільшення довжини хвилі коливань, яка досить часто порівнянна з розміром контрольованого зразка.

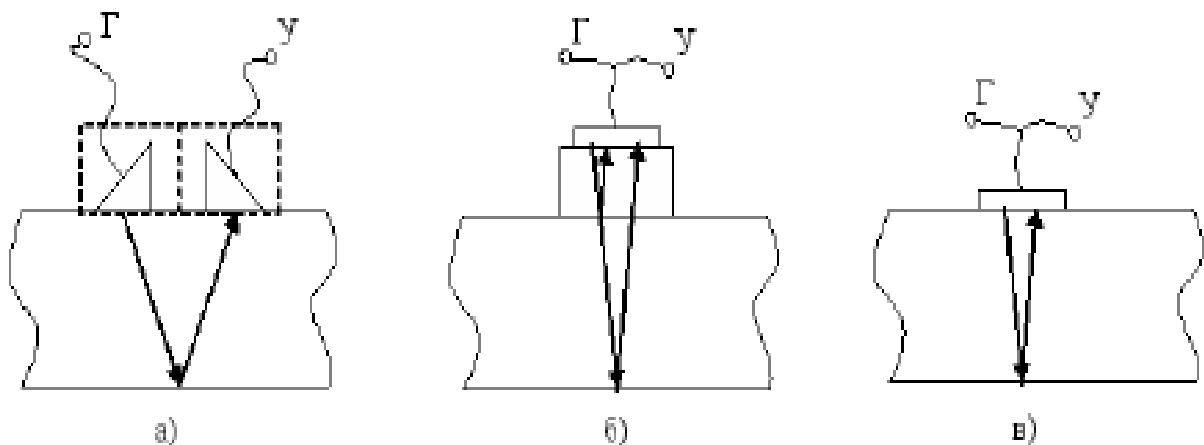


Рисунок 1.1.2.1. Типи акустичних трактів ехо-імпульсних товщиномірів: а) контактний із застосуванням роздільно-ссуміщеного ПЕПб) контактний із застосуванням суміщеного ПЕП з лінією затримки, в) контактний із застосуванням суміщеного ПЕП без лінії затримки.

Частота близько 150 - 200 кГц в даному випадку є компромісною частотою, тобто при заданій величині вдається зберегти високу чутливість, не втрачаючи роздільної здатності контролю. Подальше ж зниження частоти не здатне забезпечити необхідну точність вимірювання товщини виробу.

Виходячи з конкретних завдань, що реалізуються в практиці товщинометрії, досить часто виміри доводиться проводити всередині технологічних отворів, що тягне за собою ряд проблем:

- Перетворювач необхідно підібрати з обмеженим діаметром. Ця обставина ускладнює вимоги до конструктивних характеристик перетворювача, а також вимоги до завадостійкості.
- Площа контакту виробу з перетворювачем обмежена. Необхідно використовувати роздільно-суміщений перетворювач, внаслідок чого ми змушені спостерігати велику амплітуду сигналу наведення, що маскує істинний сигнал.
- Проблем із забезпечення рівномірного акустичного контакту по всій поверхні перетворювача. Поверхня підконтрольного виробу в рідкісних випадках відрізняється своєю гладкістю, в більшості ж випадків це шорстка, а часто і не пласка поверхня, контроль якої викликає труднощі.

Все це зумовило ще одну вимогу до ультразвукових низькочастотних перетворювачів - забезпечення рівномірного сухого акустичного контакту з непласкою і шорсткою поверхнею виробів [5].

У ряді випадків ехо-імпульсний метод може бути застосований для вимірювання товщини покриттів, коли неможливе застосування методів, що використовують електромагнітне поле, наприклад, коли діелектричні покриття нанесені на основу з немагнітних і неструмопровідних матеріалів (дерево, бетон і т. п.). В такому випадку доцільно використовувати високочастотні перетворювачі.

Розглянемо докладніше режими вимірювань, що використовуються при ехо-імпульсному методі ультразвукової товщинометрії.

1.2. Режими вимірювань ехо-імпульсного методу

Методи проведення ультразвукових вимірювань товщини можуть класифікуватись відповідно до ехосигналу, обраним для визначення часу проходження імпульсу через тестовий зразок.

Така класифікація дозволяє виявити три основні режими (рисунки 1.2.1.):

- 1) Зондуючий імпульс - перший відбитий ехо-сигнал;
- 2) Ехо від поверхні - донний ехо-сигнал;
- 3) Ехо-відлуння.

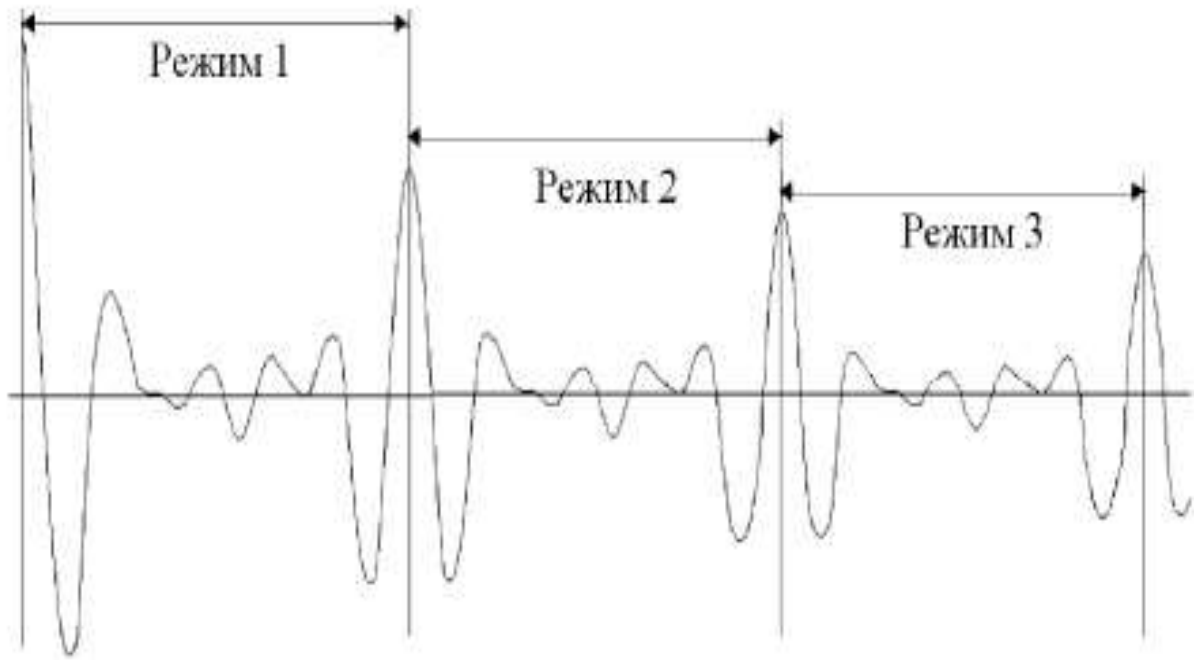


Рисунок 1.2.1. Режими вимірювань

Режим 1. Вимірювання проводяться між зондуєчим імпульсом і першим, відбитим від задньої стінки тестового матеріалу сигналом (донним сигналом). Даний метод забезпечує ефективну передачу сигналу в більшості конструкційних матеріалів. Якщо проведення вимірювань контактним перетворювачем в Режимі 1 допустиме і дозволяє досягти необхідної точності вимірювань, то найкраще скористатися ним.

Контактні вимірювання можуть проводитися при мінімальній товщині не нижче 0,5 мм для металів або 0,125 мм для пластику з похибкою в 0,025 мм. Цей тип перетворювачів не варто використовувати при температурах тестової поверхні більше 50 0 С. При більш високих температурах через термічне розширення відбувається порушення внутрішніх зв'язків перетворювача.

В цьому режимі вимірювань, у часовий відрізок між початковим імпульсом і відбитим ехосигналом входить так само час поширення імпульсу через поверхню перетворювача і контактне мастило, а також затримка в кабелі та інші зміщення, завдяки яким відбувається збільшення часу проходження або зміна частотного спектра ехосигналу, що вивчається. Уникнути подібних наслідків дозволяє функція компенсації нуля, яка підсумовує дані інтервали і віднімає із загального часу проходження сигналу. Зазвичай, калібрування

компенсації нуля здійснюється при заміні перетворювачів. Подібна процедура проводиться за допомогою стандартних зразків з відомою товщиною і швидкістю звуку або, якщо швидкість звуку невідома, для визначення параметрів швидкості і положення нуля можуть використовуватися два калібрувальних зразка різних розмірів відомої товщини.

Режим 1 є основним режимом роботи приладу і рекомендується для проведення більшості вимірів, крім випадків і умов, характерних для режимів 2 і 3;

Режим 2. Зазвичай використовується для проведення досліджень в умовах високих температур перетворювачем з лінією затримки; вимірювань увігнутих поверхонь і опуклих радіусів; вимірювань в замкнених обсягах іммерсійним перетворювачем або п перетворювачем з лінією затримки; для проведення оперативних досліджень рухомих матеріалів іммерсійним перетворювачем.

У Режимі 2 вимірювання здійснюються між двома ехо-сигналами, наступними за початковим імпульсом. Зазвичай в вимірах використовується ехосигнал від границі між лінією затримки або рідиною і зовнішньою поверхнею тестового зразка, а також відбитий від внутрішньої поверхні матеріалу ехосигнал (донний).

При використанні Режиму 2 вимірювань повинні дотримуватися деякі умови, що виникають з необхідності отримання двох відповідних ехосигналів. По-перше, потрібно переконатися в існуванні ехосигнала від поверхні. Іноді при проведенні іммерсійних вимірювань таких матеріалів, як м'який пластик або силікон виникають ситуації, коли акустичний імпеданс матеріалу схожий з опором води. Подібні ситуації так само характерні для вимірювань, що проводяться перетворювачами з лінією затримки, акустичний опір яких відповідає даному параметру матеріалу (зазвичай, полімери). При невеликій відмінності акустичного імпедансу матеріалу і води / лінії затримки, виникає ехосигнал занадто низької амплітуди. У випадку з перетворювачем, подібна проблема може бути легко вирішена простою заміною лінії затримки, тоді як в іммерсійних вимірах вона може викликати великі труднощі при виборі інших іммерсійних контактних рідин (при вимірах гарячого пресованого пластика, що володіє схожим з водою акустичним імпедансом, часто досить перемістити перетворювач в область з більш низькою температурою, так як при зниженні температури пластика збільшиться його акустичний опір).

