

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Автоматизований багатоканальний ультразвуковий
товщиномір»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-01

Гайдамака Давид Олегович _____

Керівник:

д.т.н., проф.

Куц Юрій Васильович _____

Рецензент:

к.т.н., доцент,

Самарцев Юрій Миколайович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПК 0105.00.00.0000 ПЗ	Пояснювальна записка	64	
3	A1	ПК 0105.01.00.0000 ФО	Фізичні основи луна-імпульсної товщинометрії	1	
4	A1	ПК 0105.02.00.0000 ЕД	Експериментальні дослідження амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ та визначення часових інтервалів	1	
5	A1	ПК 0105.03.00.0000 ЕС	Електрична-структурна схема	1	
6	A1	ПК 0105.04.00.0000 АВ	Алгоритм виявлення сигналів луна-імпульсної УЗТ	1	
7	A1	ПК 0105.05.00.0000 КА	Код алгоритму виявлення сигналів луна-імпульсної УЗТ	1	

				ДП ПК 0105.00.00.0000		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Гайдамака Д. О.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Куц. Ю. В.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-01	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю. В.					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизований багатоканальний
ультразвуковий товщиномір»

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Гайдамаці Давиду Олеговичу

1. Тема проєкту «**Автоматизований багатоканальний ультразвуковий товщиномір**», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. №2121-с
2. Термін подання студентом проєкту «4» червня 2024р.
3. Вихідні дані до проєкту : ультразвуковий луна-імпульсний метод контролю; частота перетворювача – 5 МГц; тип перетворювача – прямий; діаметр перетворювача – 15 мм; об'єкт контролю – алюмінієвий прокат, листи завтовшки (4...10 мм); особливі умови – робота системи за пониженого енергоспоживання
4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Ультразвукова товщинометрія як важливий напрям УЗНК
2. Розрахунок електроакустичного тракту та аналіз амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ
3. Розроблення способу та структури чотириканального ультразвукового товщиноміра
4. Експериментальні дослідження амплітудно-фазового методу виявлення сигналів

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична-структурна, плакат «фізичні основи луна-імпульсної товщинометрії», плакат «Експериментальні дослідження амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ та визначення часових інтервалів», плакат «Алгоритм виявлення сигналів», плакат «Код алгоритму виявлення сигналів луна-імпульсної УЗТ», презентація доповіді.

6. Консультанти розділів проєкту

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

7. Дата видачі завдання «1» березня 2024р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	1.03.2024	
2	Проведення аналітичного огляду	28.04.2024	
3	Розрахунок акустичного тракту	05.05.2023	
4	Підбір компонентів	10.05.2024	
5	Розробка креслеників	24.05.2024	
6	Попередній захист	28.05.2024	
7	Подання пояснювальної записки на перевірку на плагіат	30.05.2024	
8	Захист дипломного проєкту	17.06.2024	

Студент

Давид ГАЙДАМАКА

Керівник

Юрій КУЦ

Анотація

В даному бакалаврському проєкті був спроектований автоматизований багатоканальний ультразвуковий товщиномір, який може бути використаний в промислових масштабах для вимірювання товщини металевих прокатів чи елементів конструкцій плоскої форми одночасно у декількох точках. Перший розділ сфокусований на розгляді фізичних основах ультразвуку а також на висвітленні питань п'єзоелектричних перетворювачів, апаратної реалізації ультразвукових товщиномірів, аналізі методів ультразвукової товщинометрії і окремо методів вимірювання часу поширення ультразвуку в об'єкті контролю.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню та обрахунку акустичного тракту, в якому буде поширюватись ультразвук під час вимірювання товщини. Розраховано коефіцієнт електроакустичного тракту, електричну ємність та розроблено амплітудно-фазовий метод виявлення донних імпульсів з підвищеною завадостійкістю.

Третій розділ присвячений розробці удосконаленого амплітудно-фазового методу виявлення сигналів та структури чотирьохканального ультразвукового товщиноміра. Була створена електрична структурна схема товщиноміра. Після розробки удосконаленого методу було проведено моделювання та порівняння зі стандартним амплітудно-фазовим методом.

Четвертий розділ зосереджений на експериментальному дослідженні удосконаленого методу. Було розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для виявлення сигналів УЗТ, проведено експериментальні дослідження та зроблено висновки.

Ключові слова: ультразвуковий товщиномір, п'єзоелектричний перетворювач, ультразвук, амплітудно-фазовий метод, алгоритмічно-програмне забезпечення.

Annotation

In this bachelor's project, an automated multichannel ultrasonic thickness gauge was designed, which can be used on an industrial scale to measure the thickness of metal sheets or flat structural elements simultaneously at several points. The first chapter focuses on the physical principles of ultrasound and discusses piezoelectric transducers, hardware implementation of ultrasonic thickness gauges, analysis of ultrasonic thickness measurement methods, and specifically, methods for measuring the propagation time of ultrasound in the object under control.

The second chapter is dedicated to the justification and calculation of the acoustic path through which the ultrasound will propagate during thickness measurement. The electroacoustic path coefficient, electrical capacitance, and the development of an amplitude-phase method for detecting bottom echoes with increased noise immunity were calculated.

The third chapter is dedicated to the development of an improved amplitude-phase method for signal detection and the structure of a four-channel ultrasonic thickness gauge. An electrical structural diagram of the thickness gauge was created. After developing the improved method, modeling and comparison with the standard amplitude-phase method were conducted.

The fourth chapter focuses on the experimental study of the improved method. Algorithmic and software support for detecting ultrasonic signals was developed, experimental studies were conducted, and conclusions were drawn.

Keywords: ultrasonic thickness gauge, piezoelectric transducer, ultrasound, amplitude-phase method, algorithmic software.

Зміст

ВСТУП.....	10
Перелік скорочень.....	10
РОЗДІЛ 1. УЛЬТРАЗВУКОВА ТОВЩИНОМЕТРІЯ ЯК ВАЖЛИВИЙ НАПРЯМ УЗНК.....	12
1.1 Фізичні основи ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії	12
1.2 Огляд засобів луна-імпульсної УЗТ	14
1.3 Методи ультразвукової товщинометрії	15
1.4 Методи вимірювання часу поширення ультразвуку	17
1.5 Перетворювачі	19
1.6 Апаратна реалізація засобів УЗТ	21
1.7 Аналіз об'єктів контролю.....	25
Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНОГО ТРАКТУ ТА АНАЛІЗ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЗТ	30
2.1 Розрахунок електроакустичного тракту ультразвукового товщиноміра ..	30
2.1.1 Визначення структури акустичного тракту.....	30
2.1.2 Розрахунок довжини хвилі в ОК	31
2.1.3 Розрахунок товщини п'єзопластини	32
2.1.4 Розрахунок границі ближньої зони	33
2.1.5 Розрахунок коефіцієнта ослаблення акустичного тракту	33
2.2 Розрахунок електричної ємності перетворювача	36
2.3 Розроблення амплітудно-фазового методу виявлення донних сигналів в луна-імпульсній УЗТ.....	37
Висновки до розділу 2	39

					<i>ПК 0105.00.00.000</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Гайдамака Д. О.			Автоматизований багатоканальний ультразвуковий товщиномір	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Куц. Ю. В.					8	64
<i>Н. Контр.</i>						ПБФ, ПК-01		
<i>Затверд.</i>		Куц. Ю. В.						

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ ТА СТРУКТУРИ ЧОТИРИКАНАЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОВЩИНОМІРА	41
3.1 Опис структури чотиріканального ультразвукового товщиноміра	41
3.2 Обґрунтування елементної бази чотиріканального товщиноміра.....	43
3.3 Визначення інформативних параметрів сигналів УЗТ за допомогою дискретного перетворення Гільберта.....	44
3.4 Розробка удосконаленого амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ	45
Висновки до розділу 3	47
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО- ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ	49
4.1 Розроблення алгоритмічно-програмного забезпечення амплітудно- фазового методу виявлення сигналів УЗТ.....	49
4.2 Експериментальні дослідження амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ	55
Висновки до розділу 4	58
Список використаних джерел	62

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік скорочень

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

УЗНК – ультразвуковий неруйнівний контроль

УЗТ – ультразвукова товщинометрія

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач

ДПГ – дискретне перетворення Гільберта

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

У сучасному промисловому середовищі контроль якості та безпеки матеріалів і конструкцій є критично важливим завданням. Одним із найбільш ефективних методів неруйнівного контролю є ультразвуковий товщиномір, який дозволяє точно вимірювати товщину матеріалів без їх пошкодження з високою точністю. Ультразвукові товщиноміри широко застосовуються в таких галузях, як авіабудування, машинобудування, нафтогазова промисловість та енергетика.

Сучасні виробничі процеси вимагають високої точності та надійності вимірювань, зменшення витрат енергоресурсів, що спонукає до вдосконалення існуючих технологій. Традиційні одно-канальні товщиноміри мають певні обмеження в продуктивності та гнучкості, що є необхідно критичним при контролі велико габаритних об'єктів.

Автоматизовані багатоканальні ультразвукові товщиноміри пропонують значно більшу ефективність, оскільки дозволяють одночасно проводити вимірювання на великих ділянках об'єктів контролю. Це значно підвищує швидкість і повторюваність контролю, забезпечуючи вищий рівень надійності результатів. Важливими складовими таких систем є сучасні методи обробки сигналів, автоматизовані алгоритми аналізу даних та можливість інтеграції з іншими системами контролю.

Впровадження багатоканальних ультразвукових товщиномірів сприяє підвищенню продуктивності та якості контролю, дозволяючи оперативно виявляти невідповідність товщини виробу встановленим допусками. Це особливо актуально для забезпечення безпеки та надійності критично важливих елементів конструкцій під час їх виробництва. Основними викликами, які стоять перед розробниками таких систем, є забезпечення високої точності вимірювань та мінімізація впливу зовнішніх факторів на результати контролю.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						11
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 1. УЛЬТРАЗВУКОВА ТОВЩИНОМЕТРІЯ ЯК ВАЖЛИВИЙ НАПРЯМ УЗНК.

Ультразвукова товщинометрія визнається як важливий напрям товщинометрії через можливість проведення точних вимірювань товщини матеріалів без їхнього ушкодження. Завдяки можливості вимірювати товщину матеріалів навіть в умовах обмеженого доступу або при наявності ізоляційних шарів, УЗТ стає важливим інструментом оцінювання стану трубопроводів, резервуарів, конструкцій у сфері аерокосмічних технологій та інших об'єктів, де використання прямих методів вимірювань стає проблематичним.

УЗТ також може бути ефективно використана для вимірювання товщини об'єктів з покриттям. Такі об'єкти можуть включати шари фарби, лаку, покриття захисного типу або інші захисні покриття на поверхні матеріалу.

Ультразвукові хвилі можуть проникати в товщу багатьох матеріалів, включаючи метали, пластик, скло, кераміку і дає можливість досліджувати широкий спектр характеристик та параметрів матеріалів та виробів. Важливою особливістю є те, що методи УЗК використовують ультразвукові хвилі низької інтенсивності, тому їх застосування не залишає слідів чи пошкоджень на поверхні об'єктів контролю (ОК). Ці особливості УЗК роблять його унікальним інструментом для розв'язання багатьох завдань НК [1].

1.1 Фізичні основи ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії

Основний фізичний принцип ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії полягає у випромінюванні ультразвукового імпульсу в ОК, його поширенні в однорідному середовищі з постійною швидкістю c (найчастіше використовуються поздовжні хвилі), відбитті хвиль від акустичних неоднорідностей середовища і вимірюванні часу, який потрібно цьому

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

імпульсу, щоб відбитися від зворотної поверхні ОК та повернутись назад або пройти крізь нього [2].

Хвильова природа ультразвуку

Ультразвукові хвилі характеризуються параметрами, такими як амплітуда, частота, фаза та швидкість поширення. Ці хвилі можуть взаємодіяти з різними середовищами, викликаючи явища, такі як відбивання (рис. 1.1), поглинання [3], розсіювання та дифракцію.

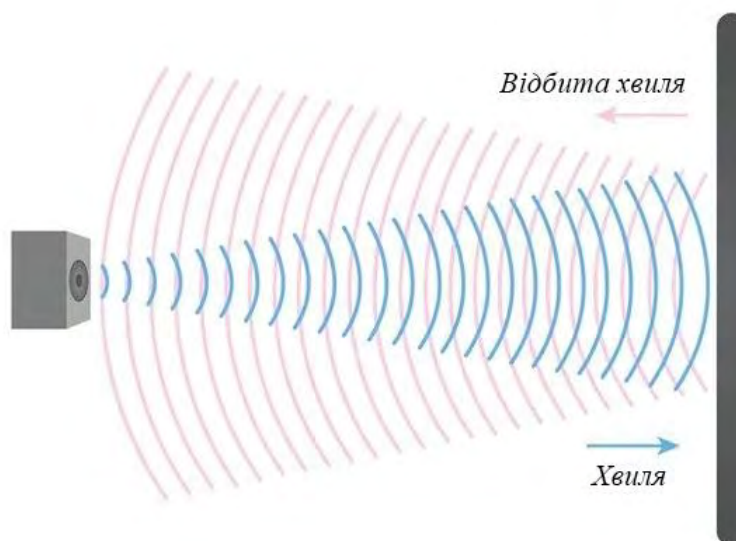


Рис. 1.1 Ілюстрація відбиття ультразвукової хвилі

Важливою властивістю є відбиття ультразвуку від межі між матеріалами з різними акустичними характеристиками, а також проникнення в ці самі матеріали. Саме ці властивості і роблять його корисним для НК матеріалів, виявлення дефектів, вимірювання товщини ОК та інших застосувань у вимірювальних технологіях.

