

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
приладобудівний факультет
кафедра приладів і систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ А.Г. Протасов
« ____ » _____ 2019 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності
151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
на тему: «Автоматизована система ультразвукової товщинометрії
виробів із конструкційних матеріалів»**

Виконав (-ла):
студент (-ка) II курсу, групи ПК-81мп
Мороз Наталія Валеріївна _____

Науковий керівник:
Професор кафедри ПСНК, доктор технічних наук,
професор, Куц Ю.В. _____

Консультант з стартап-проекту:
Доцент кафедри менеджменту, д.е.н., доцент,
Бояринова К.О. _____

Рецензент:
Завідувач кафедри ІВТ, доктор технічних наук,
професор, Єременко В.С. _____

Консультант з розробка електричних трактів:
Доцент, кандидат технічних наук
Баженов В.Г. _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2019 року

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

Приладобудівний факультет

Прилади і системи неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою
Спеціальність (спеціалізація) – 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» («Комп'ютерно інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.Г. Протасов

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Мороз Наталії Валеріївни

1. Тема дисертації «Автоматизована система ультразвукової товщинометрії виробів із конструкційних матеріалів», науковий керівник дисертації Куц Юрій Васильови, професор кафедри ПСНК, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації 13 грудня 2019 р.
3. Об'єкт дослідження – процес визначення товщини виробів, виготовлених з матеріалів зі значним коефіцієнтом загасання ультразвукових коливань луна-імпульсним методом.
4. Вихідні данні: листовий матеріал; швидкість поширення поздовжньої ультразвукової хвилі в діапазоні 2-10 км/с; коефіцієнт згасання в діапазоні 1..0 Нп/м; мінімальна товщина 2 мм; односторонній доступ до ОК; особливі умови: відношення сигнал/шум – більше 1.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розробити програмно-алгоритмічні засоби реалізації опрацювання сигналів УЗТ, що ґрунтуються на отриманні та аналізі г-статистики в ковзному полівіконному режимі; отримання результатів моделювання процесів виявлення сигналів УЗТ та оцінювання часових інтервалів між відлуннями; оцінювання ефективності виявлення сигналів товщинометрії та точності вимірювання часових інтервалів між відлуннями запропонованим методом статистичної фазової ультразвукової товщинометрії.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: три плакати.

7. Орієнтовний перелік публікацій: одна стаття.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Бояринова К. О., д.е.н., доц.		
Розроблення схеми електриної принципової	Баженов В. Г., к.т.н., доц.		

9. Дата видачі завдання 01 жовтня 2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз обраного напрямку, дослідження існуючих публікацій	01.10.2018	
2	Виявлення можливих актуальних напрямів роботи згідно обраної теми	30.01.2019	
3	Аналітичного огляду згідно обраної теми і ОК на предмет його характеристик для проведення контролю.	10.02.2019	
4	Аналіз та вибір методу для отримання корисних сигналів в системі	01.03.2019	
5	Дослідження дискретного перетворення Гільберта	20.04.2019	
6	Моделювання методу виявлення корисної складової зашумленого сигналу ультразвукової товщинометрії	15.05.2019	
7	Розробка креслення алгоритму та функціональної схеми	20.09.2019	
8	Розроблення принципів схем окремих вузлів системи.	15.10.2019	
9	Аналіз підходящих теоретичних засад для розрахунку похибки контролю.	01.11.2019	
10	Розробка креслення алгоритму та функціональної схеми	20.11.2019	
11	Розроблення стартап-проекту	25.11.2019	
12	Оформлення роботи та плакатів	09.12.2019	

Студент

Мороз Н. В.

Науковий керівник дисертації

Куц Ю. В.

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Реферат

Магістерська дисертація містить 93 листів, 20 рисунків, 28 таблиць, 19 джерел за переліком посилань, 4 додатки.

Актуальність теми.

Технологічний розвиток став приводом для вдосконалення традиційних природних конструкційних матеріалів та появи нових. Такі галузі як машинобудування, металургія, автомобілебудування, авіаційна промисловість та ін. потребують виробництва якісної продукції яка має відповідати високим стандартам якості. Кожен з матеріалів має певні фізико-механічні характеристики, що впливають на контроль виробів з конструкційних матеріалів. Зокрема, в ультразвуковому неруйнівному контролі така характеристика, як згасання ультразвукової хвилі суттєво впливає на метрологічні характеристики вимірювань та контролю. Саме тому актуальною задачею є розроблення нових методів дослідження.