В даному режимі слід відстежувати фазу або полярність обох ехосигналів, і, відповідно, налаштовувати полярність і затримку нуля приладу для компенсації, в разі потреби, інвертування хвилі. Перекидання (зміна) фази зазвичай характерне для вимірювань пластику і металі, що здійснюються перетворювачем з лінією затримки. Пластикові лінії затримки і металеві поверхні утворюють границю низького і високого акустичного опору. Але та ж сама лінія затримки на полімерному матеріалі може представляти зворотне співвідношення імпедансу - високе - низьке. При різкій відмінності акустичного опору лінії затримки і матеріалу і виникає переверт фази хвилі. При неправильному налаштуванні приладу, коли калібрування відбувається на металевому зразку, а вимірюється пластик, помилки у вимірах неминучі. Зміна фази характерна і для іммерсійних вимірювань вигнутих поверхонь, де множинні взаємодії між формою променя, а також викривленнями зовнішньої і внутрішньої поверхонь значно впливають на форму ехосигнала. Відповідно для налаштування компенсації нуля в подібних ситуаціях, калібрування проводиться на зразках подібної форми.

Режим 3. У Режимі 3 відбувається вимір тимчасового інтервала між двома послідовними ехосигналами, які надходять після ехосигналу від поверхні. Цей метод використовується для дослідження тонких матеріалів, а також, коли потрібно забезпечити високу точність вимірювань. Режим 3 найчастіше застосовується при дослідженні конструкційних матеріалів з акустичним імпедансом більш ніж $10 \text{ гр} / \text{см}^2 \text{ сек}$ (в цю групу входить більшість металів, пластики і скло). Відображення в цих матеріалах мають одну полярність, відносна амплітуда ехосигналів визначається коефіцієнтом пропускання звукової енергії з матеріалу в полістирол або воду. Так як обидва ці матеріали мають відносно низький акустичний опір, співвідношення амплітуд двох послідовних ехосигналів зазвичай становить понад 0,5 або -6дБ. При використанні даного методу для матеріалів із значною відмінністю акустичного опору від зазначеного вище діапазону, необхідно скомпенсувати різницю амплітуд послідовних ехосигналів для отримання заданої похибки вимірювань (це здійснюється з допомогою функції затримки нуля). На виробничих лініях в Режимі 3 частіше використовуються перетворювачі з лінією затримки. Вони можуть використовуватися в діапазоні від 0,075 мм до 12,5 мм, в залежності від частоти перетворювача і довжини лінії затримки. Як і в випадку з вимірюваннями контактними перетворювачами, при зменшенні радіуса викривлення, повинен відповідно зменшуватися радіус або розмір елемента лінії затримки.

При проведенні точних вимірювань оброблених машинним способом деталей з чистою поверхню менше 3 мкм, вимірювання в Режимі 3, виконані перетворювачем з лінією затримки, дають більш точні значення, ніж контактні перетворювачі в Режимі 1. Це пов'язано з тим фактом, що в разі послідовних відбиттів ехосигналів товщина шару контактної рідини не входить в функцію розрахунку значення товщини матеріалу, як це відбувається при вимірюванні контактними перетворювачами. Такий же принцип справедливий і для пофарбованих поверхонь, де багаторазові ехосигнали утворюють відображення в металі або іншому матеріалі з високим коефіцієнтом опору, а не в фарбі. Проте, Режим 3 також має свої межі застосування. Даний режим можна використувувати тільки в разі виникнення багатьох добре помітних ехосигналів. Дана вимога істотно звужує рамки використання даного режиму вимірювань для матеріалів з відносно низьким коефіцієнтом загасання і високим акустичним опором (дрібнозернисті метали, скло та кераміка). У третьому режимі, за рахунок проникаючої здатності досягається висока точність вимірювань. Він не використовується на дуже викривлених або пошкоджених корозією поверхнях (при поганому стані поверхні звукова хвиля загасає, і другий ехосигнал просто не спостерігається). Режим 3 використовується у випадках, коли в режимі 1 та 2 цієї статті не досягається необхідна ступінь точності [4].

Висновок:

Ультразвукові вимірювання товщини з використанням контактного перетворювача в Режимі 1 - це один з найпростіших способів вимірювань, який може бути використаний для реалізації більшості прикладних задач. Для більшості матеріалів даний метод забезпечує хороше зчеплення при передачі ультразвуку в тестовий зразок. Контактні вимірювання в Режимі 1 можуть проводитися, якщо товщина матеріалу не менше 0,12 мм для пластику або 0,25 мм для металів, задана похибка вимірів не більше 12,5 мкм, тестовий зразок знаходиться при кімнатній температурі, а його геометрія дозволяє використовувати контактний ПЕП. Режими 2 і 3, як це вже відмічено вище, зазвичай використовуються, якщо вимоги до вимірювання не дозволяють використовувати Режим 1.

1.3. Види ПЕП

Вибір відповідного перетворювача ґрунтується на необхідному діапазоні вимірювань, акустичних властивостях матеріалу і геометрії

деталі. При виборі слід експериментувати з тестовими зразками, що представляють потрібний діапазон товщини .

В основному, для отримання прийнятних результатів рекомендується використовувати перетворювач з більшою частотою і меншим діаметром. Перетворювач з невеликим діаметром легше позиціонується і вимагає меншого шару контактної рідини. Більш того, висока частота викликає скорочення часу встановлення ехосигналу і, теоретично, до збільшення точності вимірювань.

З іншого боку, через акустичні властивості матеріалу і особливості його поверхні може знадобитися низькочастотний перетворювач для подолання поганого зчеплення з матеріалом і випадків ослаблення сигналу, що виникають через розсіювання або загасання. Іноді досягнення кращої роздільної здатності здійснюється за рахунок зниження проникаючої здатності. Таким чином, для покриття певного діапазону товщини можуть використовуватися два або більше перетворювача.

Незалежно від типу використовуваного перетворювача, важливо, щоб він був розроблений спеціально для товщинометрії. Це означає, що вони повинні бути широкосмуговими або сильно демпфовані, іншими словами, повинні мати короткий передній фронт. В протилежному випадку, амплітудні варіації сигналів можуть викликати півхвильові помилки [6].

Найбільше застосування в практиці ультразвукової товщинометрії отримали:

- роздільно-суміщені ПЕП;
- суміщені ПЕП;
- суміщені ПЕП з лінією затримки.

1.3.1. Роздільно-суміщений ПЕП

Розглянемо більш докладно роздільно-суміщений пьезоелектричний перетворювач (Рис. 1.3.1.1.), що найчастіше використовується в ультразвукових товщиномірах ручного контролю.

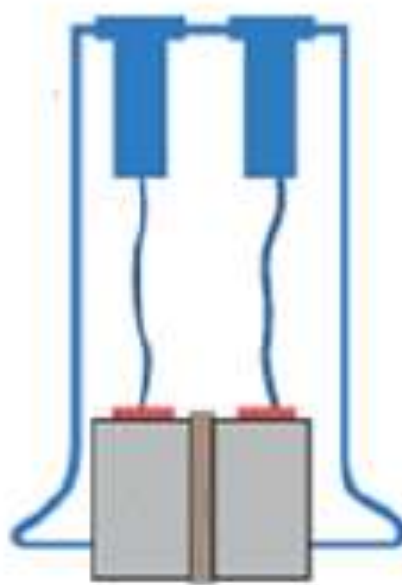


Рисунок 1.3.1.1. Роздільно-суміщений ПЕП

Такий перетворювач має 2 роздільних п'єзоелемента: один для випромінювання ультразвукового імпульсу, другий для прийому відбитого. Ці п'єзоелементи наклеюються на призми, ретельно електрично і акустично екрануються один від одного і встановлюються спільно в одному корпусі. Перетворювач також містить роз'єми, до яких підключаються виводи п'єзопластин. Роздільний шар між цими двома елементами - електроакустичний екран - повинен забезпечити якомога більше згасання ультразвуку. Зазвичай, для цього екрану використовують такі матеріали як пробка, пінопласт і ряд інших [7, 8, 9].

На рисунку 1.3.1.2. зображена схема поширення ультразвукового імпульсу і його відбиття на границі розподілу, а також часова діаграма, що ілюструє цей процес.

У момент t_0 ультразвуковий генератор починає формувати ударний імпульс $u(t)$ збудження, що збуджує акустичний імпульс $a(t)$, який поширюється через акустичну лінію затримки в покриття (момент t_1), що відбивається від протилежної границі (момент t_2), який надходить на другу лінію затримки (момент t_3) і через неї на приймальну п'єзопластину (момент t_4).