Ультразвук, як і всі хвилі, має властивість загасати в часі і просторі. Відбувається це в основному через загасання в матеріалі ОК, через ефект

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поглинання, або іншими словами через опір середовища в якому поширюється хвиля. Крім цього існують інші фактори, що обумовлюють загасання, такі як: частота хвилі, тертя та ін. [4].

1.2 Огляд засобів луна-імпульсної УЗТ

В залежності від мети, матеріалу ОК та необхідної точності вимірювання, ультразвукові товщиноміри поділяються на три групи

1- Товщиномір для виробів з плоско-паралельними поверхнями [5]. Ці прилади призначені для вимірювання товщини матеріалів із плоско-паралельними поверхнями. Вони забезпечують високу точність вимірювань, що робить їх ідеальними для застосувань, де потрібні дуже точні дані, наприклад, у виробництві тонких металевих листів або пластин. Завдяки своїй конструкції та алгоритмам обробки сигналу, ці товщиноміри можуть з великою точністю визначати час проходження ультразвукового імпульсу через матеріал і, відповідно, його товщину.

2- Товщиномір для виробів з грубими поверхнями [6]. Друга група товщиномірів розроблена спеціально для контролю виробів з грубими або нерівними поверхнями, таких як труби з внутрішньою ерозією. Такі прилади мають підвищену чутливість, що дозволяє їм ефективно працювати в умовах високого рівня шуму та відбиттів від нерівностей. Однак, їх точність дещо нижча порівняно з приладами для плоско-паралельних поверхонь. Вони часто використовуються в галузях, де важливо відстежувати стан обладнання і виявляти дефекти на ранніх стадіях, наприклад, у нафтохімічній промисловості або при експлуатації трубопроводів.

3- Товщиномір для автоматичного контролю в потоці. Ці прилади мають високу точність вимірювань і використовують імерсійне середовище для забезпечення надійного контакту між ультразвуковим датчиком і матеріалом.

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Імерсійне середовище (зазвичай вода або спеціальна рідина) запобігає утворенню повітряних прошарків, які можуть викликати похибки у вимірюваннях. Такі товщиноміри широко застосовуються в автоматизованих системах контролю якості на виробництвах, де потрібен безперервний моніторинг параметрів продукції.

1.3 Методи ультразвукової товщинометрії

Існує багато методів УЗТ: луна-імпульсний, резонансний, ехо-імпульсний, імпульсно-фазовий, метод багаторазових відбиттів, метод прямокутного імпульсу та деякі інші. Але в порівнянні з найбільш поширеними методами, такими як луна-імпульсний та резонансний, всі інші методи в сьогоденні умовах майже не використовуються через їхню неточність, потребу у складній апаратурі, спеціальних умов і т.і.

Резонансний метод УЗТ використовує електроакустичний перетворювач, що надсилає сигнал з поступово змінюючоюся частотою в пружний шар. На резонансних частотах, коли товщина шару співпадає з половиною довжини хвилі, вхідний опір різко падає, викликаючи зменшення амплітуди сигналу. Фіксуючи цю частоту, можна визначити товщину шару.

Резонансний метод є ефективним для вивчення матеріалів з низьким рівнем втрат енергії, іншими словами з малим загасанням [7].

Найбільш поширеним є луна-імпульсний метод товщинометрії. Вимірювання товщини ОК h відбувається завдяки вимірюванню часової затримки τ між суміжними донними імпульсами [4]. Рівняння вимірювання ультразвукового луна-імпульсного товщиноміра дається формулою

$$h = \frac{c \cdot \tau}{2}. \quad (1.1)$$

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 1.2 наведено узагальнену структурну схему ультразвукового луна-імпульсного контактної товщиноміра [8].

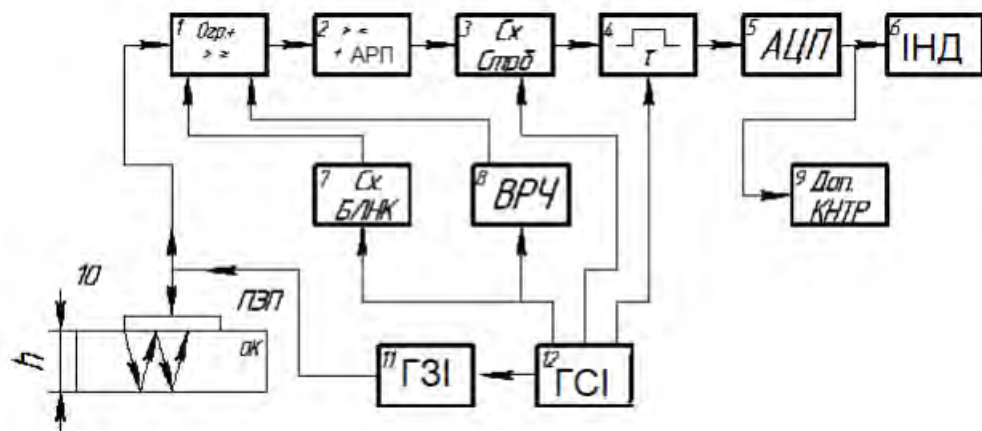


Рис. 1.2 Узагальнена структурна схема луна-імпульсного контактної товщиноміра з еталонуванням

Рисунок 1.2 показує структурну схему луна-імпульсного товщиноміра.

Призначення елементів схеми:

1. – підсилювач високої частоти з обмежувачем на вході і низьким опором на виході;
2. – підсилювач з автоматичним регулюванням цього самого підсилення, який стабілізує амплітуду донного імпульсу;
3. – схема селекції, яка обирає початковий імпульс який відбився від поверхні ОК і формує початковий та кінцевий донні імпульси;
4. – Блок який формує вимірювальний інтервал і перетворює його у зручну для АЦП форму;
5. – Перетворювач вимірювального інтервалу в цифровий код;
6. – Блок цифрової індикації;

7. – Захист від завад, який виключає вхідний підсилювач на час циклу вимірювання;
8. – Елемент часового регулювання чутливості, який здійснює стабілізацію амплітуди віддзеркаленого сигналу, а також управляє коефіцієнтом підсилення підсилювача високої частоти;
9. – Не обов'язковий блок допускового контролю, який дає інформацію що до того чи вийшла товщина ОК за встановлені допустимі межі;
10. – Ультразвуковий перетворювач;
11. – Генератор зондуючих імпульсів, який збуджує УЗ коливання в перетворювачі;
12. – Генератор синхронізуючих імпульсів, який синхронізує роботу вузлів товщиноміра, і реалізує імпульсний режим роботи з УЗ коливаннями.

1.4 Методи вимірювання часу поширення ультразвуку

Сьогодні існує багато різних методів вимірювання часу поширення ультразвуку в об'єкті контролю, кожен з яких має свої переваги та недоліки, а також характерну граничну похибку. Нижче наведено і описано деякі із цих методів:

Пороговий метод є найбільш простим методом вимірювання часу. Він базується на фіксації моменту, коли сигнал досягає заданого порогового рівня. Це досягається за допомогою пристрою, який активується при досягненні вхідним сигналом певного рівня, відомого як рівень дискримінації. Коли сигнал перевищує цей рівень, генерується логічний імпульс, який визначає час появи сигналу і реєстрації події. Імпульси з більшою амплітудою досягають рівня дискримінації раніше, ніж імпульси з меншою амплітудою (рис. 1.3). Точність цього методу залежить від динамічного діапазону вхідних сигналів,

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тому рівень дискримінації встановлюють максимально низько, але вище рівня шуму, щоб мінімізувати часову невизначеність.



Рис. 1.3 Модельна демонстрація роботи порогового методу:

ΔT – похибка вимірювання

Метод перетину нуля. Цей метод полягає в тому, що пристрій реєструє час, коли прийнятий імпульс перевищує встановлений поріг, а вимірювання затримки відбувається в момент першого перетину сигналом нульового рівня. Основна перевага полягає в тому, що часова затримка не залежить від амплітуди сигналу, і вимірювання відбувається автоматично при перевищенні порогу. Це дозволяє пристроям, які використовують цей метод, працювати в широкому динамічному діапазоні порівняно з тими, які використовують інші методи. Основним фактором, що впливає на точність цього методу, є рівень шумів [9].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

18

1.5 Перетворювачі

Ключовим елементом будь-якого ультразвукового товщиноміра є перетворювач, який генерує або приймає ультразвукові сигнали. Перетворювачі відіграють вирішальну роль у точності та надійності вимірювань товщини матеріалів за допомогою ультразвукових технологій. Одним з найбільш поширених типів перетворювачів в ультразвукових товщиномірах є електроакустичні перетворювачі. Ці перетворювачі працюють на основі перетворення електричних сигналів в акустичні хвилі і навпаки.

В ультразвукових товщиномірах найбільш поширеними є п'єзоелектричні та магнітострикційні перетворювачі через їхню ефективність, надійність та точність у вимірюваннях [10]. П'єзоелектричні перетворювачі використовуються найчастіше через їх високу чутливість і точність, що робить їх ідеальними для більшості застосувань.

В таблиці 1.1 наведено варіанти п'єзоелектричних перетворювачів, які випускаються серійно, та їх технічні характеристики. Ця інформація включає різноманітні моделі перетворювачів, їх робочі частоти, розміри, матеріали, з яких вони виготовлені, а також діапазон вимірювань.

Табл. 1.1 П'єзоелектричні перетворювачі

Назва	Тип	Кут введення сигналу	Частота, МГц	Габаритні розміри, мм	Розміри п'єзоелемента, мм	Матеріал призми, протектора	Діапазон товщин вимірювання, мм
П112-5,0-10/2	Прямий	-	5	Ø25 x 50	Ø10	Оргскло	1 ... 30

П111-5,0-К10	Прямий	-	5	Ø25 x 44	Ø10	Кераміка	Не вказано виробником
П111-2,5-К12	Прямий	-	2,5	Ø25 x 44	Ø12	Зносостійка кераміка	Не вказано виробником
П112-2,5-12/2	Прямий	-	2,5	Ø25 x 50	Ø12	Оргскло	2 ... 30
П112-10-2x3	Прямий	-	10	2 x 7 x 3	2 x 3	Акрил	0,5 ... 15
П121-5-70	Похилий	70	5	Стріла ПЕП – 8	10 x 5	-	Від 3
П121-5-45	Похилий	45	5	Не вказано виробником	10 x 5	-	Не вказано виробником
П121-5-50	Похилий	50	5	Не вказано виробником	10 x 5	-	Не вказано виробником
П121-5-55	Похилий	55	5	Не вказано виробником	10 x 5	-	Не вказано виробником
П112-5-10/2-А-01	Прямий	-	5 ± 0,5	25 x 20 x 35	Ø 10	-	1 ... 300
П112-5-10/2-А-01	Прямий	-	10 ± 0,5	25 x 20 x 35	Ø 6	-	0,6 ... 40
П112-2,5-12/2-А-01	Прямий	-	2,5 ± 0,25	25 x 20 x 35	Ø 12	-	2,5 ... 300

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

20

П112-5-10/2-А-05	Прямий, через покриття	-	5 ± 0,5	25 x 20 x 35	Ø 10	-	2 ... 300
П112-1.25-20/2-А-01	Прямий, для поліетиле нів	-	1,25 ± 0,12	30 x 38	Ø 20	-	2 ... 60
П112-10-3/2-А-01	Прямий	-	10 ± 0,5	22 x 18 x 30	Ø 3	-	0,5 ... 10

Найбільш поширеними в УЗТ перетворювачами є прямі. Діапазони в усіх перетворювачі різні, адже вони можуть виготовлятися з різних матеріалів, різного діаметру, типу і для різних цілей. Визначити найкращий серед них не можливо, адже це суб'єктивне поняття і залежить від конкретних потреба користувача, умов вимірювання та інших факторів.

1.6 Апаратна реалізація засобів УЗТ

Ультразвукові товщиноміри використовуються в різних галузях завдяки їхній здатності точно вимірювати товщину матеріалів без руйнування об'єкта дослідження. Основні галузі застосування включають:

1- Промисловий контроль, де вимірюються товщину металевих листів, труба, деталей, упаковок і багато чого іншого [11].

2- Будівництво та інфраструктура, де контролюють товщину бетону, будівельних матеріалів, покриттів трубопроводів.

3- Медицина, в якій ультразвукова товщинометрія використовується для вимірювання товщини тканини та органів, а також контроль товщини протезів

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та імплантів. Прикладом цьому є ультразвуковий діагностичний зонд, який може виміряти товщину стінок серця.