Товщина об'єктів контролю є важливим показником, що в першу чергу вказує на міцність виробу в подальшому процесі його експлуатації. Забезпечення контролю товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ґрунтується на розвитку методів прецизійного визначення часу поширення ультразвукових сигналів в об'єктах контролю.

Задачею даної роботи є удосконалені методу ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням за рахунок використання методів статистичного оброблення результатів фазових вимірювань сигналів ультразвукової товщинометрії, що дає змогу підвищити вірогідність контролю і точність вимірювання товщини.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення точності визначення товщини об'єктів контролю, що виготовлені з матеріалів зі значним коефіцієнтом загасання. В основі методу покладено використання статистичного оброблення фазових характеристик сигналів ультразвукової товщинометрії, які уявляють собою імпульси з гармонічним сигналом-носієм.

Для досягнення мети були поставлені та розв'язані наступні задачі:

- 1) Розроблення методології опрацювання сигналів ультразвукової товщинометрії, яка включає метод, алгоритм і програмне забезпечення.
- 2) Моделювання процесів опрацювання інформації в системах статистичної фазової ультразвукової товщинометрії і обґрунтування кругових статистик для виявлення сигналів товщинометрії за низького відношення сигнал/шум.
- 3) Проведення модельних експериментів процесу виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії розробленим методом статистичної фазометрії за отриманою в ковзному режимі r -статистикою.
- 4) Оцінювання ефективності виявлення сигналів товщинометрії та точності вимірювання часових інтервалів між відлуннями запропонованим методом статистичної фазової ультразвукової товщинометрії у виробках з матеріалів зі значним загасанням ультразвуку.

Об'єкт дослідження – процес визначення товщини виробів, виготовлених з матеріалів зі значним коефіцієнтом загасання ультразвукових коливань луна-імпульсним методом.

Предмет дослідження – метод та програмні засоби статистичної фазової ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукової хвилі.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: теоретичних основ ультразвукового неруйнівного контролю та основі положень матеріалознавства в частині теорії конструкційних матеріалів; математичної статистики та теорії ймовірності випадкових фазових зсувів сигналів; методи цифрової обробки сигналів; теорії сигналів та кіл; методів комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Запропоновано спосіб визначення часових інтервалів між луна-сигналами за їх r -статистикою, отриманою в полівіконному ковзному режимі, що дає змогу виконувати вимірювання за відношенням сигнал/шум більше 1.

2. Виконано дослідження впливу розміру апертури вікон та їх кількості на відношення сигнал/шум вигідного сигналу фазових виявлячів сигналів УЗТ, що дає змогу обґрунтовувати ці параметри для різних сигналів УЗТ і параметрів збору інформації.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено програмно-алгоритмічні засоби реалізації запропонованого способу опрацювання сигналів УЗТ, які ґрунтуються на отриманні та аналізі r -статистики в ковзному полівіконному режимі опрацювання фазових характеристик цих сигналів.

2. Отримані результати моделювання процесів виявлення сигналів УЗТ та оцінювання часових інтервалів між відлуннями можуть бути використані під час проектування нових ефективних засобів ультразвукової луно-імпульсної товщинометрії.

3. Розроблене програмне статистичне забезпечення може бути використано в задачах УЗТ.

Ключові слова

Ультразвукова товщинометрія, фазові методи обробки сигналів, метод статистичної фазової ультразвукової товщинометрії, віконне опрацювання сигналів, кругові статистики.

Abstract

The master's thesis contains 93 letters, 20 drawings, 28 tables, 19 sources in the list of references, 4 applications.

Topicality of research

Technological development has led to the improvement of traditional natural structural materials and the emergence of new ones. Industries such as mechanical engineering, metallurgy, automotive, aviation, etc. require the production of quality products that must meet high quality standards. Each of the materials has certain physical and mechanical characteristics that affect the control of products made of structural materials. In particular, in ultrasonic nondestructive testing, such a characteristic as the attenuation of the ultrasonic wave significantly affects the metrological characteristics of the measurements and controls. That is why the urgent task is to develop new research methods.

The thickness of the control objects is an important indicator, which primarily indicates the strength of the product in the further process of its operation. Ensuring the control of the thickness of products made of materials with high attenuation is based on the development of methods for precise determination of the time of propagation of ultrasonic signals in the objects of control.

The objective of this work is to improve the method of ultrasonic thickness measurement of products with material damping due to the use of methods of statistical processing of the results of phase measurements of signals of ultrasonic thickness measurement, which makes it possible to increase the reliability of control and accuracy of measurement of thickness.