Прийшовши на п'єзопластину імпульс $a_2(t)$, перетворюється в електричний імпульс $u_2(t)$. Часовий інтервал $2t_n = t_3 - t_1$

пропорційній товщині покриття. Товщина покриття в цьому випадку може бути обчислена за формулою:

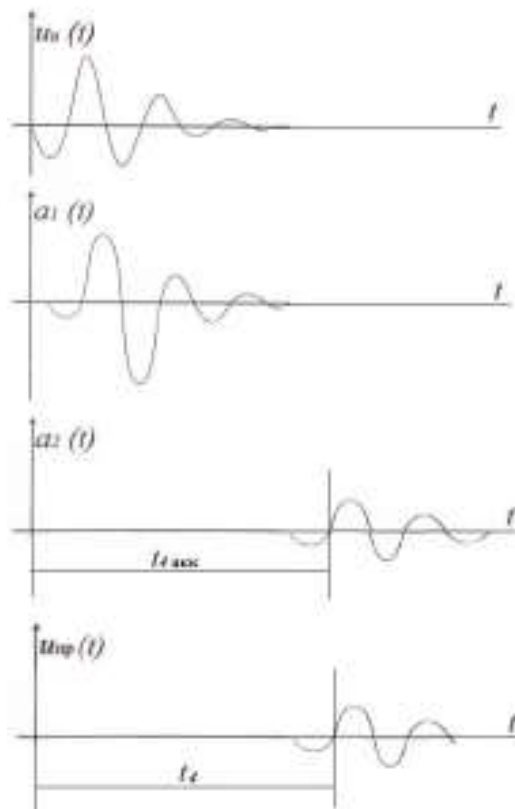
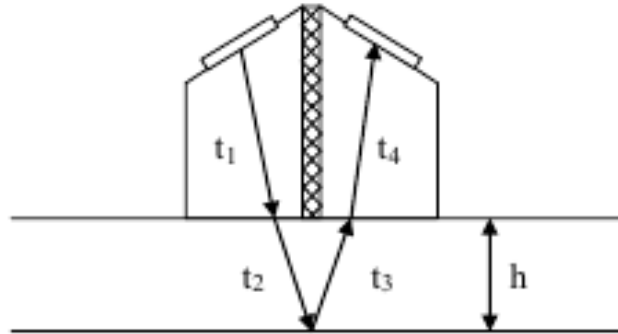


Рисунок 1.3.1.2. Схема поширення ультразвукового імпульсу і відбиття на границі розділу для роздільно-суміщеного перетворювача (а), а також часова діаграма, що ілюструє цей процес (б)

$$h = 0,5 \cdot c \cdot (2t_n) = 0,5 \cdot c \cdot (t_4 - (t_1 - t_0) - (t_4 - t_3)) = 0,5 \cdot c \cdot (t_4 - \tau_1 - \tau_2),$$

Де t_1 і t_2 – час поширення акустичних імпульсів у лініях затримки.

Момент t_4 спрацьовування компаратора вторинного перетворювача відповідає зафіксованому сумарному часу розповсюдження ультразвукового імпульса. Він квантується імпульсами високої частоти $f_{кв}$ і код, що отримується $N=f_{кв} \cdot t_{сум}$ підраховується лічильником і в подальшому обробляється мікроконтроллером для обрахунку товщини [10].

Роздільно-суміщені перетворювачі проводять вимірювання товщини за першим донним сигналом і мають ряд переваг. Однак, існують і недоліки. Одним з недоліків такої конструкції є те, що матеріал електроакустичного екрану має низьку стійкість до стирання і при роботі з перетворювачем в першу чергу з ладу виходить екран. Це призводить до прямого проходження акустичного сигналу від п'єзоелемента генератора на приймальний п'єзоелемент перетворювача, підключеного до підсилювального входу товщиноміру, що призводить до практичної неможливості подальшого використання перетворювача.

Іншим значним недоліком, властивим роздільно-суміщеному перетворювачу, є відмінність від лінійної залежності часу приходу імпульсу від вимірюваної товщини, що виникає внаслідок просторового рознесення передавального і приймального п'єзоелементів і помітно проявляється при малих значеннях товщини. В роботі [11] досліджується зв'язок між значенням товщини і часом приходу відбитого імпульсу і показано, що для отримання похибки вимірювань менше 1% для серійного роздільно-суміщеного перетворювача П112-5 на 5 МГц користуватися лінійною залежністю часу приходу від товщини можна, починаючи тільки з 10 мм. Крім того, способи вирівнювання цієї характеристики вимагають знання параметрів конкретного перетворювача, що змінюються в процесі його експлуатації.

Роздільно-суміщені перетворювачі серійних товщиномірів загального застосування зазвичай мають робочі частоти від 1МГц до 10 МГц і призначені для вимірювання залишкової товщини стінок металевих виробів в діапазоні від 0,4 мм до сотень мм (швидкість поширення ультразвуку у яких від 2200 до 6500 м / с) і ізотропних пластиків (швидкість поширення

ультразвуку у яких складає 2100 ... 2500 м / с) загального застосування (наприклад ABS) в діапазоні від 0,35 мм до десятків мм. Мінімальна забезпечувана похибка вимірювання при цьому становить, порядку, 0,03 ... 0,1 мм [9].

Підіб'ємо підсумок по роздільно-суміщеним ПЕП:

- Можливість роботи з простою елементною базою приладу. Розподіл функції випромінювання і прийому сигналу, можуть використовуватися прості підсилювачі без перевантаження генератора імпульсів. Керована зміна параметрів контролю відповідно до відстані, досить просте автоматичне регулювання підсилення (АРП).
- Добре підходять для контролю досить тонких виробів (від 1 мм) з шорсткою поверхнею, а також для пошуку виразкової корозії, пористості і невеликих дефектів.
- Потрібно внесення поправки на V-схему ходу променів. Поділ елементів значно знижує чутливість при контролі тонкостінних матеріалів. Мінімальна товщина, що може бути практично виміряна складає близько 1 мм.

1.3.2. Суміщений ПЕП

У порівнянні з роздільно-суміщеним перетворювачем прямий суміщений п'єзоелектричний перетворювач має більш просту конструкцію (Рисунок 1.3.2.1.)



Рисунок 1.3.2.1. Суміщений ПЕП

Основними елементами перетворювача є: п'єзоелектрична пластина товщиною, що відповідає робочій частоті перетворювача, демпфер і протектор. Ці компоненти з'єднуються, наприклад, за допомогою клею і

поміщаються в корпус. Перетворювач може містити також роз'єм, до якого підключаються виводи п'єзопластини. Іноді, з метою корекції властивостей перетворювача, вводяться додаткові електричні компоненти. П'єзоелемент перетворювача навантажується за допомогою демпфера, що дозволяє генерувати короткі ультразвукові імпульси. Різні варіанти матеріала демпфера наведені в роботах [7, 8]. Передня частина п'єзопластини захищена тонким шаром протектора, що захищає її від зносу.

Завдяки такій конструкції зносостійкість суміщеного перетворювача виявляється набагато вище, ніж роздільно -суміщеного. Крім того, при використанні такого перетворювача залежність часу затримки від вимірюваної товщини є лінійною у всьому діапазоні товщини.

Основною проблемою, що виникає при використанні суміщеного перетворювача для УЗ товщиномірів, є велика протяжність «мертвої зони», що зазвичай призводить до висновку про неможливість використання цих перетворювачів при вимірюванні малих товщин [9].

Отже, суміщені перетворювачі характеризуються наступними параметрами:

- Прямий шлях ходу ультразвукового променя.
- Низька чутливість поверхневого шару через малий час затримки після зондуючого імпульсу. Можуть використовуватися для контролю виробів з мінімальною товщиною стінки близько 3 мм.
- Відсутність затримки відбитого сигналу дозволяє використовувати ПЕП в широкому діапазоні частот.
- Сила ультразвукового імпульсу значно послаблюється при контролі з великої відстані, що часто вимагає ручного налаштування підсилення і застосування стробування.
- Стандартно випускаються з твердою робочою поверхнею стійкою до зносу.
- Зазвичай використовуються з одноелементними толщиномірами для контролю товстостінних матеріалів.
- Контактні суміщені перетворювачі використовуються для вимірювань, коли очікувана товщина об'єкта контролю перевищує 2,5 мм [6].

1.3.3. Суміщений ПЕП з лінією затримки

Поєднані п'єзоперетворювачі з акустичною лінією затримки (Рисунок 1.3.3.1.) найчастіше застосовують для вимірювання товщини нижче 5-10 мм, так як для вимірювання великої товщини довелося б різко збільшувати їх габаритні розміри за рахунок збільшення довжини лінії затримки.

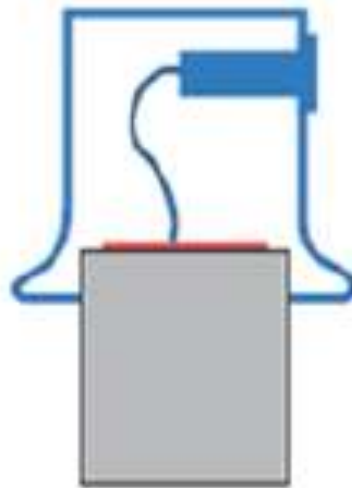


Рисунок 1.3.3.1. Суміщений ПЕП з лінією затримки

Суміщений перетворювач з лінією затримки дозволяє реалізовувати імпульсний ехометод вимірювання по багаторазовим донним сигналам (перевідбиттів в покритті або виробі). При цьому зазвичай ведуть підрахунок сумарного часу пробігу t тимчасових інтервалів між першим і n -ним донними сигналами, щоб виключити час пробігу в акустичних лініях затримки. Формула для розрахунку товщини покриття (виробу) в цьому випадку буде мати вигляд [10]:

$$h = 0,5 \cdot C \cdot t_{\text{сум}} / (n - 1).$$

На рисунку 1.3.3.2. зображена схема поширення ультразвукового імпульсу і його відбиття на границі розподілу для суміщеного перетворювача з лінією затримки, а також часова діаграма, що ілюструє цей процес.