4- Нафтова промисловість, в якій за допомогою ультразвукових товщиномірів вимірюють стінки та дивляться на стан трубопроводів.

5- Авіаційна та космічні промисловості, де вимірюють товщини обшивки елементів літаків та космічних апаратів [12].



Рис. 1.4 Вимірювання товщини сталевих газових труб

В таблиці 1.4 наведено деякі популярні ультразвукові товщиноміри, їхніми характеристиками

Табл. 1.2 Приклади ультразвукових товщиномірів, що випускаються серійно

Назва	Діапазон вимірювання, мм	Діапазон швидкості УЗ в матеріалі, м/с	Габарити (Ш х В х Г), мм	Маса, г	Живлення	Примітка
45MG	0.08 - 635	508 - 18690	91.1 x 162 x 41.1	430,	3 батареї AA/USB-порт	Ехо-Ехо вимірювання, THRU-COAT
УТ-31	0.8 - 200	1000-9999	148 x 82 x 32	470	Батарея КРОНА, акумулятор НИКА	10-ступінчате регулювання підсилення, корегування нелінійності датчиків
T-Mike EL	0.5 – 500	2540 - 14894	62 x 150 x 32	460	4 лужних або NiCd елементи	Режими: Scan, Alarm, B-Scan, Difference
38D L PLUS	0.08 – 635	508 - 13995	125 x 211 x 46	814	AC/DC, 24В. Акумулятор 23,760 Втч або 5 AA елементи	Двохелементний датчик, THRU-COAT, Ехо-Ехо вимірювання Thru-Paint
УТ-1М-СТ	0.8 – 1000	700 – 17000	130 x 90 x 40	400	Дві NiMH акумуляторні батареї по 1.2 В	Міцний металевий корпус, спеціальні високодемпфировані перетворювачі
УТ-1М-ІР	0,45 - 1500	700 – 17000	160x90x 28	400	Акумулятор типу AA, 3 шт.	Водонепроникний, Ехо-Ехо вимірювання через покриття

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

23

УТ-507	0.6-300	1000-9999	125x65x23	165	2 акумулятори типу АА	Режими «Подвійне відлуння» та «Імпульс-відлуння»
УТ-1М	0,45 - 1500	700 – 17000	122x76x37	400	Дві НіМН акумуляторні батареї по 1.2 В	Архів швидкостей, регулювання всіх параметрів акустичного тракту, Android застосунок

Найбільш схожою характеристикою всіх цих ультразвукових товщиномірів є діапазон вимірювання. Звичайно він не однаковий, всі ці товщиноміри створені з різними підходами і різними виробниками, але цей діапазон у всіх з наведених приладів практично однаковий.

Серед всіх наведених в таблиці 1.2 товщиномірів, найбільше виділяються такі:

1- УТ-31 – Розроблений українською компанією «Novotest», цей товщиномір має довгу тривалість роботи, завдяки можливості підключити акумулятор або батареї КРОНА, 10-и ступінчате регулювання підсилення та корегування нелінійності датчиків.

2- 38DL PLUS – Цей товщиномір виділяється своєю тривалістю роботи завдяки акумулятору та двохелементний датчик, з різними режимами такими як «THRU-COAT» та «THRU-PAINT»

3- УТ-1М (рис. 1.5) – Розроблений українською компанією «Novotest», цей товщиномір найобширніший з усіх наведених діапазон вимірювання товщини, має архів швидкостей ультразвуку, регулювання всіх параметрів акустичного тракту, а також розроблений компанією додаток для ОС Android.



Рис. 1.5 Товщиномір УТ-1М вимірює товщину сталюї профільної труби

1.7 Аналіз об'єктів контролю

Як початковий приклад зразка матеріалу, візьмемо поширений для виготовлення обшивки літаків в українській авіаційній промисловості сплав алюмінію В-95 [13]. Аналогом цього сплаву який використовують в інших країнах є 7075-Т6. Сплав В-95 славиться високою твердістю та міцністю, він погано піддається деформаціям так як не володіє пластичністю але відмінно піддається механічним обробкам. Його границя міцності становить 600-700 МПа, а межа текучості досягає 550 МПа. Твердість складає 150 НВ. Щодо теплопровідності, варто відзначити, що у цьому сплаві вона є досить низькою. Експлуатація такого сплаву доцільна при температурах, що не перевищують 100-120 градусів Цельсія. Сплав В-95 складається з алюмінію, цинку, магнію і міді, а повний склад і відсоткове відношення зображує рисунок 1.6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

25

Хімічний склад сплаву В-95, %

Al - 86.3 - 91.5% Zn - 5 - 7% Mg - 18 - 28% Cu - 1.4 - 2% Mn - 0.2 - 0.6% Fe - до 0.5% Si - до 0.05
 Ni - до 0.1% Cr - 0.1 - 0.25% Ti - 0.05% Інші - 0.1%

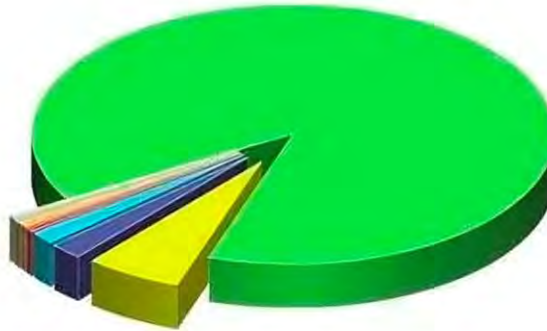


Рис. 1.6 Хімічний склад сплаву В-95 у відсотковому відношенні

Високий рівень включень впливає на стійкість матеріалу до корозії, що зменшується порівняно з чистим алюмінієм, хоча залишається прийнятним. Особливо помітна схильність до корозії під впливом локальних навантажень. Додавання марганцю сприяло досягненню максимальної твердості матеріалу [14].

Під час виробництва прокатів алюмінію В-95, виробники опираються на стандарти виробництва ГОСТ або ДСТУ, в яких вказані розміри і допустимі відхилення від них. Для сплаву В-95 використовується ГОСТ 21631-78. Він вказує допустимі відхилення по товщині листа (табл. 1.3), по ширині листа опираючись на їх товщину (табл. 1.4), і по довжині листа опираючись на їх товщину (табл. 1.5). В таблицях 1.3, 1.4 та 1.5 позначено граничні відхилення при нормальній точності виробництва.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Табл. 1.3 Допустимі відхилення товщини

Товщи на листа, мм	Граничні відхилення по товщині при ширині листа, мм					
	600	800, 900	1000	1200	1400, 1425, 1500, 1600	1800, 2000
0.4	-0.05	-0.08	-0.1	-0.12		
0.5	-0.05	-0.08	-0.1	-0.12	-0.12	
0.6	-0.06	-0.1	-0.12	-0.12	-0.13	
0.7	-0.06	-0.1	-0.12	-0.12	-0.13	
0.8	-0.08	-0.12	-0.12	-0.13	-0.14	-0.16
0.9	-0.08	-0.12	-0.12	-0.13	-0.14	-0.16
1	-0.1	-0.15	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18
1.2	-0.1	-0.15	-0.15	-0.16	-0.17	-0.2
1.5	-0.15	-0.2	-0.2	-0.22	-0.25	-0.26
2	-0.15	-0.2	-0.2	-0.24	-0.26	-0.27
3	-0.25	-0.3	-0.3	-0.3	-0.34	-0.35
3.5	-0.25	-0.3	-0.3	-0.32	-0.35	-0.36
4	-0.25	-0.3	-0.3	-0.35	-0.36	-0.37
4.5	-0.25	-0.3	-0.3	-0.35	-0.36	-0.37

Табл. 1.4 Допустимі відхилення ширини

Товщина листа, мм	Ширина листа, мм	Граничні відхилення по ширині, не більше
До 5.0 включно	До 1000 включно	+8.0
	Більше 1000	+10
Більше 5.0	До 1000 включно	+12
	Більше 1000	+15

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

27

Табл. 1.5 Допустимі відхилення довжини

Товщина листа, мм	Довжина листа, мм	Граничні відхилення по довжині, не більше
Від 0.3 до 3.5 включно	Від 2000 до 7200	+20
Більше 3.5		+25

Для подальшого в роботі розрахунку акустичного тракту нам також потрібні будуть фізичні та акустичні властивості алюмінію, наведені в табл. 1.6

Табл. 1.6 Фізичні та акустичні властивості алюмінію

Швидкість хвиль c , $1 * 10^3$ м/с		Густина ρ , $1 * 10^3$ кг/м ³	Хвильовий спротив, z 10^6 Па*с/м	Коефіцієнт затухання на 2.5 МГц δ , Нп/м	Питомий опір, Ом * мм ² /м
Поздовжні	Поперечні				
6.36	3.13	2.7	17.2	0.1 ... 1	0.028

Висновки до розділу 1

В першому розділі дипломного проєкту було розглянуто принципи роботи ультразвукових товщиномірів, їхні моделі, характеристики і особливості кожної з них, сфери їх застосування та матеріали об'єктів контролю які застосовуються в авіації. В процесі підготовки теоретичного матеріалу і написання цього розділу, стало зрозуміло що товщиноміри можуть використовуватись не тільки на виробництвах а і в медицині.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглядаючи хвильову природу ультразвуку та зрозумівши основні принципи роботи з ним, було виділено один з найбільш популярних методів ультразвукової товщинометрії, а саме луна-імпульсний метод. Він є найбільш ефективним і легко може бути використаний для подальшого дослідження товщинометрії в умовах малого відношення сигнал/шум. Також на рисунку 1.2 була представлена узагальнена структурна схема луна-імпульсного товщиноміра, яка відповідає структурі прибору для подальших досліджень в цій дипломній роботі.

Під час пошуку різних моделей товщиномірів та перетворювачів для них, було з'ясовано що в Україні ця сфера не стоїть на місці і такі компанії як «Novotest» постійно удосконалюють свої технології, і наведені приклади їхньої продукції можна побачити в таблицях 1.1 та 1.2.

Матеріали для яких може бути застосована УЗТ не обмежуються дослідженими матеріалами які використовуються в авіаційній промисловості. Але для дослідження було взято за приклад марку алюмінієвого сплаву В-95, який дуже часто використовується в авіації. Інформація про цей сплав була надана в розділі 1.7

УЗ використовується в медицині, де замість металів, об'єктом контролю слугує людське тіло. А також нафтова промисловість, де для трубопроводів використовується сталь, і по трубах постійно протікає нафта, що не заважає людям проводити НК цих самих труб.

Дослідження всього матеріалу наведеного вище, дають зрозуміти, наскільки УЗТ є корисною саме в ситуаціях, де немає легкого доступу до внутрішніх стінок ОК, а руйнування цих самих ОК задля дослідження внутрішніх поверхонь неприпустиме, і в найбільш критичних випадках навіть може привести до величезних катастроф на тих самих нафто або газопроводах.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНОГО ТРАКТУ ТА АНАЛІЗ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЗТ

2.1 Розрахунок електроакустичного тракту ультразвукового товщиноміра

Розрахунок електроакустичного тракту ультразвукового товщиноміру є ключовим етапом у процесі проектування цього пристрою. Електроакустичний тракт включає в себе різноманітні компоненти, такі як п'єзоелектричні перетворювачі, підсилювачі, фільтри та інші. Розрахунок цього тракту враховує параметри кожного компонента, їх взаємодію та вплив на якість та ефективність пристрою. Використання відповідних математичних моделей та експериментальних даних дозволяє отримати оптимальні параметри для досягнення необхідних характеристик ультразвукового товщиноміру.

2.1.1 Визначення структури акустичного тракту

Згідно з обраним методом вимірювання, акустичний тракт складається із таких компонентів: перетворювач – об'єкт контролю. Товщину шару контактної рідини не враховуємо через його невелике значення. Рисунок 2.1 показує структуру цього тракту.