Purpose and tasks of research

The purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to improve the accuracy of determining the thickness of control objects made of materials with a high damping ratio. The method is based on the use of statistical processing of the phase characteristics of the ultrasonic thicknessmeter signals, which are pulses with a harmonic signal carrier.

To achieve this goal, the following **tasks**:

1) Development of a methodology for processing ultrasonic thickness gauges, which includes method, algorithm and software.

2) Simulation of information processing processes in systems of statistical phase ultrasonic thicknessmeter and justification of circular statistics for detection of thicknessmeter signals at low signal-to-noise ratio.

3) Carrying out model experiments of the process of detection of ultrasonic thickness meters developed by the method of statistical phasometry with the r-statistics obtained in a sliding mode.

4) Evaluation of the efficiency of detection of the thicknessmeter signals and the accuracy of measuring the time intervals between echoes proposed by the method of statistical phase ultrasonic thicknessmetry in products with materials with significant damping of ultrasound.

Object of research – process of determining the thickness of products made of materials with a significant damping effect of ultrasonic oscillations by the moon-pulse method.

Subject of research – method and software for statistical phase ultrasonic thickness measurement of products with materials with significant damping of the ultrasonic wave.

Methods of research: theoretical bases of ultrasonic nondestructive testing and based on the provisions of material science in the part of the theory of structural materials; mathematical statistics and probability theory of random phase shifts; methods of digital signal processing; signal and circuit theory; computer simulation methods.

Scientific novelty of research:

1. A method of determining the time intervals between echoes based on their r-statistics obtained in multi-window sliding mode is proposed, which allows measurement of signal-to-noise ratio greater than 1.

2. The effect of window aperture size and their number on the signal / noise ratio of the beneficial signal of the phase detectors of the UZT signals was

investigated, which makes it possible to substantiate these parameters for different UZT signals and information collection parameters.

Practical value dissertation results:

1. Software and algorithmic tools for the implementation of the proposed method of processing UST signals are developed, which are based on the receipt and analysis of r-statistics in the sliding polywindow mode of processing the phase characteristics of these signals.

2. The obtained results of modeling of processes of detection of signals of the UST and estimation of time intervals between echoes can be used for the design of new effective means of ultrasonic lunar-pulse thicknessometry.

3. The developed software statistics can be used in the tasks of UZT.

Key words

Ultrasonic thicknessmeter, phase signal processing methods, statistical method of ultrasonic phase thickness measurement, window signal processing, circular statistics.

Зміст

Перелік умовних позначень	12
ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1	14
АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЛУНО-ІМПУЛЬСНОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	14
1.1. Види конструкційних матеріалів, як об'єктів ультразвукової товщинометрії.....	14
1.1.1. Класифікація конструкційних матеріалів.....	15
1.1.2. Використання та актуальність контролю певних КМ.....	19
1.2. Стислі теоретичні відомості про УЗТ	23
1.2.1. Основні положення луна-імпульсного методу ультразвукової товщинометрії.....	25
1.2.2. Методика розрахунку акустичного та електричного трактів для луно- імпульсного методу дослідження ОК	28
Розрахунок електроакустичного тракту	36
1.3. Автоматизація системи УЗТ	38
1.4. Висновки до розділу	43
РОЗДІЛ 2	44
МЕТОДОЛОГІЯ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ФАЗОВОЇ ЛУНО- ІМПУЛЬСНОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ	44
2.1. Структура опрацювання сигналів за луно-імпульсним методом УЗТ	44
2.2. Дискретне перетворення Гільберта, як результат опрацювання сигналів 45	
2.3. Огляд кутових статистик для використання УЗТ.....	48
2.3.1. Обґрунтування використання кутових статистичних характеристик для аналізу сигналів ультразвукової товщинометрії.....	48
2.4. Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 3	52
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛУ	52
3.1. Загальна методика моделювання.....	52
3.2. Підготовка даних для моделювання	53
3.3. Моделювання процесу отримання r -статистики за результатами аналізу ФХС у ковзному режимі.....	59
3.4. Висновки до розділу	61
РОЗДІЛ 4.....	63