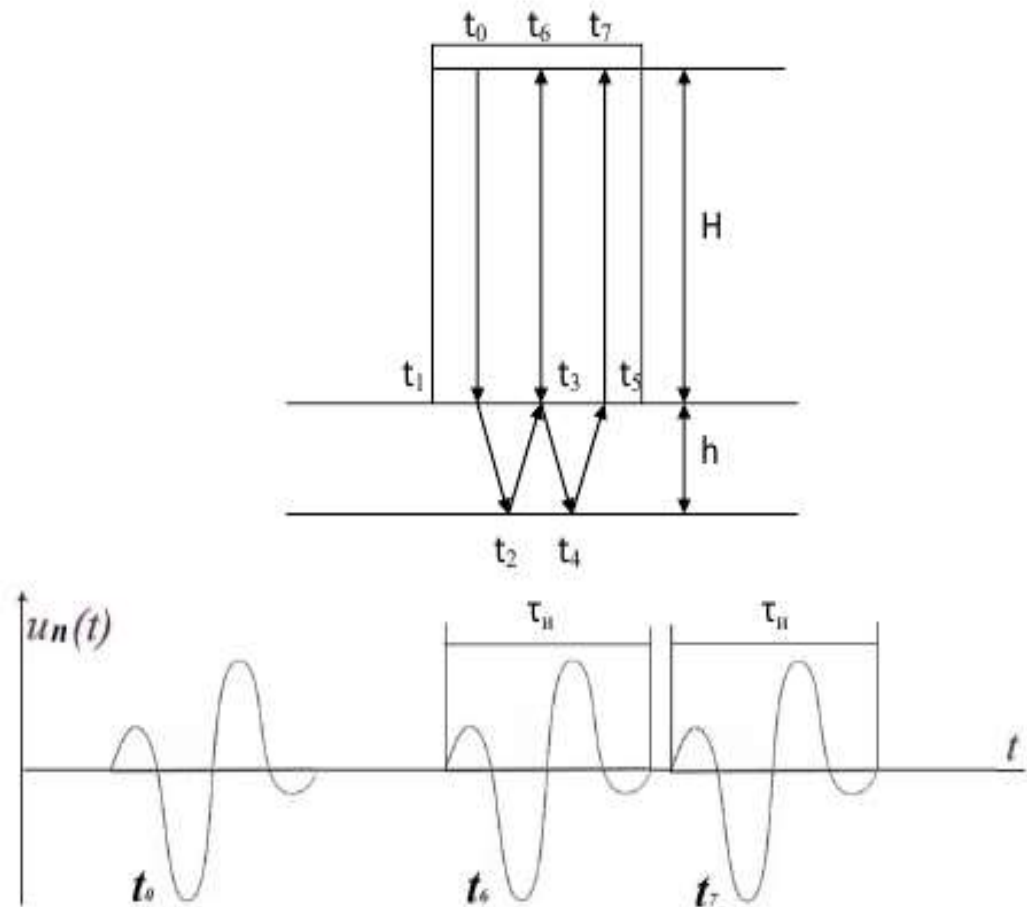


Рисунок 1.3.3.2. Схема поширення УЗ імпульсу і часова діаграма

Перевагою перетворювача є простота конструкції і незалежність результату від товщини шару контактної рідини, недоліки - необхідність випромінювання і прийому коливань одним пьезоперетворювачем.

Прямі суміщені перетворювачі з лінією затримки серійних товщиномірів загального застосування мають робочі частоти від 10 МГц до 20 МГц і призначені для вимірювання товщини стінок металевих, скляних і пластикових плоскопаралельних виробів з малою шорсткістю в діапазоні від десятків мкм до декількох десятків мм з мінімальною похибкою на рівні 0,01 ... 0,03 мм.

Підіб'ємо підсумок по суміщеним ПЕП з лінією затримки:

- Прямий шлях ходу ультразвукового променя - не потрібно внесення поправки на V-схему ходу променів. Придатні для контролю тонкостінних матеріалів (аж до товщини близько 0,2 мм).

- Внутрішнє перевідбиття сигналу обмежує максимальну корисну вимірювану товщину матеріалу часом рівним довжині лінії затримки, яка зазвичай дорівнює 25 мм.
- Стандартно постачаються зі змінними призми, можуть комплектуватися притертими призми для контролю викривлених поверхонь.
- Перетворювачі з лінією затримки використовуються для вимірювань товщини тонких об'єктів з товщиною від 0,2 мм, при цьому поверхні повинні бути чистими і паралельними.

1.4. Діапазон вимірювань товщини ехо-імпульсними товщино мірами

Діапазон, товщини, що піддаються вимірюванню за допомогою ехо-імпульсних товщиномірів, залежить від багатьох чинників, які можливо розбити на дві основні групи: фактори, що обмежують діапазон в сторону вимірювання малої товщини, і фактори, що обмежують діапазон вимірювань в бік великих товщин.

Діапазон вимірювань в області малих товщин обмежується мертвою зоною перетворювачів і роздільною здатністю електроакустичного тракту, під яким будемо розуміти генератор імпульсів, пьезоперетворювач, виріб, що вимірюється, підсилювач ехо-імпульсів і схемні вузли, що узгоджують підсилювач і генератор в разі використання суміщених п'єзоперетворювачів [4].

Хід ультразвукових променів в акустичному тракті з роздільно - суміщеним пьезоперетворювачем показаний на рисунку 1.4.1. максимум чутливості, або максимум амплітуди A відбитого сигналу, знаходиться приблизно в районі точки перетину акустичних осей п'єзоперетворювачів, що випромінює $(\)$ і приймає $(\)$.

Варто відзначити, що зі зменшенням товщини вимірюваного виробу амплітуда першої напівхвилі ехо-імпульсу падає набагато швидше амплітуди інших напівхвиль. Це викликає небезпеку втрати хвилі навіть тоді, коли амплітуда сигналу в цілому може бути достатньо великою або навіть дещо зрости.

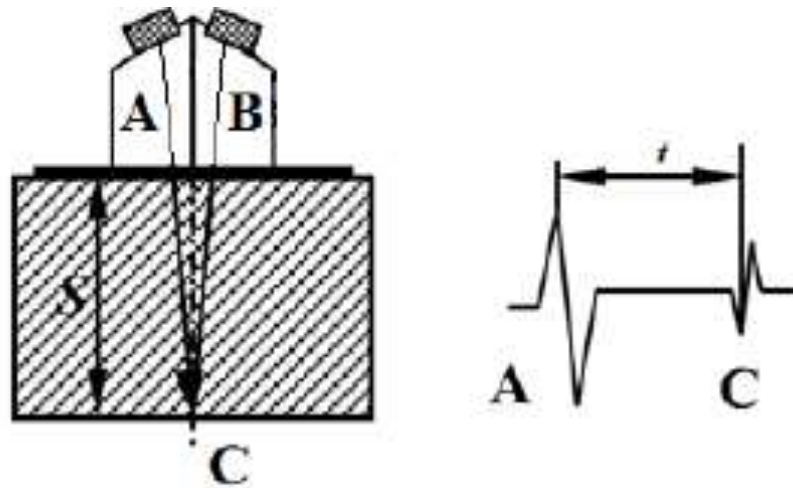


Рисунок 1.4.1. Акустичний тракт з роздільно-суміщеним п'єзоперетворювачем

Сказане наочно ілюструється Рисуноком 1.4.2., на якому показані графіки зміни максимальної амплітуди A_{\max} і першої напівхвилі ехо-імпульсу роздільно-сполучених п'єзоперетворювачів в залежності від товщини H вимірюваного виробу. Характер кривих для перетворювачів на 2,5 і 5 МГц вельми близький, однак для вимірів товщини нижче 5-10 мм слід використовувати частоту 5 МГц, так як при цьому вдвічі знижується методична похибка через більш крутий передній фронт ехо-імпульсів.

Обмеження товщини, що вимірюються за допомогою роздільно-суміщених п'єзоперетворювачів по максимуму, в основному визначається рівнем власних перешкод перетворювача, його чутливістю в дальній зоні, амплітудою імпульсу збуджуючого генератора і коефіцієнтом підсилення приймального підсилювача.

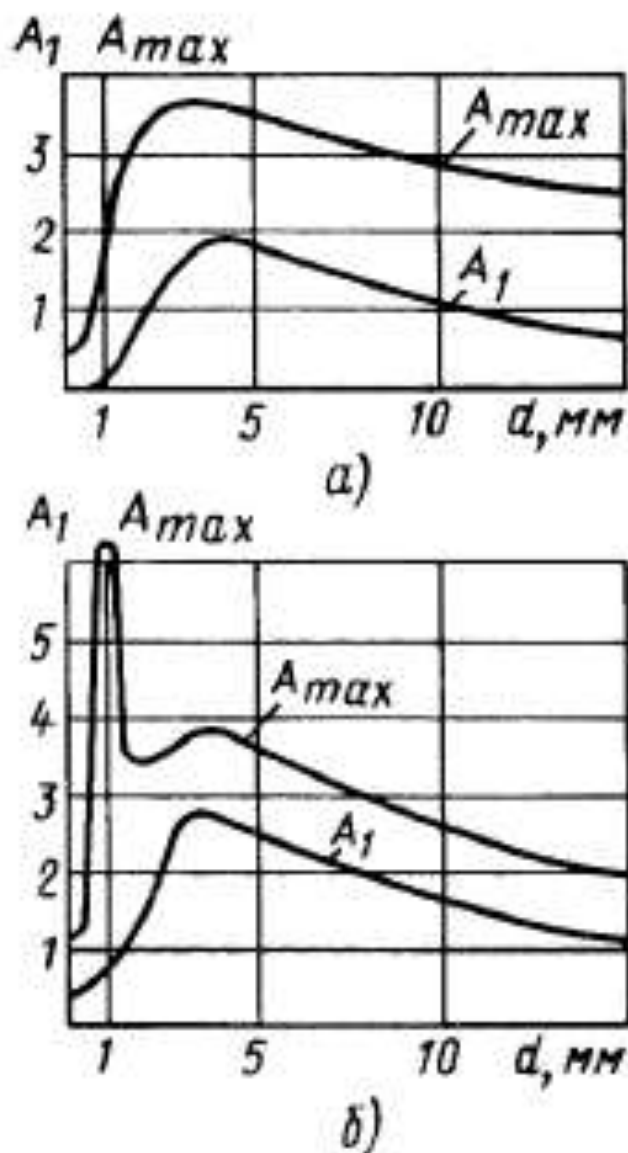


Рисунок 1.4.2. Залежність m_{max} амплітуди і амплітуди першого напівперіоду ехо-імпульсу в роздільно-суміщеному пьезоперетворювачі від товщини зразка: а-на 2,5 МГц; б-на 5 МГц

Однак нерідко істотну роль грає коефіцієнт загасання ультразвуку в матеріалі конкретного виробу, і максимальна товщина прозвучування може виявитися на практиці набагато менша від тієї, яка визначається попередніми міркуваннями.

Виходячи з цих міркувань, для розширення діапазону вимірювання товщини в більшу сторону доцільно зменшувати робочу частоту ультразвукових коливань, так як зі зниженням частоти затухання ультразвуку

різко знижується практично у всіх матеріалах. Це відноситься до всіх типів п'єзоперетворювачів [4].

1.5. Ультразвукові товщиноміри. Технічні характеристики серійних приладів.