Товщина ОК, яким є лист прокату алюмінію: $h_{ок} = 4\text{мм}$

Акустичне середовище має такі характеристики:

Густина:

$$- \rho_{цтс} = 7000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$- \rho_{ал} = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкості поширення ультразвуку:

- $C_{цтс} = 3300 \frac{м}{с}$

- $C_{ал} = 6280 \frac{м}{с}$

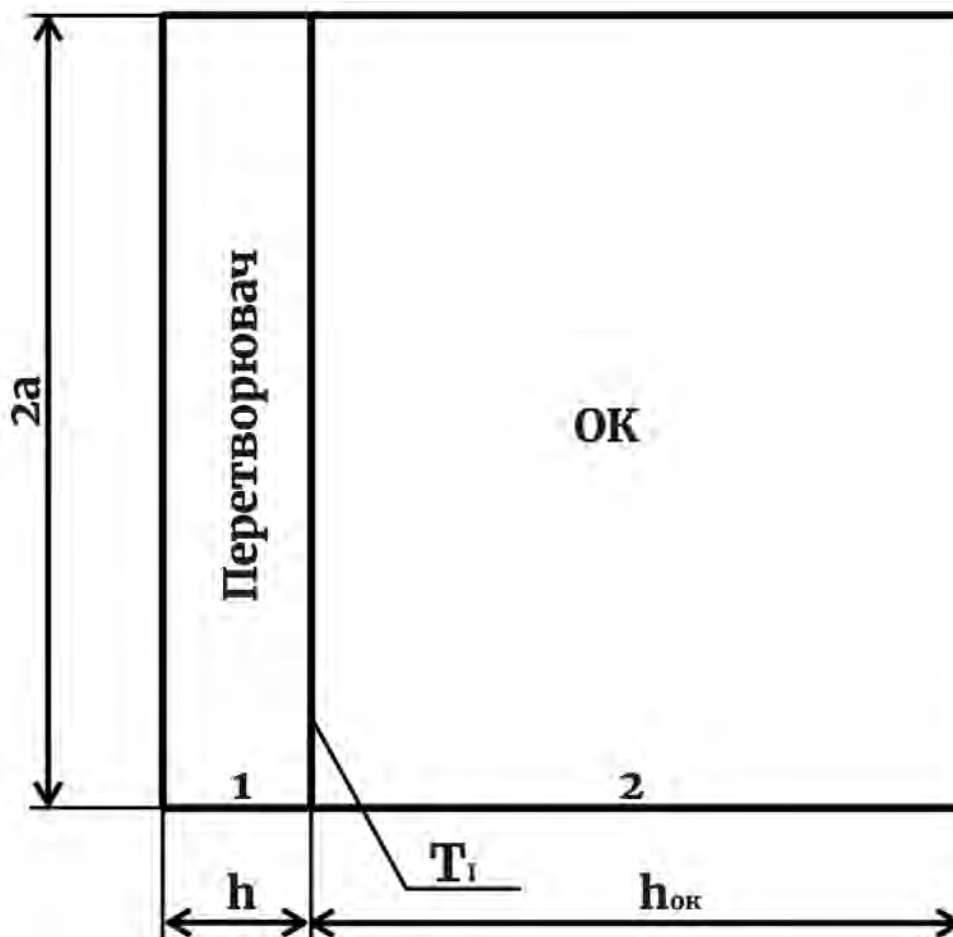


Рис. 2.1 – Структура акустичного тракту

2.1.2 Розрахунок довжини хвилі в ОК

Виходячи з умови контролю товщини листа в межах $\Delta h = 0.3\text{мм}$, обираємо роздільну здатність системи $\Delta h_{\text{розд}} = 0.03\text{мм}$. З урахуванням того, що час затримки ультразвукових коливань визначатиметься фазовим методом, задамо дискрет вимірювання фазових зсувів сигналів рівним

наближено 8° , тобто $\frac{1}{45}$ довжини хвилі. Тоді з урахуванням цих припущень, довжина хвилі складатиме:

$$8^\circ \rightarrow \frac{1}{45\lambda_{\text{ал}}}, \quad 8^\circ \rightarrow 0.03 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\text{ал}} = 45 * 0.03 = 1.35 \text{ мм}$$

Оскільки швидкість поздовжніх хвиль в алюмінію орієнтовно складає $6360 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, необхідно забезпечити частоту сигналу носія ультразвукових коливань, рівною

$$f = \frac{6280}{1.35 * 10^{-3}} = 4.65 \text{ МГц}$$

Обираємо найближчу до цього значення частоту ультразвукових перетворювачів 5МГц.

Для цієї частоти уточнене значення довжини хвилі складає

$$\lambda_{\text{ок}} = \frac{6280}{5 * 10^6} = 0.001256 \text{ мм}$$

2.1.3 Розрахунок товщини п'єзопластини

Для виготовлення п'єзопластин зазвичай використовують матеріал ЦТС-19 (цирконат-титанат свинецю). Швидкість поширення поздовжніх хвиль в цьому матеріалі $C_{\text{цтс}} = 3300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Ефективне збудження ультразвукових коливань пластини відбувається, коли її власна частота відповідає частоті електричних коливань. Тому ми обираємо товщину h п'єзопластини, що дорівнює половині довжини ультразвукової хвилі ЦТС λ в матеріалі перетворювача.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h = \frac{\lambda_{\text{цтс}}}{2} = \frac{C_{\text{цтс}}}{2 * f} = \frac{3300}{2 * 5 * 10^6} = 0.33 \text{ мм}$$

2.1.4 Розрахунок границі ближньої зони

Для розрахунків з таблиці 1.1 обрано ПЕП П112-5-10/2-А-01, який має такі характеристики:

- Частота: 5МГц
- Розміри п'єзоелемента: \varnothing 10мм
- Діапазон вимірювання товщин: 1...300мм

Для забезпечення роботи в ближній зоні необхідно виконати умову

$$r_0 = \frac{a^2}{\lambda_{\text{ок}}} = \frac{(5 * 10^{-3})^2}{1.256 * 10^{-3}} = 0.0199 \text{ мм}$$

Де, r_0 – границя ближньої зони перетворювача, a – радіус п'єзопластини.

2.1.5 Розрахунок коефіцієнта ослаблення акустичного тракту

Загальна формула для розрахунку коефіцієнту ослаблення акустичного тракту:

$$K_{\text{АТ}} = \frac{P_n}{P_u} = 0,8 * T_{I1} * T_{I2} * R_p * e^{-2(h_{\text{ок}} * a_{\text{ок}})}, \quad (2.1)$$

де $a_{\text{ок}}$ – коефіцієнт затухання ультразвукової хвилі в матеріалі ОК на робочій частоті 5 МГц, T_{Ii} – коефіцієнт проходження ультразвукової хвилі границі між i -тим та $(i+1)$ -им шарами, R_p – коефіцієнт відбиття ультразвукової хвилі від границі межування ОК-повітря, $R_p = 1$.

Розрахуємо необхідні для розрахунків T_{Ii} акустичні імпеданси

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовищ.

$$Z_{ал} = \rho_{ал} * C_{ал} = 2700 * 6280 = 16,95 * 10^6 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2 * \text{с}}$$

$$Z_{цтс} = \rho_{цтс} * C_{цтс} = 7000 * 3300 = 23,1 * 10^6 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2 * \text{с}}$$

Тепер розрахуємо коефіцієнти проходження хвилі між шарами матеріалів.

$$T_{I1} = \frac{4Z_{ал} * Z_{цтс}}{(Z_{ал} + Z_{цтс})^2} \quad (2.2)$$

$$T_{I1} = \frac{4 * 16,95 * 10^6 * 23,1 * 10^6}{(16,95 * 10^6 + 23,1 * 10^6)^2} = 0.976$$

Використовуючи ці дані, обрахуємо коефіцієнт послаблення акустичного тракту при контролі виробів із алюмінію для послідовності донних імпульсів. [2, 4]

Для першого донного імпульсу маємо:

$$K_{AT1} = 0,8 * T_{I1} * R_p * e^{-2} = 0.8 * 0.976 * 1 * e^{-2(4 * 10^{-3} * 0.25)} = 0.7792;$$

для другого донного імпульсу:

$$K_{AT2} = 0.8 * 0.976 * 1 * e^{-4(4 * 10^{-3} * 0.25)} = 0.7776;$$

для третього донного імпульсу:

$$K_{AT3} = 0.8 * 0.976 * 1 * e^{-6(4 * 10^{-3} * 0.25)} = 0.7761;$$

для четвертого донного імпульсу:

$$K_{AT4} = 0.8 * 0.976 * 1 * e^{-8(4 * 10^{-3} * 0.25)} = 0.7745;$$

для п'ятого донного імпульсу:

$$K_{AT5} = 0.8 * 0.976 * 1 * e^{-10(4 * 10^{-3} * 0.25)} = 0.7730;$$

В ПЕП під час перетворення електричного сигналу в ультразвукові коливання і навпаки, відбувається втрата енергії сигналу. Зазвичай в розрахунках приймають коефіцієнт подвійно електромеханічного

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворення $K_{ем} = 0.3 \dots 0.4$. З урахування цього коефіцієнти електроакустичного тракту для наведених вище випадків визначаються як:

$$K_{еат} = K_{ем} * K_{АТ} \quad (2.3)$$

$$K_{еат1} = K_{ем} * K_{АТ1} = 0.3 * 0.7792 = 0.2337$$

$$K_{еат2} = K_{ем} * K_{АТ2} = 0.3 * 0.7776 = 0.2332$$

$$K_{еат3} = K_{ем} * K_{АТ3} = 0.3 * 0.7761 = 0.2328$$

$$K_{еат4} = K_{ем} * K_{АТ4} = 0.3 * 0.7745 = 0.2323$$

$$K_{еат5} = K_{ем} * K_{АТ5} = 0.3 * 0.7730 = 0.2319$$

Якщо амплітудне значення сигналу збудження дорівнює $U_0 = 10$ В, на виході ПЕП матимемо прийнятий сигнал з амплітудами відповідно:

$$U_{вих} = U_0 * K_{еат} \quad (2.4)$$

$$U_{вих1} = 10 * 0.2337 = 2.337 \text{ В}$$

$$U_{вих2} = 10 * 0.2332 = 2.332 \text{ В}$$

$$U_{вих3} = 10 * 0.2328 = 2.328 \text{ В}$$

$$U_{вих4} = 10 * 0.2323 = 2.323 \text{ В}$$

$$U_{вих5} = 10 * 0.2319 = 2.319 \text{ В}$$

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Розрахунок електричної ємності перетворювача

Електрична ємність перетворювача є важливим параметром, що визначає його електричні властивості та характеристики. Розрахунок цієї ємності є ключовим завданням при проектуванні та виготовленні п'єзоелектричних перетворювачів. Цей параметр визначається геометричними розмірами та матеріальними властивостями перетворювача. Точний розрахунок ємності дозволяє оптимізувати роботу перетворювача та досягти бажаних результатів у використанні ультразвукових пристроїв та систем.

В даному проєкті використаний ПЕП, розмірність та ілюстрація зовнішнього вигляду контактної частини якого показано на рисунку 2.2

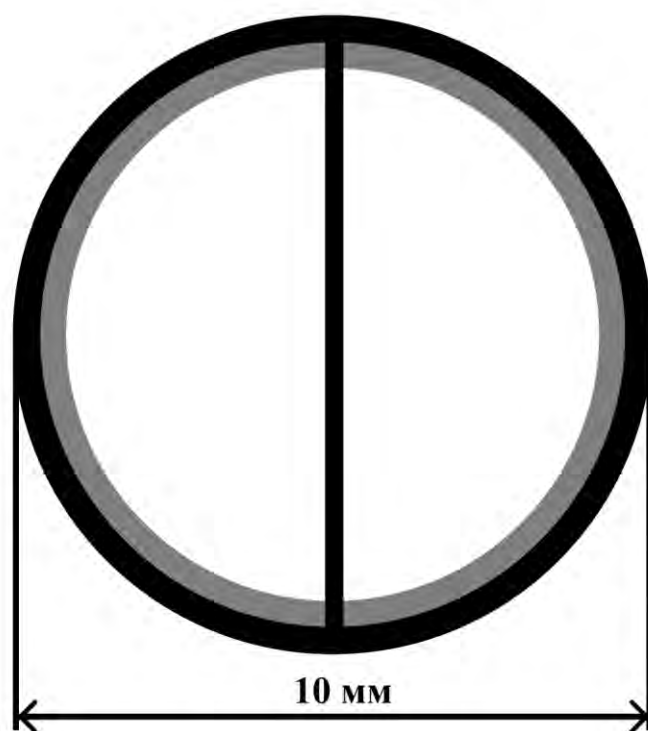


Рис. 2.2 Ілюстрація зовнішнього вигляду контактної частини ПЕП

Оскільки відносна діелектрична проникність матеріалу перетворювача ЦТС-19 становить $\epsilon = 1700$, електрична постійна $\epsilon = 8.85 * 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$, а площа пластини становить:

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = \frac{\pi a^2}{2} = \frac{3.14 * 25}{2} = 39.25 \text{мм}^2$$

То

$$C_0 = \frac{\varepsilon * \varepsilon_0 * S}{h} = \frac{1700 * 8.85 * 10^{-12} * 39.25 * 10^{-6}}{0.33 * 10^{-3}} = 1789 \text{пФ}$$

2.3 Розроблення амплітудно-фазового методу виявлення донних сигналів в луна-імпульсній УЗТ

В ультразвукових луна-імпульсних товщиномірах використовується для збудження коливань радіоімпульсні сигнали з Гауссовою обвідною і синусоїдним сигналом носієм. Модель таких сигналів представляється формулою:

$$u_3(t) = U(t) \sin 2\pi ft, \quad t \in [0, T_A] \quad (2.5)$$

де $U(t)$ – обвідна зондуючого сигналу; f – частота сигналу-носія, T_A – час аналізу сигналу.

Донні сигнали після перевідбиття від поверхонь ОК представляються послідовністю луна-імпульсів, модель яких задається у такому виді:

$$u_d(t) = \sum_i k_{EAT,i} u_3(t - \tau_3 - i\tau) + \xi(t), \quad t \in [0, T_A] \quad (2.6)$$

де $k_{EAT,i}$ – коефіцієнт ослаблення електроакустичного тракту для донних сигналів після їх i -того відбиття від дна ОК; τ – період повторення донних сигналів ($\tau = 2\tau_{OK}$); τ_3 – затримка першого донного імпульсу відносно

зондуєчого; $\xi(t)$ – реалізація гауссового шуму з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ^2 .