4.1. Обґрунтування елементної бази для реалізації вимірювального підсилення.....	63
4.2. Обґрунтування вибору АЦП.....	65
4.3. Обґрунтування елементної бази для реалізації блоку управління.....	67
4.4. Висновки до розділу	68
РОЗДІЛ 5	69
АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ.....	69
5.1. Теоретичні засади розрахунку	69
5.2. Приклад розрахунку похибки вимірювання товщини ОК з матеріалу зі значним згасанням	71
5.3. Висновки до розділу	73
РОЗДІЛ 6	74
6.1. Опис ідеї проекту	74
6.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	76
6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	77
6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	84
6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	86
6.6. Висновки до розділу	89
ВИСНОВКИ.....	90

Перелік умовних позначень

АХС – амплітудна характеристика сигналів;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ЕАТ – електроакустичний тракт;

ДПГ – дискретне перетворення Гільберта;

КМ – конструкційні матеріали;

НК – неруйнівний контроль;

ОК – об'єкт контролю;

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;

с/ш – сигнал/шум;

УЗТ – ультразвукова товщинометрія;

УФ – узгоджений фільтр;

ПГ – перетворення Гільберта;

ПК – персональний комп'ютер;

СКВ – середнє квадратичне відхилення;

ФХС – фазова характеристика сигналів.

ВСТУП

У загальному розумінні в промисловому виробництві будь-які деталі та конструкції виготовляють з конструкційних матеріалів. Більшість з цих об'єктів потребують контролю та діагностики на різноманітних етапах виробництва та експлуатації.

Неруйнівний контроль налічує різні методи дослідження, які відрізняються за фізичними основами або процесами, що дозволяє здійснювати контроль властивостей і параметрів об'єкта. Для виробів з конструкційних матеріалів широкого використання набув ультразвуковий метод контролю. Аля як і кожний із відомих видів НК, даний метод має різноманітні впливи, що впливають на точність контролю. Для підвищення цього показника необхідно зосередитися на способі обробки сигналів УЗ.

Конструкційні матеріали мають різну фізичну та хімічну будову, частина з них набуває значного згасання ультразвукових хвиль. Це суттєво впливає на результат контролю, адже властивості матеріалу зменшують можливість виділення інформативного сигналу на фоні завад.

В першому розділі розглянуто види КМ. Особливу увагу зосереджено на конструкціях, які виконані з матеріалів, що мають високий рівень згасання ультразвукових хвиль. Проведено пошук автоматизованих систем для задач УЗТ.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЛУНО-ІМПУЛЬСНОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Види конструкційних матеріалів, як об'єктів ультразвукової товщинометрії.

Кожен із конструкційних матеріалів має свої властивості. Частина з них має високі показники точності при контролі УЗ методами, до прикладу більшість металів. Але у виробництві використовуються велика кількість матеріалів, що поступаються точності результатам УЗК, та потребують пошуків удосконалення.

Промислова революція вісімнадцятого століття і подальший розвиток техніки, призвів до потреби у створенні нових матеріалів для підвищенні якості виробів. Значного розвитку зазнали галузі машинобудування, літакобудування, військова та медицина. Для багатьох областей техніки є необхідними конструкційні матеріали, що поєднують конструкційну міцність з високими електричними, теплозахисними, оптичними та іншими властивостями.

Матеріал можна назвати конструктивним, якщо він відповідає комплекту певних властивостей – це фізичні, хімічні, механічні, технологічні та експлуатаційні [1].

До перших відносять такі характеристики, як густина, температура плавлення, електро- теплопровідність, магнітна проникність, коефіцієнт лінійного та об'ємного розширення. Структура матеріалу залежить від фізичної характеристики матеріали. Хімічні властивості зумовлені здатністю до хімічної взаємодії з різноманітними середовищами, хімічна активність, антикорозійні властивості.

Механічні властивості матеріалів є сукупністю показників, що визначають опір матеріалу, здатність до деформації, а також особливості

поводження при руйнуванні. Опір деформації зумовлений – міцністю та твердістю матеріалу, опір до руйнування – пластичністю та в'язкістю.

Технологічні властивості КМ – це комплекс фізико-хімічних властивостей, що зумовлені станом, складом та структурою матеріалів при взаємодії з технологічним середовищем, у процесі їх обробки [2]. До основних технологічних властивостей відносять терміну обробку, ливарі властивості, піддатливість до обробки тиском та різання, здатність утворювати нероз'ємне зварне з'єднання при зварюванні. Перелічені властивості на рівні з механічними є основними чинниками, які визначають виріб матеріалу.

Експлуатаційні властивості зумовлені поведінкою матеріалу у певних умовах його експлуатації. До таких властивостей відносять – жаро-жароміцність, зносостійкість та корозійну стійкість [3-5].