Для того, щоб скласти орієнтуватися в характеристиках товщиномірів, була складена порівняльна характеристика технічних параметрів існуючих на ринку ультразвукових товщиномірів, які працюють за ехоімпульсного методу. У Таблиці 1.5.1. представлені п'ять ультразвукових ехо-імпульсних товщиномірів (УДТ-40, Булат 1S,45MG, T-Mike EL,DM5E) Дані товщиноміри обрані з умови найбільшої затребуваності серед фахівців, що займаються не-руйнівним контролем виробів, в ході маркетингового аналізу за 2016 рік.

Параметр	УДТ-40	Булат 1S	45MG	T-Mike EL	DM5E
Виробник	Кропус	Константа	Olimpus	StressT e	Krautkre mer
Ціна					
Вимірюван ня під шаром	Ні	Так0,5-75	Так	Так	Так
Діапазон температур ,град	-20..+55	-20..+50	-10..+50	- 18..+55	-10..+50
Діапазон вимірюван ня сталі,мм	3..300	0,6..600	1..635	1..510	0,6..300
Основна похибка,не більше		До 10 мм ±(0,005H+ 0,05)			
Діапазон швидкосте й УЗ	1000- 9999	1000-9999	508-18000	Від 2500	508- 18600
Розміри	160x225 x45	150 x 80 x 30	91,1x162x41,1	64x152 x32	138x32x 75
Вага	2,2 кг	220 г	430 г	400 г	223 г
Робота від аккумулят ора	8 год. (4 NiMh) 5 Ватт	150 год.	20-36 год.	40 год.	60 год.
Дисплей	ЄЛД		QVGA	LCD	ЖК

	240 x 128				
А-скан	+	-	+	-	-
В-скан	+	-	+	+	+
ПЕП	Суміщ., РС	Суміщ.,РС	Суміщ.,РС,вискотемп ературний	РС	Суміщ., РС
Частоти,М Гц	0,5-15	2,5-10	0,5-30	1-10	2-7,5

Дана порівняльна характеристика дозволяє висунути наступні вимоги для роботи цифрового блоку для товщиноміра ТУЗ-5, які загалом будуть повторяти вимоги до основних типів ехо-імпульсних товщиномірів:

- вимірювання товщини виробів проводяться на ділянках з еквідистантними поверхнями (листи, стінки труб і т.д.), а також на мають, що мають гладкі, грубі, ознаки корозії або пофарбовані по поверхні з шорсткістю поверхні до Rz 320;
- вироби можуть бути виконані з різних матеріалів, таких як сталь, титан, алюміній, пластик, кераміка, скло і т.д.
- товщиномір може експлуатуватися в лабораторних, цехових і польових умовах, в т.ч. в умовах впливу низьких температур;
- діапазон вимірюваних товщин (по сталі) становить: нижня межа не більше 1 мм, верхня межа - не менше до 300 мм;
- основна похибка вимірювання приладу не перевищує: в діапазоні від 1 мм до 9,99 мм $\pm 0,1$ мм; в діапазоні від 10,0 мм до 99,9 мм $\pm 0,2$ мм і в діапазоні від 100 мм до 300,0 мм ± 1 мм.
- дискретність індикації результатів вимірів - 0,01 мм;
- діапазон перебудови швидкості ультразвуку: нижня межа – НЕ більше 1000 м / с, верхня межа - не менше 10000 м / с;

2. РОЗРАХУНКОВО-ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1. Технічні характеристики і основи роботи з інтерфейсом товщиноміра.

Товщиномір складається з блоку електронного, ПЕП і пристрою зарядного. Діапазон вимірювань товщини (по сталі) становить від 0,6 до 300 мм. Діапазон вимірювань (по сталі) різними перетворювачами (ПЕП) повинні відповідати вказаним в таблиці 1.

Таблиця 1 - Умовне позначення ПЕП, діапазон вимірювань

Умовне позначення ПЕП	Діапазон вимірювання, мм
П112-10-6 / 2-Т-003	0,6-50,0
П112-5-10 / 2-Т-003	1,0-300,0

Діапазон вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань (УЗК) становить від 4000 до 6500 м / с з загасанням УЗК на частоті 5 МГц до 0,1 дБ / см. При цьому верхня межа вимірюваної товщини буде визначатися загасанням.

Граничні значення параметрів контрольованих об'єктів, що обмежують сферу застосування товщиноміра:

- максимально допустиме значення параметра шорсткості з боку введення УЗК - $R_z = 80$ мкм;
- максимально допустиме значення параметра шорсткості з боку, протилежній стороні введення УЗК - $R_z = 160$ мкм;
- мінімальний радіус кривизни поверхні з боку введення УЗК - 3 мм при товщині стінки 1 мм;
- максимальна непаралельність поверхонь - 3 мм на ділянці базової довжини 20 мм;
- максимальна температура поверхні контрольованого виробу - 50 °С.

Інші параметри контрольованих об'єктів, що обмежують сферу застосування товщиноміра, встановлюються в нормативній документації на конкретні види контролю.

Ціна найменшого розряду при індикації становить:

- при вимірюванні швидкості поширення ультразвуку - 1,0 м / с;
- при вимірюванні товщини виробу - 0,1 мм.

Конструкція товщиноміра забезпечує роботу в режимах підвищеної і зниженої чутливості для контролю матеріалів з високим загасанням УЗК і матеріалів з підвищеним розсіюванням УЗК на кристалічній структурі. Час встановлення робочого режиму товщиноміра не більше 10 с.

Електричне живлення товщиноміра здійснюється від наступних джерел:

- вбудованої акумуляторної батареї номінальною напругою 3,6 В постійного струму;
- зарядного пристрою, що підключається до мережі змінного струму напругою від 187 до 242 В, частотою (50 ± 1) Гц.

Габаритні розміри електронного блоку товщиноміра не більше 64 мм × 89 мм × 36 мм. Маса товщиноміра з одним ПЕП (без запасних інструментів і приладдя (ЗІП) і футляра) не більше 0,3 кг.

Зовнішній вигляд товщиноміра наведено на рисунку



1 - індикатор;

2 - зразок товщини «3 мм»;

3 - роз'єм для підключення зарядного пристрою;

4 - роз'єм для підключення ПЕП.

Функції кнопок товщиноміра:

« ON » - включення товщиноміра;

« K » - кнопка вибору режимів;

« ∇ Δ » - кнопки установки числових значень.

Процес підготовки до роботи виглядає наступним чином.

Приєднати до гнізда підключення ПЕП (див. Поз. 4, малюнок 1) толщиномера відповідний ПЕП на необхідний діапазон товщини вимірюваних виробів.

Включити толщиномер (клавiша) і переконатися, що не вироблений ресурс акумуляторних батарей (не блимає Децимальна точка в старшому розряді індикатора). При включенні толщиномер автоматично переводиться в режим «Вимірювання», (на малюнку 4 толщиномер знаходиться в режимі очікування, вимірювань при нормальній чутливості приймального тракту).

Примітки:

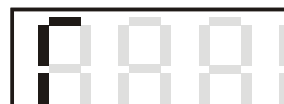
- 1 - Якщо ПЕП не підключений до товщиномірів мерехтіння точки відсутнє.
- 2 - В режимі вимірювання та індикації товщини децимальна точка в молодшому розряді горить безперервно, вказуючи на наявність акустичного контакту.

У разі розряду акумуляторної батареї зарядити. Ресурс батареї можна подивитися, натиснувши в режимі «Вимірювання» клавiшу «вниз». При рівні зарядженості батареї менше 10% у всіх режимах роботи товщиноміра починає блимати Децимальна точка в старшому розряді індикатора, нагадуючи про необхідність зарядити акумуляторну батарею. Після повного розрядження акумулятора на індикаторі запалюються всі децимальних точки, і толщиномер вимикається.

Перед початком роботи з підключеним ПЕП необхідно провести процедуру калібрування. Дана процедура служить для установки часової затримки в ПЕП і швидкості звуку в зразку матеріалу відомої товщини. Процедуру необхідно проводити в міру зносу ПЕП, але не рідше одного разу в робочу зміну в умовах, відповідних (по температурі, вологості, контактному середовищу) умовам виміру.

Калібрування товщиноміра при відомій швидкості УЗК («калібрування по С»)

Перебуваючи в режимі «Вимірювання», натиснути клавiшу $\sqrt{\text{К}}$.
На індикаторі короткочасно з'явиться зображення:



Потім на індикаторі висвітлиться встановлена швидкості УЗК:



Клавiшами $\sqrt{\nabla}$ або $\sqrt{\Delta}$ встановити значення швидкості УЗК в контрольованому матеріалі.

Натискання клавіші \sqrt{K} переводить товщиномір в режим калібрування «нуля» (6.7.2). При цьому толщиномер запам'ятовує знову встановлене значення швидкості УЗК.

Калібрування товщиноміра при невідомій швидкості УЗК («калібрування по Н»).

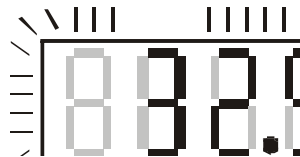
Якщо швидкість поширення УЗК в контрольованому виробі невідома, необхідно виготовити і атестувати зразок з відомою товщиною з того ж матеріалу. Товщина зразка повинна бути більше 20 мм.

Потім необхідно, перебуваючи в режимі калібрування по швидкості (6.4.1), встановити ПЕП (підключений до товщиномірів) через шар контактної мастила на підготовлений зразок з відомою товщиною.

На індикаторі короткочасно з'являється буква «Н» в старшому розряді:



Потім висвічується значення вимірної товщини в миготливому режимі:



При цьому необхідно, не знімаючи ПЕП з зразка, клавішами встановити на індикаторі дійсне значення товщини зразка.

При знятті ПЕП з зразка на індикаторі з'явиться нове значення швидкості УЗК, відповідне контрольованому матеріалу.

При використанні цифрового блоку схема калі бровки не змінюється, оскільки він являтиме собою проміжну ланку, що покращує технічні характеристики і на загальний функціонал та на методику роботи приладу дана розробка не впливає.