Інформація про товщину ОК міститься у величині τ . Значення τ вимірюється як інтервал між суміжними донними імпульсами.

Зазвичай, методи оброблення сигналів УЗТ фокусуються на використанні обвідної сигналу (2.6) для визначення затримок $\tau_{ок}$. Проте, коли амплітуда донних сигналів стає порівнянною зі значенням σ , такі методи виявлення донних сигналів стають не ефективними, а визначення $\tau_{ок}$ через обвідну стає або неможливим або супроводжується великими похибками.

В роботі [15] запропоновано використання амплітудно-фазового методу для виявлення донних сигналів. Його сутність полягає у аналізі дисперсії фазових зсувів сигналу (2.6) відносно фази сигналу носія з урахуванням поточних значень обвідної сигналу.

Амплітудно-фазовий метод виявлення донних сигналів реалізується послідовністю наступних етапів:

- 1) аналого-цифрове перетворення сигналу $u_d(t)$ і його представлення дискретною послідовністю $u_d[j], j = 1 \dots J$, де J – обсяг послідовності;
- 2) застосування ДПГ до $u_d[j]$ і отримання гільберт-образу $\tilde{u}_d[j]$,
 $j = 1 \dots J$;
- 3) обчислення поточних значень обвідної і фази (в межах інтервалу $(0; 2\pi]$) послідовності $u_d[j]$:

$$\hat{U}_d[j] = \sqrt{(u_d[j])^2 + (\tilde{u}_d[j])^2}, j = \overline{1, J} \quad (2.7)$$

$$\varphi_d[j] = \arctg \frac{\tilde{u}_d[j]}{u_d[j]} + 0,5\pi \{2 - \text{sign} \tilde{u}_d[j] (1 = \text{sign} u_d[j])\}, j = \overline{1, J} \quad (2.8)$$

де sign – знакова функція.

4) визначення різниці фаз послідовності $u_d[j]$ і дискретної фази сигналу-носія

$$\varphi_d[j] = \varphi_d[j] - 2\pi f j T_d, j = \overline{1, J} \quad (2.9)$$

де T_d – період дискретизації сигналу;

5) отримання результуючої довжини результуючого вектора [4] в процесі ковзного аналізу різниці фаз $\varphi[j]$ з вікном апертурою M

$$r[j] = \frac{1}{M} \sqrt{\left(\sum_{j-\frac{M}{2}+1}^{j+\frac{M}{2}} \hat{U}_d^* \cos(\varphi[j]) \right)^2 + \left(\sum_{j-\frac{M}{2}+1}^{j+\frac{M}{2}} \hat{U}_d^* \sin(\varphi[j]) \right)^2}, \quad (2.10)$$

де \hat{U}_d^* - це відносне значення обвідної.

б) визначення затримки $\tau_{ок}$ за обрани рівнем, з яким порівнюються суміжні імпульси в послідовності $r[j]$.

У випадку значних шумів що супроводжують процес оцінювання $\tau_{ок}$ до послідовності $r[j]$ можуть бути застосовані методи фільтрації (до прикладу медіанно-ковзної фільтрації).

Висновки до розділу 2

В даному розділі було розраховано акустичний тракт для донних імпульсів під час виконання УЗНК за допомогою ультразвукового методу товщинометрії. Коефіцієнт послаблення даного акустичного тракту змінюється в діапазоні від 0.7792 до 0.773.

Було обрано ПЕП для системи ультразвукової товщинометрії, прямого типу, який може бути використаний для вимірювання товщини в діапазоні

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1...300 мм, працюючи на частоті 5 МГц. Для нього була розрахована границя ближньої зони, яка дорівнює 0,0199 мм, це означає що ми працюємо в ближній зоні і коефіцієнт послаблення взятий для ближньої зони.

Також було розраховано коефіцієнти послаблення акустичного тракту, не лише для першого імпульсу, а й для послідовно відбитих імпульсів. Після чого було розраховано електричну ємність ПЕП та наведено ілюстративне зображення контактної площини прямого ПЕП з її розмірами.

В кінці було розроблено амплітудно-фазовий метод виявлення донних імпульсів, порівняно його з іншими методами та наведено алгоритм роботи амплітудно-фазового методу з усіма його формулами.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						40
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ ТА СТРУКТУРИ ЧОТИРИКАНАЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОВЩИНОМІРА

3.1 Опис структури чотириканального ультразвукового товщиноміра

На промислових масштабах, не завжди достатньо одноканального товщиноміра, який вимірює товщину матеріалу в одній точці прокату чи якогось іншого ОК. Задля підвищення ефективності, швидкості та задля зменшення похибок можна використовувати чотириканальний товщиноміри, структурна схема якого представлена на рисунку 3.1.

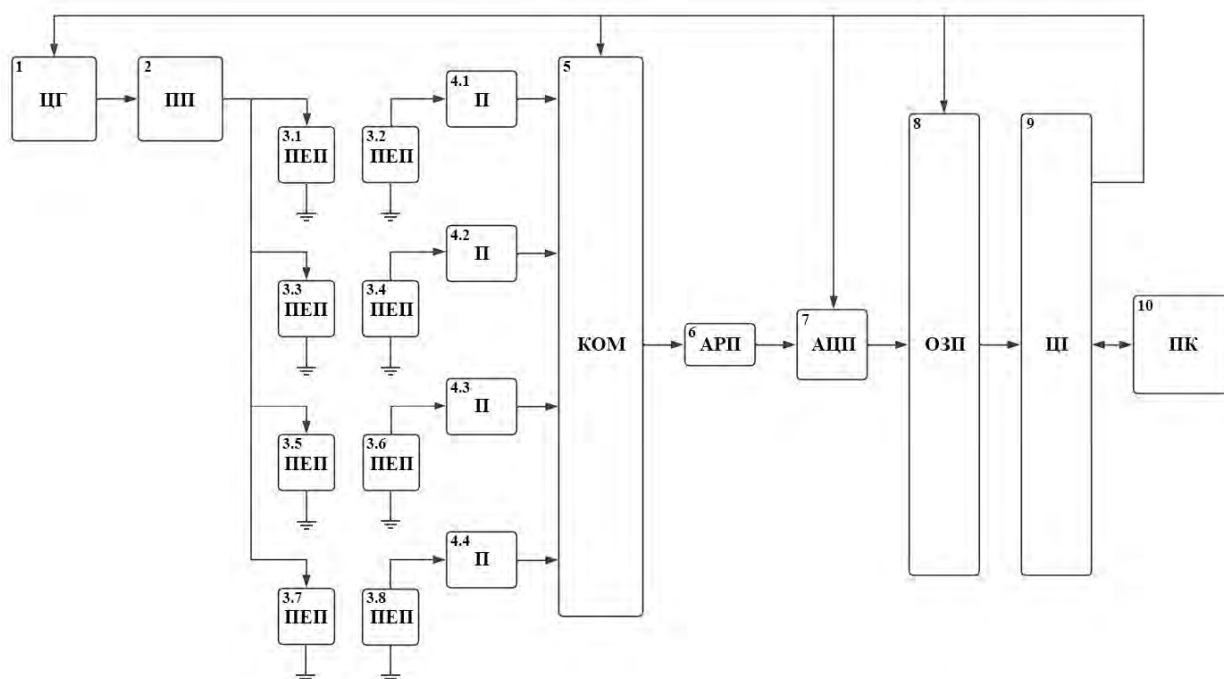


Рис. 3.1 Електрично-структурна схема чотириканального ультразвукового товщиноміра

Призначення елементів схеми:

- 1- Цифровий генератор;
- 2- Підсилювач потужності;
- 3- П'єзоелектричний перетворювач;

- 4- Підсилювач високої частоти;
- 5- Мультиплексор (комутатор);
- 6- Підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення;
- 7- Перетворювач вимірювального інтервалу в цифровий код;
- 8- Оперативний запам'ятовуючий пристрій;
- 9- Процесорний блок;
- 10- Персональний комп'ютер для обробки даних.

Схема на рис. 3.1 представляє 4-х канальний ультразвуковий товщиномір, який включає в себе кілька ключових компонентів для генерування, передавання, прийому та обробки ультразвукових сигналів.

На початку, цифровий генератор (1) створює цифрові сигнали, які потім передаються до підсилювача потужності (2). Підсилювач потужності підсилює ці сигнали до рівня, достатнього для роботи п'єзоелектричних перетворювачів (3). Кожен п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) перетворює електричні сигнали в ультразвукові хвилі, які випромінюються в матеріал, товщину якого потрібно виміряти. Після проходження через матеріал ультразвукові хвилі повертаються назад до ПЕП, де вони знову перетворюються в електричні сигнали.

Далі, ці сигнали надходять до підсилювачів високої частоти (4), які підсилюють повернені сигнали. Мультиплексор (5) (комутатор) вибирає сигнал з одного з каналів для подальшої обробки. Обраний сигнал потрапляє до підсилювача з автоматичним регулюванням (6), який адаптує рівень сигналу для оптимального перетворення.

Після цього перетворювач вимірювального інтервалу в цифровий код (7) обробляє сигнал, перетворюючи його в цифровий код, який може бути використаний для подальшого аналізу. Цей цифровий код зберігається в оперативному запам'ятовуючому пристрої (8), що забезпечує швидкий доступ до даних.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процесорний блок (9) обробляє отримані дані, виконуючи необхідні обчислення та аналіз, після чого, оброблені дані передаються до персонального комп'ютера (10), де вони можуть бути збережені, проаналізовані та візуалізовані.

3.2 Обґрунтування елементної бази чотириканального товщиноміра

Вибір елементної бази для 4-х канального ультразвукового товщиноміра обґрунтований необхідністю забезпечення точного, надійного та швидкого вимірювання товщини матеріалів за допомогою ультразвукових хвиль. Кожен компонент виконує свою ключову функцію в цьому процесі:

1. Цифровий генератор: Створює точні та стабільні сигнали для генерування ультразвукових хвиль;
2. Підсилювач потужності: Забезпечує достатню потужність для ефективної роботи ПЕП;
3. ПЕП: Перетворюють електричні сигнали в ультразвукові хвилі та навпаки [16];
4. Підсилювачі високої частоти з обмежувачем: Підсилюють повернені сигнали і захищають систему від перевантаження;
5. Мультиплексор: Дозволяє обробляти сигнали з кількох каналів по черзі;
6. Підсилювач з автоматичним регулюванням: Оптимізує рівень сигналу для точного вимірювання;
7. Перетворювач вимірювального інтервалу в цифровий код: Забезпечує точну цифрову обробку сигналів;
8. Оперативний запам'ятовуючий пристрій: Зберігає дані для швидкого доступу та обробки;
9. Процесорний блок: Виконує необхідні обчислення та аналіз даних;
10. Персональний комп'ютер: Зберігає, аналізує, та візуалізує дані.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Визначення інформативних параметрів сигналів УЗТ за допомогою дискретного перетворення Гільберта

Пізнане в математиці перетворення Гільберта для знакозмінних числових функцій $U(x) \in L_2$ у вигляді інтегрального перетворення з ядром $1/\pi x$ широко використовується для аналізу характеристик таких функцій, як амплітуда, фаза та частота [17].

Методологія амплітудно-фазового методу виявлення сигналів на фоні шуму базується на комбінації інтегрального перетворення Гільберта для визначення обвідної і фазової складових сигналів, а також на методах статистичного аналізу результатів фазових вимірювань. Ці методи використовують теоретичні підходи до аналізу кутових даних для підвищення ефективності виявлення сигналів у шумовому середовищі. Дискретне перетворення Гільберта надає можливість отримувати та досліджувати дискретні характеристики ультразвукових сигналів - їх обвідну, амплітуду, фазу та фазовий зсув у залежності від часу, що визначаються за допомогою вибірок певного обсягу. На рисунку 3.2 зображено фрагмент сформованого цифрового сигналу у вигляді сигналу з гауссовою обвідною, на якому кружками позначено вибірки дискретної послідовності.

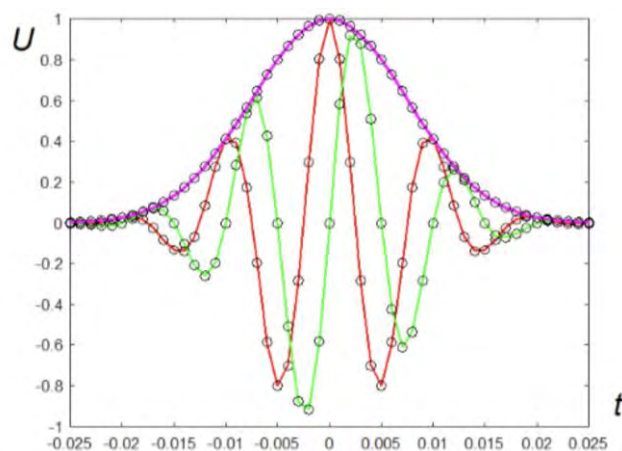


Рис. 3.2 Приклад графіків сигналу (червона крива), його Гільберт-образу (зелена крива) та обвідної (фіолетова крива)

3.4 Розробка удосконаленого амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ

При фазових вимірюваннях ультразвукових сигналів з гауссовою обвідною та при умовах наявності завад очікується, що при зменшенні амплітуди сигналу, різниці у фазах будуть мати більшу дисперсію. Цей факт важливо враховувати при визначенні вектору $r[j]$, який визначається з вимірювань фазових зсувів сигналів. З іншого боку, обвідна та фаза сигналу у співпадаючі моменти часу статистично залежні. Використання інформації про обвідну може підвищити точність вимірювання фази і навпаки.