2.2. Структурна схема і принцип роботи товщино міра

Принцип роботи товщиноміра заснований на ультразвуковому імпульсному ехо - методі вимірювання, який використовує властивості УЗК відбиватися від кордону розділу середовищ з різними акустичними опорами. П'єзопластини ПЕП роздільно-суміщеного типу випромінює імпульс УЗК через лінію затримки (призму) в напрямку зовнішньої поверхні виробу, товщину якого потрібно виміряти. Імпульс УЗК поширюється в виробі до протилежної поверхні, відбивається від неї, поширюється в зворотному напрямку і, пройшовши лінію затримки (призму), приймається приймальною

п'езопластики. Час поширення УЗК від однієї поверхні виробу до іншого і назад пов'язане з товщиною виробу залежністю:

$$H = \frac{C \cdot t}{2}$$

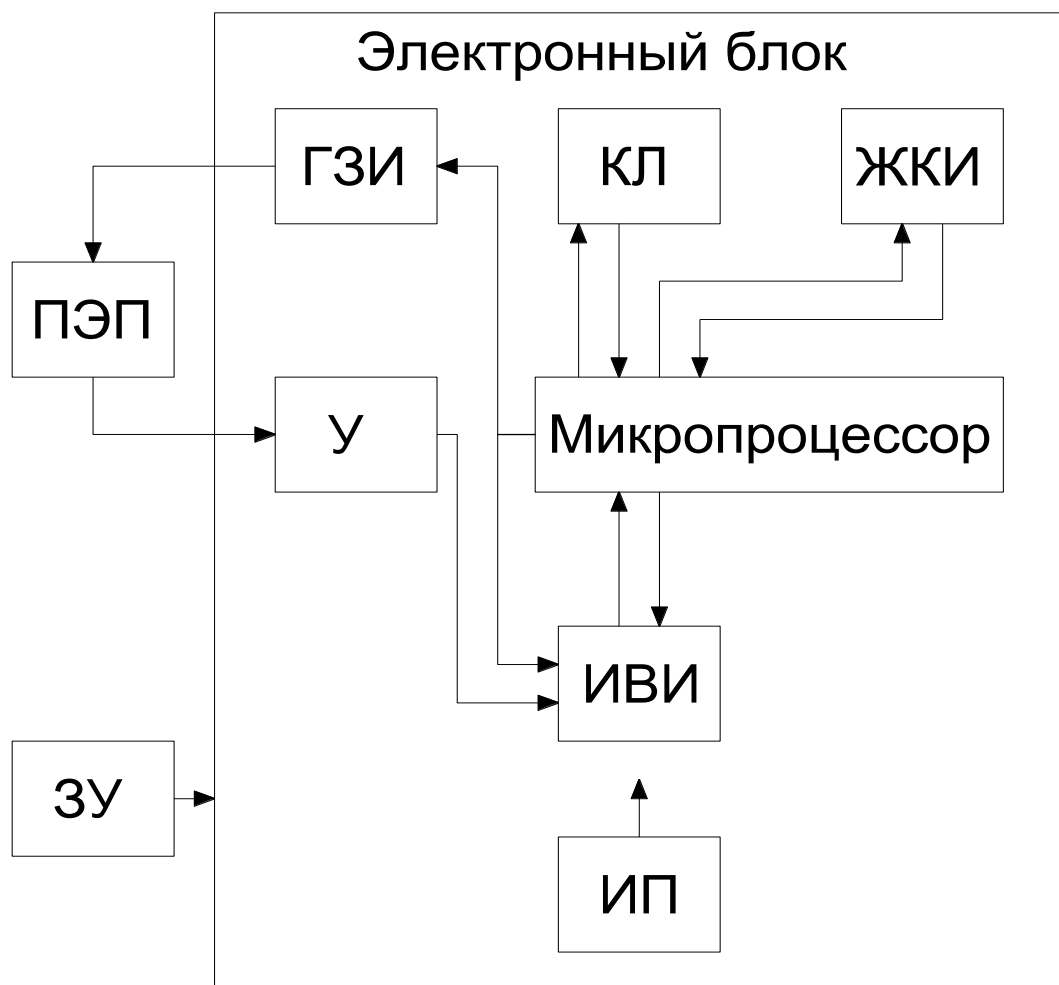
де H - товщина контрольованого виробу;

C - швидкість поширення УЗК в матеріалі виробу;

t - час поширення УЗК від однієї поверхні виробу до іншого і назад.

В процесі калібровки вимірюються часові інтервали (Рисунок 2.2.1) між донними сигналами в мікросекундах. Програмне забезпечення товщиноміра (прошивка) автоматично проведе розрахунки і врахує час проходження сигналом ПЕП.

Структурна схема товщиноміра приведена на малюнку:



ПЕП - п'єзоелектричний перетворювач;
 ГЗІ - генератор зондируючих імпульсів;
 КЛ - клавіатура;
 І - рідкокристалічний індикатор;
 У - підсилювач;
 ПЗУ - постійне запам'ятовуючий пристрій;
 ИВИ - вимірювач часових інтервалів;
 ПП - джерело живлення;
 ЗУ - зарядний пристрій

У комплект поставки товщиноміра входить роздільно-суміщений ПЕП. Електронний блок формує високовольний зондуєчий імпульсу для збудження ПЕП, посилення сигналу з виходу ПЕП, формування та вимірювання часового інтервалу, відповідного часу поширення УЗК від однієї границі виробу до іншої, математичну обробку отриманої інформації, зберігання змінних і проміжних результатів вимірювань, управління режимами роботи і індикацію результатів вимірювання безпосередньо в одиницях товщини. Електронна схема товщиноміра зібрана на друкованій платі, розміщеної в корпусі з алюмінієвого сплаву. Джерело живлення з трьох акумуляторних батарей ємністю 1000 мА · годину розташований всередині корпусу. Гарантований ресурс батарей - 500 циклів заряд - розряду. На верхній панелі корпусу знаходиться роз'єм для підключення зарядного пристрою і зразок товщини «3 мм». На бічній панелі корпусу знаходиться роз'єм для підключення ПЕП.

2.3. Основа теорії нечітких множин.

2.3.1. Лінгвістичні і нечіткі змінні.

Однією з областей застосування теорії нечітких множин є людино-машинні системи управління. Здійснення діалогу в таких системах немислимо без використання мов, близьких до природного, здатних описувати нечіткі категорії, наближені до людських понять і уявлень. У зв'язку з цим доцільно використовувати поняття лінгвістичної змінної, введеної вперше Л. Заде.

Подібні лінгвістичні змінні дозволяють адекватно відобразити приблизне словесний опис предметів і явищ в тому випадку, коли точне детерміноване опис відсутній. При цьому слід врахувати, що багато нечіткі

категорії, описані лінгвістично, часто не менш інформаційні, ніж точний опис.

Таким чином, нечітку змінну визначають її назву, область визначення, опис обмежень на можливі значення нечіткої змінної, які задаються функцією приналежності.

Щоб визначити лінгвістичну переменовану, необхідно задати її ім'я, множина значень, що представляють собою найменування нечітких змінних областю визначення, кожній з яких є безліч D .

Крім цих визначень необхідно задати правила, за допомогою яких з наявних елементів можуть виходити нові, а також правила, згідно з якими значеннями лінгвістичної змінної ставляться у відповідність нечіткі множини. Формально це представляється так:

$\langle L, T, D, G, M \rangle$,

де L - найменування лінгвістичної змінної;

T - безліч значень лінгвістичної змінної, певне на D ;

G - граматики, сукупність правил, що дозволяє оперувати елементами T , зокрема генерувати нові осмислені терми;

M - процедура, що дозволяє встановити відповідність між лінгвістичним значенням і нечітким безліччю, тобто правила обчислення функції приналежності нового значення, визначеного G .

2.3.2. Основні методи побудови функції приналежності

В основі теорії з будь-якої області природознавства лежить дуже важливе засадничо для її побудови поняття елементарного об'єкта. Наприклад, для механіки - це матеріальна точка, для електродинаміки - це вектор напруженості поля, для теорії автоматичного управління - передавальна функція. Для теорії нечітких множин основоположним поняттям є поняття нечіткої множини, яке характеризується функцією приналежності. За допомогою нечітких множин можна строго описувати властиві для мови людини розпливчасті поняття, «без формалізації яких немає надії істотно просунути вперед в моделюванні інтелектуальних процесів» [16].

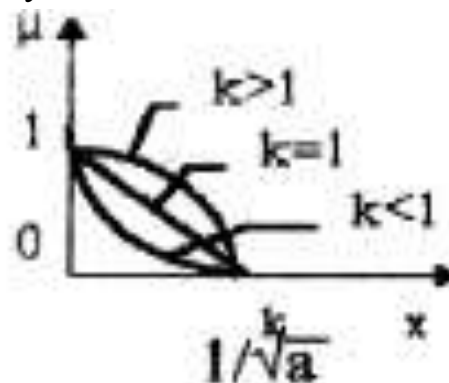
Основною складністю, що заважає інтенсивному застосуванню теорії нечітких множин при вирішенні практичних завдань, є те, що функція приналежності повинна бути задана поза самою теорією і, отже, її адекватність не може бути перевірена безпосередньо засобами теорії. У кожному в даний час відомому методі побудови функції приналежності

формулюються свої вимоги й обґрунтування до вибору саме такого побудови.

Фіксування конкретних значень з інтервалу $[0,1]$, якими оцінюється ступінь приналежності, має суб'єктивний характер. З одного боку, для експертних методів істотним є характер вимірювань (первинний або похідний) і тип шкали [11], в якій отримують інформацію від експерта і яка визначає допустимий вид операцій, що застосовуються до експертної інформації [18]. З іншого боку, є два типи властивостей: ті, які можна безпосередньо виміряти, і ті, які є якісними і вимагають попарного порівняння об'єктів, що володіють розглянутими властивостями, щоб визначити їх відносне місце стосовно оскільки він розглядався поняттю. Таким чином, побудова функції приналежності виконується за експертними оцінками. При цьому можна виділити дві групи методів - прямі і непрямі. Прямі методи для одного експерта складаються в безпосередньому призначенні міри приналежності для досліджуваних об'єктів або безпосередньому призначенні функції (правила), що дозволяє обчислити її значення.

Для модернізації ультразвукового товщиноміру ТУЗ-5 планується розробити цифровий блок перетворення сигналу, який би дав можливість зменшити за рахунок алгоритмів нечіткої логіки значення методичної похибки і дозволить би проводити серії точних вимірювань на границі нижнього діапазону.

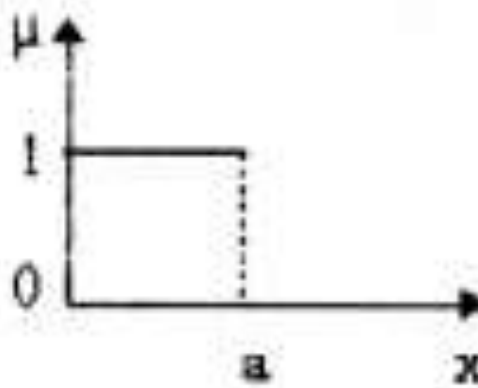
Враховуючи форму сигналу, що потрапляє у підсилювальний тракт ТУЗ-5, на основі таблиці приведеної у [!!!!!!] планується використати наступну функцію для опису:



$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - ax^k, & 0 \leq x \leq 1/\sqrt[k]{a}, \\ 0, & 1/\sqrt[k]{a} \end{cases}$$

Рисунко.....функція

Наявність перехідних процесів унеможливилює використання наступної функції, яка ідеалізовано описала би процес:



$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a, \\ 0, & x > a \end{cases}$$

Цифровий блок буде проміжною ланкою між вимірювачем числових інтервалів та ПЕП. В його складі можна виділити наступні 3 частини (Рисунко....):

- Підсилювач;
- Мікроконтроллер;
- Блок налаштування рівня компаратора.

3. РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

3.1. Моделювання цифрового блоку для нечіткої логіки

Як видно з функціональної схеми потрібно провести розробку 3 складових частин. Для підсилювального каскаду пропонується використати трьох каскадний підсилювач на основі операційного підсилювача AD605. У ролі контролера пропонується використати мікроконтролер AtMega 8535, який дозволить спростити схему і не використовувати АЦП. Для блоку налаштування компаратора пропонується використати змінний резистор, який дозволить у випадку проблем з зсувом рівня напруги компаратора більш тонко налаштовувати прилад оператора. Щопрада даний функціонал може привести до ускладнення у процесах вимірювання і потребуватиме від оператора приладу більшого розуміння роботи ультразвукового товщиноміру.

На схемі нижче можна побачити електричну схему цифрового блоку.

3.2.1. Похибка вимірювань

При виконанні будь-яких вимірювань важливо пам'ятати, що вимір не може бути виконано абсолютно точно. При отриманні значень вимірів необхідно знати з якою похибкою виконані вимірювання, для того, щоб правильно трактувати отримані результати і в разі чого виправити помилки. Особливо це важливо при використанні апаратури, до якої висуваються вимоги щодо забезпечення високої точності вимірювань, як в нашому випадку.

Як відомо, похибка вимірювань апаратури розділяється на кілька складових похибки:

- методична;
- систематична;
- інструментальна;
- випадкова.

Розглянемо коротко кожен з складових сумарної похибки стосовно до тематики товщиномірів.

Методична похибка виникає внаслідок того, що крутизну переднього фронту ехо-імпульсів (Рисунок 3.1.1.), між котрими вимірюється часовий інтервал T , кінцева.

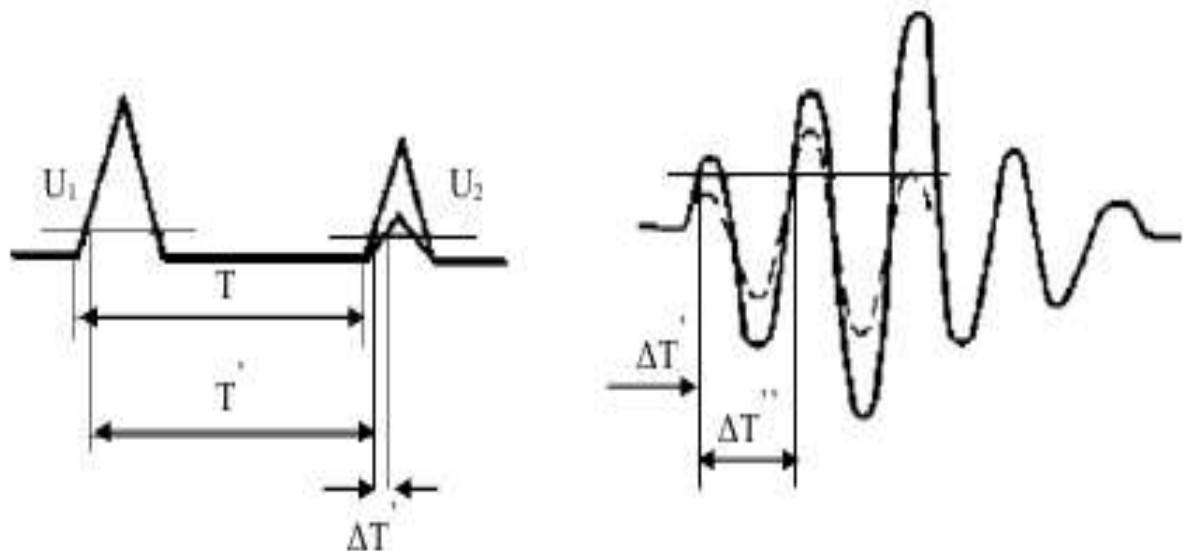


Рисунок 3.1.1. Методична похибка: а - через кінцевої крутизну фронтів луна-імпульсів; б - через «втрати» хвилі

Амплітуда імпульсу, відбитого від внутрішньої поверхні виробу, схильна до деформацій в силу цілого ряду причин: через порушення якості акустичного контакту, непаралельності поверхонь виробів, шорсткості донної поверхні, різного загасання ультразвуку в різних матеріалах, зміни товщини у всьому діапазоні вимірювань, зменшення чутливості ПЕП як в області малих товщин (особливо в діапазоні 1-5 мм), так і в області великої товщини (понад 50-100 мм) і т. д. Це призводить до «сповзання» точки відліку часу в більшу сторону на величину T' .

Ще одна характерна причина похибки, спричиненої вимірюванням амплітуди ехо-сигналу, це дискретний стрибок показань приладу через «втрати» хвилі (Рисунок 3.1.1., б). Амплітуди перших напівхвиль в імпульсах, за якими зазвичай ведеться відлік часових інтервалів, менше наступних. Якщо невелика зміна амплітуди без втрати хвилі принципово може привести до похибки не більше $1/4$ довжини хвилі, то великі зміни амплітуди можуть дати похибку в одну і більше хвиль, що практично виключає вимір малої товщини.

Систематична похибка ехо-імпульсних товщиномірів викликається зміною товщини шару контактної мастила між робочою поверхнею перетворювача і вимірюваним виробом з криволінійною і грубо обробленою поверхнею при переміщенні перетворювача по його поверхні, а також при вимірюванні виробів клиновидної форми.

Зменшення ширини робочої поверхні перетворювача дозволяє зменшити систематичну похибку за рахунок зменшення висоти сегмента або клина, утвореного дотичними поверхнями перетворювача і виробу. Експериментально встановлено [13], що мінімальна ширина робочої поверхні перетворювача, при якій він зберігає стійкість на поверхні виробу і при котрій можливий однозначний відлік товщини, становить 2-3 мм. При цьому, наприклад, перехід з радіуса кривизни поверхні виробу від 15 до 20 мм змінює показання приладу на одній і тій же товщині на 0,05 мм.

Інструментальна похибка повністю визначається якістю підсилювального і вимірювального тракту товщиноміра. На неї впливають такі характеристики, як частотна смуга пропускання підсилювача, лінійність і стабільність вимірювача часових інтервалів, число розрядів в цифровому індикаторі і т. п. Сучасна електроніка дає можливість звести інструментальну похибку ультразвукових імпульсних товщиномірів до десятих і сотих часток відсотка, що дозволяє практично не враховувати її при оцінці сумарної похибки ехо-імпульсних товщиномірів.

Випадкові похибки є наслідком суб'єктивної оцінки вимірювання оператором. Помилки можуть бути викликані нещільним контактом пьезоперетворювача до поверхні вимірюваного виробу, похибкою при зчитуванні показань з дисплея приладу. Величина цих помилок не може бути оцінена заздалегідь, однак вони можуть бути усунені багаторазовим проведенням вимірів на одній ділянці, застосування цифрового індикатора, різко збільшує однозначність показань.

Отримавши уявлення про складові сумарної похибки вимірювань товщиноміра, перейдемо до факторів, що впливає на неї.

3.2.2 Фактори, що впливають на похибку вимірювань

Фактори похибки вимірювання

1. Калібрування;
2. Шорсткість поверхні зразка;
3. Відхилення ПЕП;
4. Викривлення зразка;
5. Ухил або ексцентриситет;
6. Акустичні властивості матеріалу:
 - розсіювання звуку;
 - загасання хвиль;

- зміна швидкості УЗК;
- і т.д.

Перш за все точність будь-яких ультразвукових вимірювань залежить від коректного калібрування приладу. Всі якісні ультразвукові вимірювальні прилади забезпечують можливість швидкого проведення налаштування швидкості звуку і компенсації нуля.

Наступним критерієм точності є гладкість і паралельність передньої і задньої поверхонь тестового матеріалу. Однак, внаслідок корозійного покриття, що часто зустрічається на об'єктах контролю, дана умова є важко доступною. У зв'язку з цим похибка від такого фактора, як шорсткості поверхні, буде розраховуватися дослідним шляхом для різних значень шорсткості.