Врахування миттєвих значень амплітуди ультразвуку може бути доцільним за допомогою обчисленої обвідної $\hat{U}_d, j \in [0, J)$. У вдосконаленому методі виявлення ультразвукових сигналів на фоні шуму пропонується використання вибірових значень обвідної $\hat{U}_d, j \in [0, J)$ як вагові коефіцієнти для визначення зваженої результуючої довжини вектора. Все це виконується за формулою:

$$r_w[j] = \frac{1}{M} \sqrt{\left(\sum_{j-\frac{M}{2}+1}^{j+\frac{M}{2}} \hat{U}_d^* * \cos(\varphi[j]) \right)^2 + \left(\sum_{j-\frac{M}{2}+1}^{j+\frac{M}{2}} \hat{U}_d^* * \sin(\varphi[j]) \right)^2},$$
$$j = \overline{\frac{M}{2}, J - \frac{M}{2}} \quad (3.1)$$

Для порівняння ефективності покращеного методу виявлення сигналів було проведено моделювання процесу послідовності згасаючих радіоімпульсів з гауссовою обвідною. У модельному експерименті використовувалися такі вхідні дані:

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Частота сигналу-носія: 2,3 МГц;
- Частота дискретизації: $2,3 \times 16 = 36,8$ МГц;
- Обсяг вибірки: $J = 6000$;
- Апертура вікна: $m = 32$;
- Кількість аналізованих імпульсів: 5;
- Максимальні значення амплітуд імпульсних сигналів: 0,6; 0,36, 0,215; 0,13; 0,0775;
- Середнє квадратичне значення шуму: $\sigma = 0.06$;
- Отримані значення відношення сигнал/шум становили: 10; 6; 3,6; 2,2; 1.3;

Результати моделювання представлені на рис. 3.3

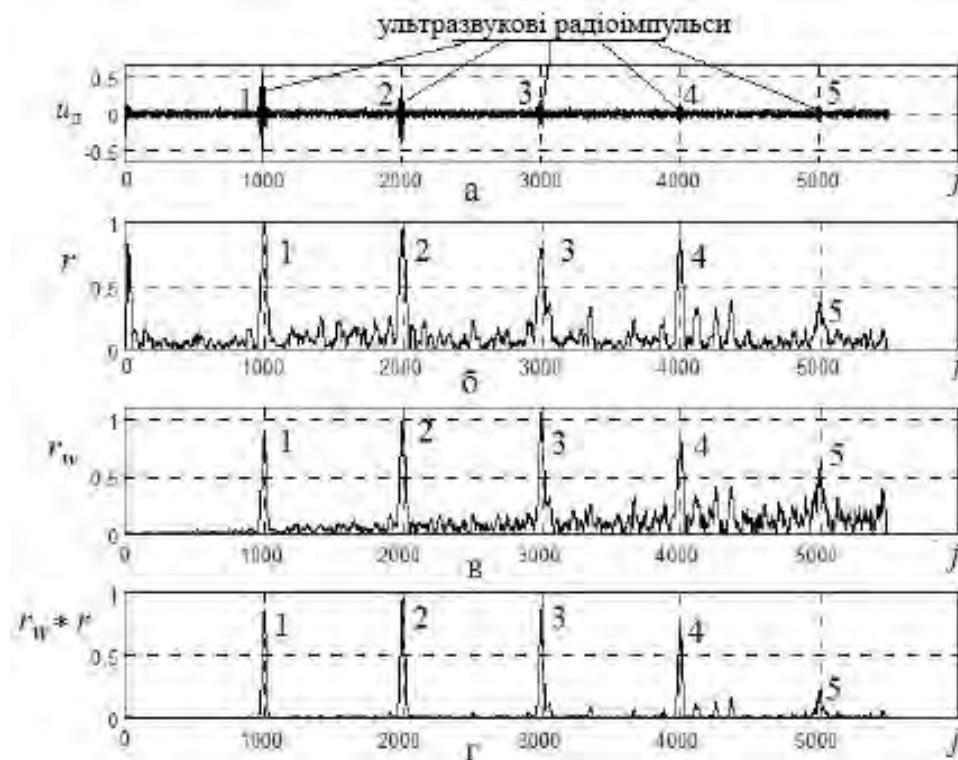


Рис. 3.3 Результати моделювання процесу виявлення інформаційних сигналів ультразвуку; а – аналізований сигнал; б – послідовність $r[j]$ в – послідовність $r_w[j]$; д – послідовність $r[j] * r_w[j]$

Рис. 3.3 дозволяє зробити кілька важливих висновків. По-перше, максимуми послідовності $r[j]$ точно співпадають у часі з максимумами

інформаційних сигналів. По-друге, п'ятий імпульс, який має відношення сигнал/шум = 1,3, має амплітуду, що практично порівнюється з рівнем шуму, що може ускладнити його надійне виявлення. Однак, за послідовністю $r_w[j]$, п'ятий імпульс виявляється. Також, у цій послідовності спостерігається значне зменшення рівня шуму від першого до третього імпульсу, що створює сприятливі умови для аналізу ультразвукових сигналів та визначення їх положення в часі. Нарешті, графік добутку $r[j] * r_w[j]$ демонструє набагато менший рівень шуму, порівняно з іншими графіками, що підкреслює його ефективність для аналізу сигналів ультразвукової товщинометрії та визначення їхнього положення в часі.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі детально розглянуто перетворення Гільберта, його призначення, області застосування та переваги. Перетворення Гільберта є важливим інструментом в аналізі та обробці сигналів, особливо в цифровій обробці сигналів (ЦОС). Воно дозволяє виділити фазову інформацію сигналу, яка не доступна при використанні інших методів.

Однією з основних властивостей перетворення Гільберта є здатність перетворювати реальний сигнал у комплексний аналітичний сигнал, що дає можливість більш детально аналізувати амплітудно-частотні характеристики сигналу та визначати його миттєву фазу і частоту. У розділі наведено ілюстрацію на рисунку 3.2, де показано графік сформованого цифрового сигналу з гауссовою обвідною, його Гільберт-образ та обвідну сигналу.

Наступним кроком було вдосконалення амплітудно-фазового методу виявлення та обробки сигналів ультразвукової томографії (УЗТ). Було обґрунтовано необхідність застосування амплітудно-фазового методу, його відмінності від традиційних методів та переваги. Зокрема, амплітудно-фазовий

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метод дозволяє більш точно визначати місцезнаходження відбитих сигналів, що підвищує точність та роздільну здатність томографічного зображення. Реалізація цього методу наведена у формулі 3.1, яка описує математичну модель обробки сигналів з використанням фазового аналізу.

Основним кроком даного розділу стало моделювання за допомогою удосконаленого амплітудно-фазового методу та графічно порівняння його зі звичайним варіантом цього методу. Графіки на рисунку 3.3 ілюструють початковий сигнал та результати його обробки. Удосконалений метод хоч і не змінює загальну картину цих результатів, але наприклад сигнал номер 5, перейшов межу значення амплітуди в 0.5, і в порівнянні з результатами від стандартного амплітудно-фазового методу, це доволі суттєвий результат, який може багато чого змінити при вимірюваннях товщини матеріалів або ж і в цілому в ультразвукових вимірюваннях чи обробках сигналів при умовах наявності великих шумів. Ці дослідження вкотре показали ефективність амплітудно-фазового методу виявлення сигналів, і якщо порівнювати з графіки кінцевого обробленого сигналу з початковим, різниця суттєва, і без обробки виявити пере-відбитий імпульс практично не можливо.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						48
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ

4.1 Розроблення алгоритмічно-програмного забезпечення амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ

Сигнали будуть оброблятися у середовищі Matlab, що дозволяє повністю використати можливості амплітудно-фазового методу виявлення сигналів. Matlab забезпечує потужні інструменти для аналізу та візуалізації даних, що критично важливо для точного визначення фазових характеристик сигналів. Результати обробки будуть графічно відображені, що полегшує їх інтерпретацію і дозволяє наочно продемонструвати ефективність методу. На рисунку 4.1 наведено код алгоритму обробки сигналів для застосування амплітудно-фазового методу виявлення сигналів.

Використання Matlab дозволяє детально налаштовувати параметри обробки сигналів, оптимізуючи процес і досягаючи максимальної точності [18, 19]. Це важливо при роботі з ультразвуковими сигналами, де незначні похибки можуть призвести до помилок.

Задля визначення часових затримок між донними ультразвуковими імпульсами та вирахування з цих значень товщини зразку ОК, було використано метод порогового рівня, основна ідея якого полягає у встановленні певного порогу який відокремлює частину амплітуди сигналу і коли імпульс перетинає цей поріг, ця подія реєструється і використовується для обрахунку часових затримок [20, 21].

для отримання доступу необхідно звернутись до авторів проекту

Рис 4.1 Код програмного забезпечення (Частина 1)

для отримання доступу необхідно звернутись до авторів проекту

Рис. 4.2 Код програмного забезпечення (Частина 2)

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритм на рисунках (4.3 – 4.6) описує процес обробки сигналу за допомогою амплітудно-фазового методу для визначення товщини ОК. Алгоритм починається з етапів ініціалізації (блоки 1, 2), де відбувається імпортування сигналу з осцилографа на ПК та в програмне забезпечення, та запис його довжини в змінну N, після чого виводиться графік початкового сигналу (блок 3).

Наступний крок це визначення Гільберт образу (блок 4) та встановлення вихідної послідовності без постійної складової (блок 5), які використовуються для обрахунку фазової характеристики (блок 6) та обвідної (блок 7) після чого розраховується закон фази сигналу носія (блок 8) та виводиться графік який включає в себе: сигнал, Гільберт образ та обвідну (блок 9) [22, 23].

Задля аналізу сигналу ініціалізується апертурне ковзне вікно (блок 10) та за розпочинається цикл (блок 11) для розрахунку r-статистик. Перший крок циклу це обчислення різниці фазових характеристик (блок 12), далі визначення нормалізованої обвідної (блок 13) та визначення комплексного числа (блок 14), яке використовується для розрахунку r-статистики (блок 15), після чого r-статистики фільтрується медіанним фільтром (блок 16). Після закінчення циклу, виводиться графік відфільтрованої r-статистики (блок 17), яка надалі буде використана для визначення товщини ОК [24].

Задля вимірювання часових затримок між донними імпульсами які потрібні для вимірювання товщини ОК, використовується метод перетину порогового рівня, який встановлюється на 40% від максимального значення r-статистики (блок 18). Спочатку знаходяться індекси де перевищується пороговий рівень (блок 19) та визначаються унікальні початкові точки де імпульс починає підсилюватись (блок 20). Для більш стабільного визначення часового інтервалу, замість першого та другого імпульсів, використовують другий та третій імпульс, індекси яких визначаються (блок 21) після чого обраховуються часові інтервали між другим та третім імпульсами (блок 22) [25, 26]. В кінці, ці часові затримки використовуються для визначення

товщини ОК (блок 23), та виводяться в консоль разом з обрахованою товщиною ОК (блок 24) після чого алгоритм закінчує свою роботу (блок 25).

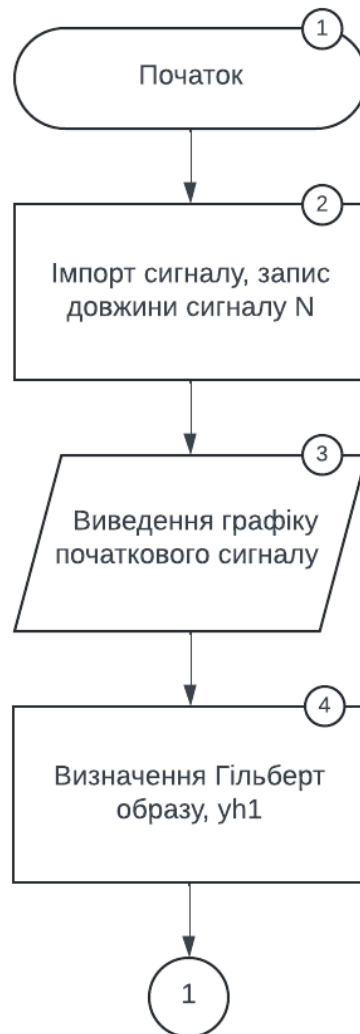


Рис. 4.3 Блок-схема алгоритму обробки сигналу (Частина 1)

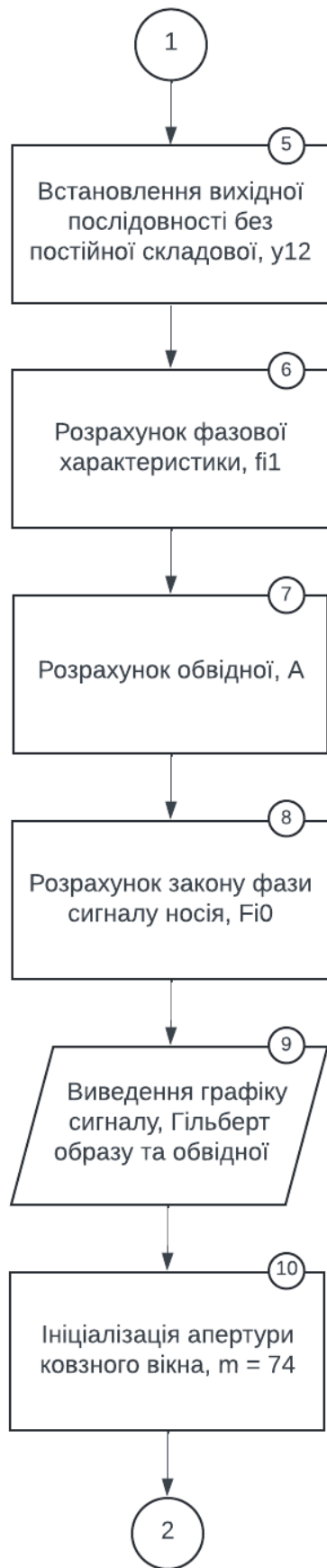


Рис. 4.4 Блок-схема алгоритму обробки сигналу (Частина 2)

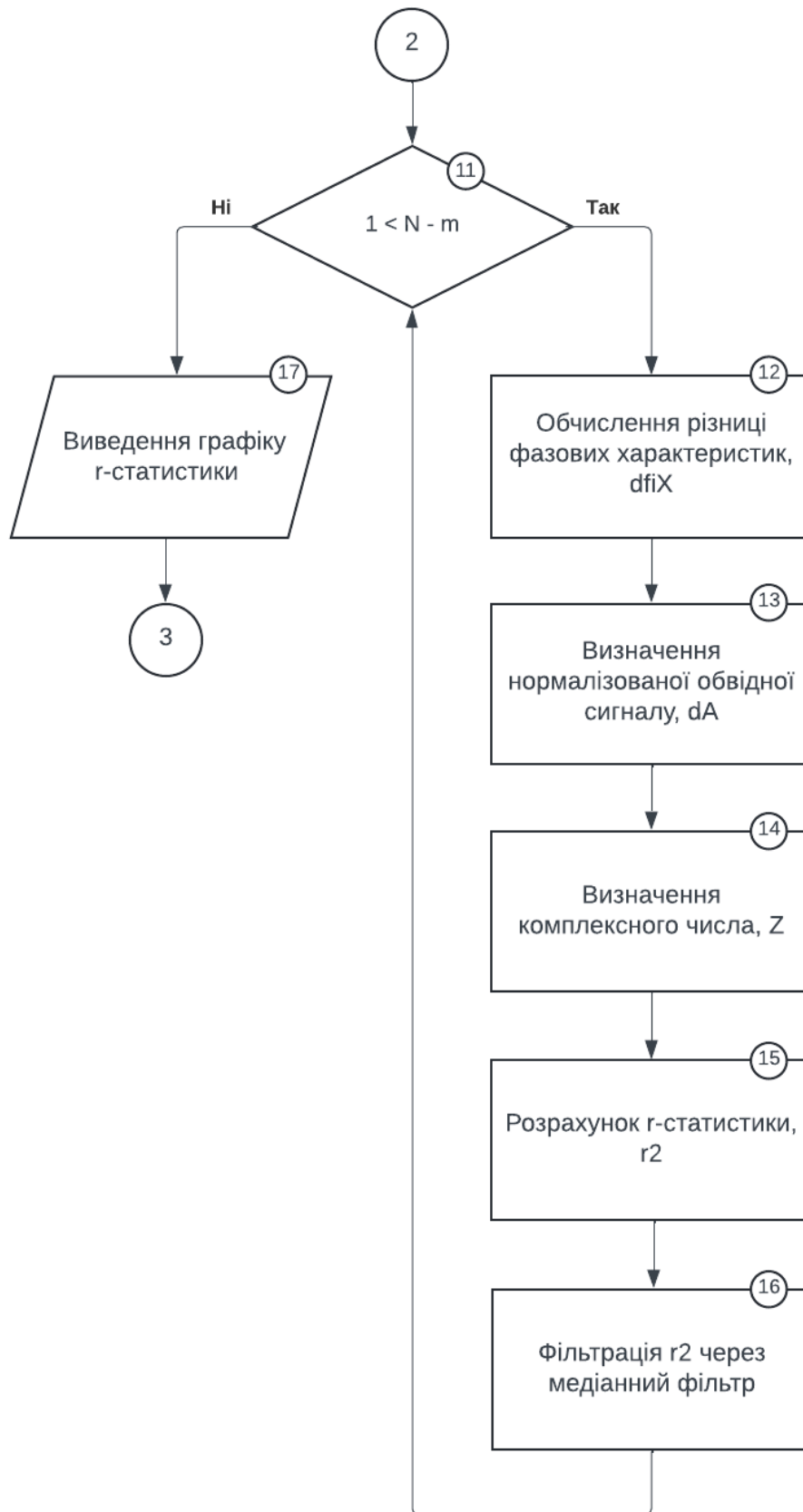


Рис. 4.5 Блок-схема алгоритму обробки сигналу (Частина 3)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

53

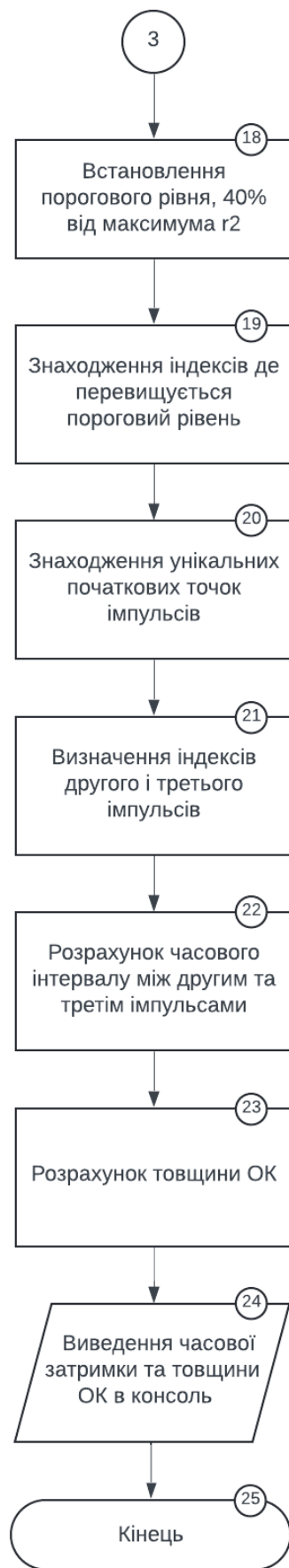


Рис. 4.6 Блок-схема алгоритму обробки сигналу (Частина 4)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 0105.00.00.0000

Арк.

54

4.2 Експериментальні дослідження амплітудно-фазового методу виявлення сигналів УЗТ

Задля проведення експерименту по програмній обробці сигналу, за допомогою програмного забезпечення Matlab, знятого з ОК зробленого із зразка алюмінію та експортованого з осцилографа, було використано такі прилади, зображені на рисунках 4.7 та 4.8:

- Двоканальний цифровий DDS генератор сигналів 200 MSa/s 12-bit MHS-5200A. Цей генератор забезпечує високу точність і стабільність генерованих сигналів, що є критично важливим для експериментів з ультразвуковими сигналами.
- Осцилограф Owon XDS3062A 12-bit 60MHz 1GSa/s. Цей осцилограф дозволяє з високою роздільною здатністю записувати сигнали, що забезпечує точність подальшої обробки та аналізу. Його висока частота дискретизації гарантує детальний запис швидкоплинних сигналів.
- П'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) P111-2.5-K12-003. Цей перетворювач використовується для генерації і прийому ультразвукових хвиль.

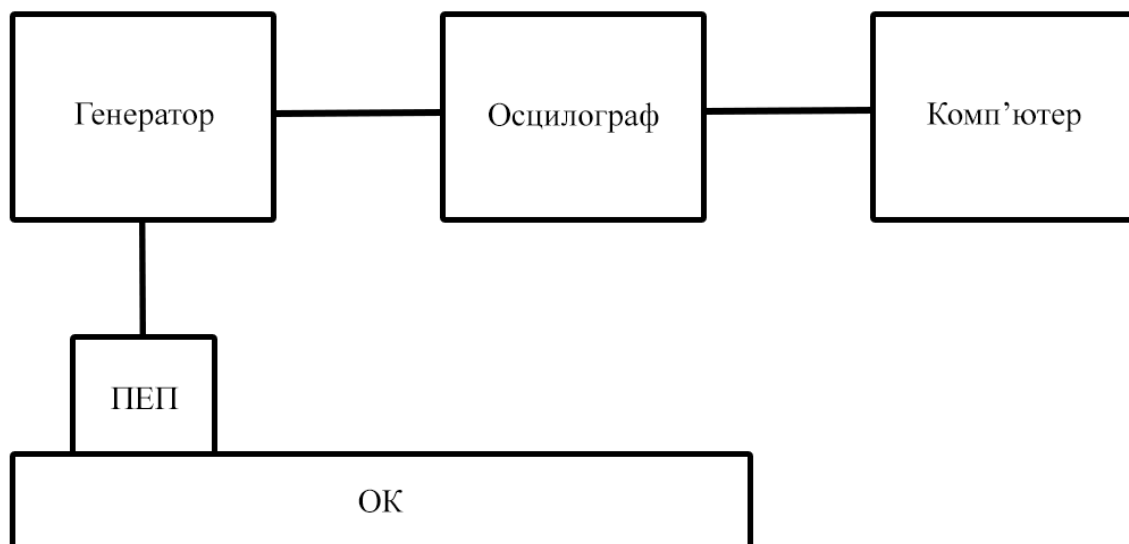


Рис. 4.7 Схема експериментальної установки з об'єктом контролю

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

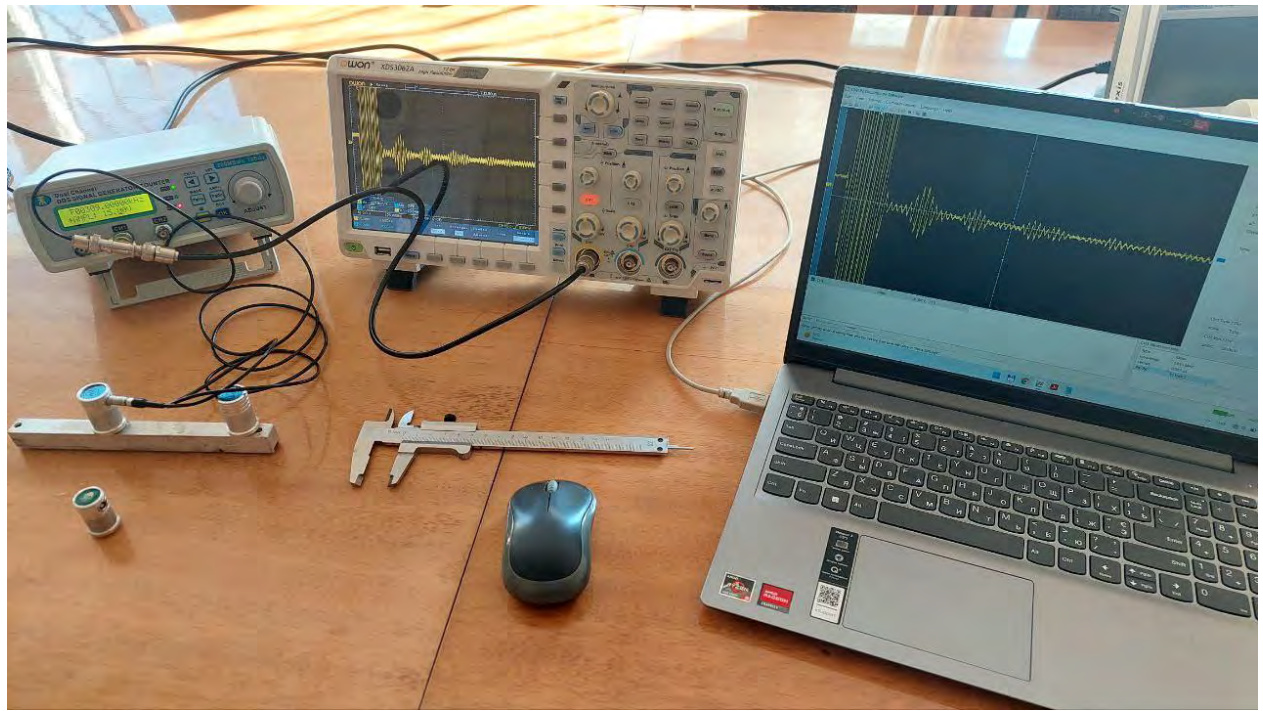


Рис. 4.8 Зображення робочої установки

Під час експериментальних досліджень було проведено 34 виміри, і всі вони були експортовані з осцилографа на комп'ютер для подальшого аналізу та обробки. Кожен вимір включав в себе детальну інформацію про параметри сигналів, що дозволило ретельно проаналізувати їх характеристики. За основу дослідження було взято 33-й виявлений сигнал, який виявився найбільш показовим для даного експерименту.