Наступна складова сумарної похибки вимірювань товщиноміра (у всіх режимах) - відхилення перетворювача і нерівномірний розподіл контактної рідини по поверхні об'єкта, так як відхилення ПЕП викликає спотворення ехо-сигналу і є причиною неточного зчитування даних, а товщина шару контактної рідини враховується при налаштуванні параметра компенсації нуля (надлишок контактної рідини між ПЕП і тестовою поверхнею призводить до утворення прошарку, в якому преломляється звукова хвиля, а так само створюються перешкоди, що впливають на результати вимірювань). Ускладнити вимірювання може викривлення зразка. Ця проблема часто зустрічається при вимірюванні залишкової товщини стінок на ділянках з еквідистантним поверхнями (листи, стінки труб і т.д.), а також при вимірюванні діаметру циліндричних виробів, що мають гладкі, грубі чи ознаки корозії поверхні. При вимірах на нерівній поверхні, необхідно поміщати ПЕП якомога ближче до центральної лінії зразка і утримувати його якомога краще. У деяких випадках, для регулювання може бути використаний підпружинений V-блоковий кронштейн. В цілому, збільшення радіусу кривизни призводить до використання ПЕП з меншою контактною поверхнею і більш критичне ставлення до результатів досліджень. Для дуже маленьких радіусів поверхні контролю корисний перегляд форми хвилі на дисплеї товщиноміра для вибору кращого способу установки ПЕП. У разі ж конусоподібну або ексцентриситету передньої і задньої стінок зразка по відношенню один до одного, відбитий ехо-сигнал може спотворитися через варіативності звукових доріжок. Знижується точність вимірювань. У деяких випадках, вимірювання неможливі.

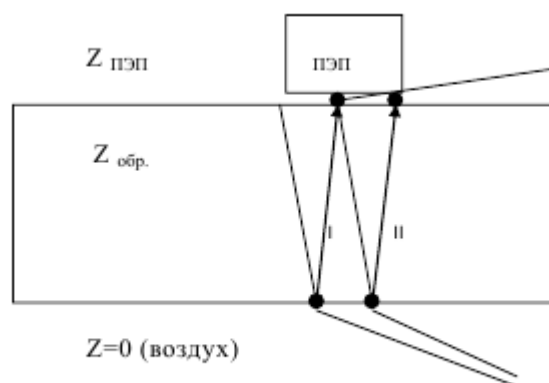
Наприклад, в таких металах як нержавіюча лита сталь, чавун, скловолокно та композиційних матеріалах спостерігається явище

розсіювання звуку. До такого ж ефекту може призвести і пориста структура матеріалу. В органічних же матеріалах (пластик, гума) відбувається швидке загасання хвиль. Варто окремо згадати такий фактор, як зміна швидкості УЗК. Ультразвукові вимірювання товщини точні тільки в разі коректної установки цього параметра. Адже дана величина безпосередньо входить в формулу з розрахунку контрольованої товщини виробу.

Сумарна похибка складається з наступних складових:

- 1) Похибка знаходження швидкості УЗК ΔC . Значення даного виду похибки дорівнює похибці інструменту, за допомогою якого була виміряна дана величина. Значення похибки вказується в паспорті на засіб вимірювання.
- 2) Похибка підсилювального тракту товщиноміруа при прийомі першого донного сигналу. Значення береться з технічної документації (в даному випадку з паспорта).
- 3) Остання складова - похибка, обумовлена вимірюванням фази другого донного сигналу внаслідок відображення від ПЕП. Розглянемо її докладніше. Відомо, що при проходженні звукової хвилі через деяке середовище і відбита від значно більш акустично твердого середовища фаза відбитої хвилі збігається з фазою падаючої хвилі. Навпаки, якщо хвиля проходить через середовище з великим акустичним опором і відбивається від границі розділу з істотно меншим акустичним опором, то фаза відбитої хвилі зміщена на π щодо фази падаючої хвилі.

У випадках, коли імпеданс розрізняються не дуже істотно, зміщення фази $\Delta \phi$ відбитої хвилі щодо хвилі падаючої становить деяку проміжну величину від 0 до π , тобто $0 < \Delta \phi < \pi$. Розглянемо процес формування I і II донних ехосигналів.



Рисунок

Випромінений імпульс поздовжньої хвилі поширюється від перетворювача до донної поверхні, відбивається з інверсією фази і приходить

назад на ПЕП, де після електроакустичного перетворення фіксується мікроконтроллером. Частина звукової енергії першого донного імпульсу відбивається від границі розділу "зразок - ПЕП" з деяким зміщенням фази $\Delta \phi$, поширюється до донної поверхні, додатково відчуває інверсію фази і повертається на ПЕП, формуючи другий донний ехо-сигнал.

Таким чином, час між донними імпульсами обчислюється як:

$$t_{II-II} = 2H / C + t \Delta \phi$$

де t - набіг часу, пов'язаний зі зміщенням фази на границі "зразок - ПЕП".

Він становить в радіанах, як уже сказано, $0 < \Delta \phi < \pi$, що означає часовий інтервал від 0 до $T / 2$ (тобто трохи більше половини періоду коливання), в свою чергу період коливань легко виміряти по розгортці або обчислити як величину, зворотну ефективній частоті перетворювача $T = 1 / f_{\text{ефф}}$.

Зокрема, ясно, що вибираючи перетворювач з більшою частотою, можна зменшити вплив даного чинника зміщення фази на точність вимірювання тимчасового інтервалу між першим і другим донними ехо-сигналами.

Обчислення точної величини $\Delta \phi$ складно і не входить в завдання даної роботи. Однак, для оцінки максимально можливої похибки виміру часового інтервалу можна прийняти гірший випадок, то $\Delta \phi = \pi$, відповідно $t \Delta \phi = T / 2$.

Граничні значення параметрів контрольованих об'єктів, що обмежують сферу застосування товщиноміра ТУЗ-5:

- максимально допустиме значення параметра шорсткості з боку введення УЗК $R_z = 80$ мкм;
- максимально допустиме значення параметра шорсткості з боку, протилежній стороні введення УЗК - $R_z = 160$ мкм;
- мінімальний радіус кривизни поверхні з боку введення УЗК - 3 мм при товщині стінки 1 мм;
- максимальна непаралельність поверхонь - 3 мм на ділянці базової довжини 20 мм;
- максимальна температура поверхні контрольованого виробу - 50 ° С.

Межі основної абсолютної похибки при вимірюванні товщини, ΔH , складають $\pm (0,1 + 0,005 \cdot H_x)$, мм, де H_x - чисельне значення товщини, виражене в міліметрах.

Межі відносної похибки при вимірюванні швидкості поширення УЗК складають $\pm 1,5$ % Від вимірюваної величини.

Межі додаткової похибки товщиноміра, при вимірюванні товщини, викликаної зміною температури навколишнього повітря на кожні 10 °С від границь температурного діапазону $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ в робочому інтервалі температур $\pm 0,5 \cdot \Delta H$.

Межі додаткової похибки товщиноміра при вимірюванні товщини з боку шорсткою поверхні, викликаної шорсткістю поверхні $R_z = 80 \text{ мкм}$, складають не більше $\pm 0,1 \text{ мм}$.

Межі додаткової похибки товщиноміра, викликаної шорсткістю поверхні $R_z = 160 \text{ мкм}$, при вимірюванні товщини з боку гладкій поверхні становлять не більш $\pm 0,2 \text{ мм}$.

Межі додаткової похибки товщиноміра при вимірюванні товщини криволінійних поверхонь з радіусом кривизни 10 мм для перетворювачів П112-10-6 / 2-Т-003 і радіусом кривизни 30 мм для перетворювачів П112-5-10 / 2-Т-003 - $\pm 0,1 \text{ мм}$.

Межі додаткової похибки товщиноміра при вимірюванні товщини непаралельних поверхонь при непараллельности 3 мм на базовій довжині 20 мм - $\pm 0,3 \text{ мм}$ в діапазоні від 1 до 10 мм і $\pm (0,2 + 0,01 \cdot H_x)$, мм, де H_x - числове значення товщини, виражене в міліметрах, в діапазоні від 10 до 50 мм.

Товщиномір при експлуатації стійкий до впливу наступних кліматичних факторів:

- температури навколишнього повітря від мінус 30 до 50 °С;
- відносної вологості навколишнього повітря до 95 %. При температурі 35 °С без конденсації вологи;
- атмосферного тиску від 84 до 106,7 кПа.

Товщиномір зберігає свої параметри при впливі на нього електромагнітних перешкод, що не перевищують наступних норм:

- гармонійної перешкоди магнітного поля в смузі частот від 30 Гц до 50 кГц з ефективним значенням напруженості поля від 130 до 70 дБ;
- гармонійної перешкоди електричного поля в смузі частот від 10 кГц до 30 МГц з ефективним значенням напруженості поля 120 дБ.

На закінчення цього параграфа слід зазначити, що аналітичний розрахунок сумарної похибки ехо-імпульсного товщиноміра через різноманіття її джерел, а також через суперечливість та іноді взаємовиключність засобів її зменшення вкрай важка задача. Тому реальну похибку товщиномірів при їх відпрацюванні і випробуванні оцінюють експериментально на стандартних зразках товщини, кривизни,

клиноподібності і шорсткості на спеціально атестованих повірених механічними і оптичними приладами.

ВИСНОВОК

Висновки:

- 1) Складено аналітичний огляд літератури за технічними характеристиками існуючих товщиномірів для вимірювання залишкової товщини виробів при односторонньому доступі до них.
- 2) Вивчено методи реалізації ультразвукового контролю залишкової товщини в даних установках і розглянутий метод, на базі якого працює товщиномір «ТУЗ-5». Метод, з урахуванням простоти застосування, точності вимірювання, можливості вимірювання широкого діапазону товщин (як малої товщини, так і великих), можливості застосування як на феромагнітних ділянках, так і на неферомагнітних ділянках можна назвати оптимальним.
- 3) Спроектована документація (схеми функціональні, електричні) (див. Додаток 1) для цифрового блоку на основі нечіткої логіки . Складено методики калібрування і повірки.

До головних переваг ультразвукового товщиноміра «ТУЗ-5» з цифровим блоком відносяться:

1. Висока точність і швидкість дослідження, а також його низька вартість;
2. Можливість роботи як з суміщеними ПЕП, так і з роздільно-суміщеними;
3. Покращення стабільності роботи приладу на малих товщина
4. Покращення точності вимірювань під впливом зовнішніх факторів і більш висока завадочутливість.
5. Широкий діапазон вимірюваних товщин, великий вибір досліджуваних матеріалів
6. Безпека для людини (на відміну, наприклад, від рентгенівської дефектоскопії);
7. Висока мобільність;
8. При проведенні УЗК досліджуваний об'єкт не пошкоджується.