Результати обробки 33-го сигналу показано на рисунку 4.9. Цей сигнал було вибрано через його стабільні параметри і чіткі характеристики, що робить його ідеальним прикладом для демонстрації ефективності застосованих методів обробки. Обробка включала використання амплітудно-фазового методу виявлення сигналів у середовищі Matlab, що дозволило точно визначити фазові характеристики сигналу.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

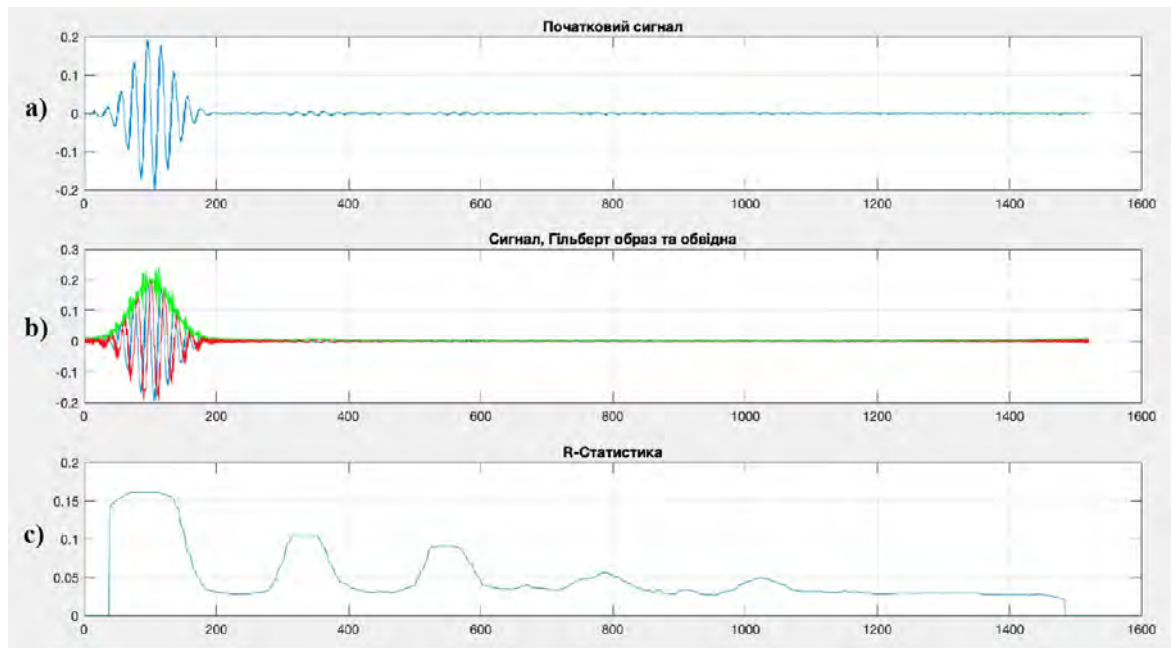


Рис. 4.9 Графічне представлення результатів обробки сигналу

Результат обробки сигналу удосконаленим амплітудно-фазовим методом чітко показав свою ефективність роботи при наявності великих шумів. Графік а на рисунку 4.9 ілюструє аналізований сигнал, на ньому чітко видно лише перший імпульс, і малу частину другого, графік б показує сигнал, Гільберт-образ та обвідну, графік с ілюструє зважену R-статистику за якою визначається часовий інтервал між донними імпульсами та який показує наглядну ефективність амплітудно-фазового методу виявлення донних імпульсів.

Знаходження похибок вимірювання товщини

Будь які вимірювання супроводжуються похибками які можуть бути спричинені великою кількістю факторів які впливають на дослідження. В УЗТ найбільш важливими є похибки: швидкості ультразвуку, вимірювання часових інтервалів та власне вимірюної товщини ОК. Відносну похибку вимірювання у загальному вигляді можна визначити за такою формулою:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta \tau}{\tau} \quad (4.1)$$

де Δh , Δc , $\Delta \tau$ – абсолютні похибки вимірювань товщини ОК, швидкості поширення ультразвукового сигналу та похибка вимірювального інтервалу відповідно.

В даній роботі для вимірювання часу затримок імпульсів було використано метод порогово рівня. Задля зменшення похибки при такому методі вимірювань, самі вимірювання проводять за першим або другим періодом радіоімпульсів та на однаковому пороговому рівні. Використовуючи відомі дані про швидкість поширення сигналу в ОК та виміряну затримку на поширення ультразвукового коливання в ОК, відносна похибка визначення товщини зразка склала:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{6290 - 6270}{6280} + \frac{0.02 * 10^{-6}}{4.12 * 10^{-6}} = 0.0056$$

або у процентах – 0,56%. Вимірювання виконувались за відношення сигнал/шум ~ 2 .

Висновки до розділу 4

В даному розділі було описано алгоритм обробки амплітудно-фазового методу виявлення сигналів в УЗТ, та за допомогою цього методу, а саме його алгоритму, було оброблено модельний сигнал та сигнал експортований з осцилографа який використовувався для експериментальних досліджень по виявленню і обробці сигналів УЗТ. Алгоритм аналізу донних сигналів було реалізовано в програмному середовищі Matlab, для чого було створено блок-схему яка пояснює сутність і послідовність алгоритму, а потім створено код який реалізує цей самий алгоритм.

Для наглядного зображення ефективності амплітудно-фазового методу аналізу сигналів було використано і оброблено два сигнали –

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модельний та сигнал взятий експериментальним шляхом. Результати в обох випадках були чітко зрозумілі, R-статистики яка використовується як основа амплітудно-фазового методу в обох випадках чітко вказувала на донні сигнали в той час коли не оброблений сигнал не міг показати ніякої подібної точності і ефективності.

В кінці розділу, знаючи всі необхідні дані та методи підходу до вимірювань, задля перевірки точності оброблення сигналу за допомогою алгоритму амплітудно-фазового методу та експериментальних вимірювань, було розраховано похибки вимірювання товщини ОК.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						59
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

Під час виконання бакалаврського дипломного проєкту було проведено дослідження амплітудно-фазового методу луна-імпульсної УЗТ.

Перший розділ присвячений принципам роботи ультразвукових товщиномірів, їх характеристикам, сферам застосування, матеріалам об'єктів контролю та було наведено моделі ультразвукових товщиномірів. Вивчивши хвильову природу ультразвуку було виділено луна-імпульсний метод товщинометрії через його ефективність та простоту. На рисунку 1.2 представлено узагальнену структурну схему луна-імпульсного товщиноміра, який було взято за основу приладу для подальших досліджень. В процесі пошуку моделей товщиномірів, стало зрозуміло що в Україні ця сфера не стоїть на місці, а такі компанії як «Novotest» мають дуже широкий асортимент продукції та постійно вдосконалюють свої технології. Матеріали для УЗТ не обмежуються авіаційними сплавами, УЗТ використовується навіть в медицині, але для даних досліджень було обрано ОК з алюмінієвого сплаву В-95 який часто використовують в авіації.

Другий розділ представляє собою розрахунок електроакустичного тракту для донних імпульсів під час УЗНК. Було обрано ПЕП для проведення досліджень, складено структуру акустичного тракту, вказано на характеристики матеріалів всіх його частин, та за допомогою цих даних розраховано границю ближньої зони ПЕП, коефіцієнти послаблення акустичного тракту для послідовних імпульсів та електричну ємність ПЕП. Після обрахунків було розроблено амплітудно-фазовий метод виявлення донних імпульсів та представлено алгоритм його роботи.

Третій розділ присвячено огляду перетворення Гільберта, його призначенні та перевагам в обробці сигналів. Перетворення Гільберта перетворює сигнал у комплексний аналітичний сигнал, що дає змогу аналізувати амплітудно-частотні характеристики. Далі розроблено

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вдосконалений амплітудно-фазовий метод виявлення донних імпульсів який підвищує точність виявлення цих самих імпульсів. Після чого, було ілюстративно показано ефективність вдосконаленого методу в порівнянні зі звичайним.

Останній, четвертий розділ дипломного проєкту сфокусований на застосуванні амплітудно-фазового методу виявлення донних імпульсів для модельного та експериментального сигналів. За допомогою програмного забезпечення matlab було розроблено код алгоритму обробки сигналів, наведено його пояснення у вигляді блок-схем. Було наведено схеми робочої установки та електрично-структурну схему чотириканального ультразвукового товщиноміра. Після чого проведено експериментальні дослідження, ілюстровано результати цього дослідження та вираховано похибку визначення товщини зразка ОК.

Результатом виконання бакалаврського дипломного проєкту було розроблення чотириканального ультразвукового товщиноміра та середовища для повноцінного застосування амплітудно-фазового методу виявлення донних імпульсів, а також наглядної ілюстрації ефективності цього методу в порівнянні зі звичайними метода виявлення донних імпульсів.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 6, Electromagnetic Testing
2. Галаган Р.М. «Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю»: підручник / Р.М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.
3. М.О. Карпаш, Т.Т. Котурбаш «Оцінка втрат енергії акустичних коливань за ультразвукового контролю в середовищі природного газу»
4. Цапенко В.К. «Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник» / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. –К:
5. О.М. Карпаш, П.Я. Криничний, М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький «Огляд методів та засобів контролю корозійних пошкоджень трубопроводів»
6. І.В. Рибіцький «Контроль корозійних втрат металу неруйнівними методами»
7. Методичні вказівки «Для підготовки курсових робіт з дисципліни «Цільова підготовка (автоматизовані системи контролю і діагностики у будівельному виробництві)»
8. Е.Д. Близнюк «Підвищення достовірності виявлення сигналів ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії за їх значного загасання» / Ю.В. Куц, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник
9. С.Р. Михайлов Конспект лекцій «Електронні системи контролю якості та діагностики»
10. Савойський О. Ю. «П'єзоелектричні перетворювачі в ультразвуковій технології»
11. Богдан Г. А. Застосування дискретного ортогонального методу вимірювання фази для визначення характеристик матеріалів ультразвуковим методом / Г. А. Богдан, А. Г. Протасов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». Серія Технічні науки. – 2016. – вип. 2. – pp. 87-93.

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Bogdan G. Development of discrete orthogonal method for determining the phase shift between high-frequency radio impulse signals / G. Bogdan, V. Bazhenov, A. Protasov // IEEE Xplore 19.10.2017 (Microwaveaves, radar and remote sensing Symposium (MRRS) 29-31 Aug.2017.IEEE). – 2017. – pp.191-194.

13. С.Р. Ігнатович «Моніторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів» / М.В. Карускевич, О.М. Карускевич, С.В. Хижняк, С.А. Якушенко

14. Стаття «Алюмінієвий коло В95: міцність» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://firma-tera.com.ua/ua/a411814-alyuminievyyj-krug-v95.html>

15. Стаття «Дослідження магнітострикційного методу ультразвукової дефектоскопії енергетичного обладнання» / Богачев І.В., Ковтун С.І., Куц Ю.В., Созонов С.В., Хайдуров В.В.

16. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю : Навчальний посібник / С. М. Маєвський ; – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 288 с.

17. «Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумовеого контролю» / Ю.В. Куц, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Е. Левченко

18. Баженов В. Г. Цифровая система измерения фазовых сдвигов радиоимпульсных сигналов» / В. Г. Баженов, Г. А. Богдан, М. В. Кравченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №4 (46), часть 2. – С.

19. Куц Ю.В. Застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумівій дефектокопії / М.О. Редька, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №1, стор. 45-53.

20. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

21. Куц, Ю. В. Новітні системи та технології. Частина І. Загальні питання побудови та опрацювання даних в комп'ютерно-інтегрованих системах НКТД

					ПК 0105.00.00.0000	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с

22. Галаган Р.М. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

23. Єременко В.С. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою / В.С. Єременко, Р.М. Галаган // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Одеса. – 2012. – № 06 (82). – С. 39-45.

24. В. Малько, Ю. . Куц, Ю. . Лисенко, і Л. Щербак, «Метод ультразвукової фазової двокоординатної реєстрації інформації для систем автоматизованого неруйнівного контролю», Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak., вип. 65(1), с. 88–95.

25. Куц Ю.В. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, Лисенко Ю.Ю., Редька М.О. // Патент України на корисну модель № 136624. G01B17/00 (2006.01). – u201902545; Заявлено 15.03.2019; Опубл.27.08.2019, Бюл. № 16. – 4с

26. Застосування кругових статистик для виявлення сигналу ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, М.О. Редька, О.Д. Близнюк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2018. — № 2. — С. 32-36.

					<i>ПК 0105.00.00.0000</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		