У загальному розумінні конструкційні матеріали — це матеріали, з яких виготовляють деталі конструкцій (машин та споруд), що зазнають силових впливів (навантажень). Визначальними характеристиками конструкційних матеріалів є їх механічні властивості, що і вирізняє їх від інших технічних матеріалів (оптичних, ізоляційних, змашувальних, лакофарбових, абразивних тощо).

1.1.1. Класифікація конструкційних матеріалів

Конструктивні матеріали широке поняття, що налічують безліч різновидів. Задля вибору певного виду матеріалу к об'єкта контролю, необхідно провести аналіз та класифікацію. В даний час розроблений і знаходить застосування широкий спектр конструкційних матеріалів, що володіють тією чи іншою сукупністю властивостей.

Ознайомимося з використовуваними в різних галузях виробництва основними матеріалами та їх характеристиками. Прийнята в машинобудуванні класифікація конструкційних матеріалів наведена на схемі (рис. 1.1).



Рис.1.1 – Класифікація конструкційних матеріалів за природою походження

Як зображено на схемі 1.1 є три основних класифікаційних поділи за природою походження, це металеві, неметалеві та композитні матеріали. До перших відносять метали та сплави.

Метали – це прості речовини кристалічної будови, що відповідають певним властивостям: є непрозорими, мають металевий блиск, високу електро- і теплопровідність, міцність, більшість із них пластична, їх можна обробляти в холодному й гарячому стані різанням, тиском і зварюванням. *Сплави* — це складні за вмістом речовини, утворені з кількох металів і неметалів унаслідок дифузії, тобто взаємного проникнення частинок [3].

У техніці рідко зустрічається застосування чистих металів. Майже в всі метали, що використовуються, спеціально вводять домішки. Метали та її сплави поділяються на чорні та кольорові, це залежить від основного компонента складу.

Більшість методів НК широко застосовуються для контролю виробів з металу. Так як метали та сплави залишаються основними матеріалами у виробничій галузі. Успішний розвиток знаходження дефектів та відповідності до всіх технологічних характеристикам зазнав ультразвуковий контролю. Це

пов'язано з кристалічною будовою матеріалу. Більшість металів мають однорідну, малозернисту структуру, що дозволяє проводити контроль з високою точністю. Одним із важливих показників, що дозволяє проводити контроль за допомогою УЗ-методу – це швидкість поширення.

Метали мають досить високу швидкість поширення поздовжніх ультразвукових хвиль. Більшості конструкційних металів мають швидкість поширення в межах 5000-6000 м/с. Тоді, як майже всі тверді тіла перебувають в межах 2000-6000 м/с.

До неметалевих матеріалів відносять деревину, пластмаси, гуму, ебонітові, графітові, абразивні, лакофарбові та клеючі матеріали, шкіру, азбест, скло, кераміку, фарфор, повсть, мармур, текстильні, паперові, змащувальні й інші матеріали.

Композиційно-шарові матеріали — це поєднання неметалевих матеріалів із металевими або будь-якими з іншим каркасом для надання їм необхідних фізико-механічних властивостей (надтвердості, високотемпературності), тобто композиційними матеріалами називають композиції, складові яких мають різні властивості і нерозчинні або малорозчинні одне в одному [3].

Для неметалевих та композитних матеріалів характерним є значне загасання ультразвукових хвиль, що ускладнює їх контроль цими хвилями. Цей показник значно впливає на результат проведення контролю.

Загасання є показником зменшення енергії ультразвукових хвиль після їх поширенні в середовищі [6]. Збільшення відстані від джерела, що випромінює призводить до зменшення інтенсивності ультразвуку. Даний ефект спостерігається за наявності наступних явищ в середовищі: дифракції хвиль, розсіювання та поглинання хвиль, проходження ультразвуку через зв'язуючу речовину і втрати, пов'язані з шорсткістю поверхні об'єкту контролю (ОК) [4]. Коефіцієнт загасання α_3 визначається як:

$$\alpha_3 = \frac{1}{2h} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right), \quad (1.1)$$

де h – товщина ОК (тоді як, $2h$ – це загальна відстань, разі застосуванні луна-імпульсного методу УЗТ);

A_0 – початкова амплітуда ультразвукової хвилі;

A – амплітуда хвилі, після поширення в ОК на відстань $2h$.

Коефіцієнт згасання напряду залежить від робочої частоти введення ультразвукової хвилі. Тому зі збільшенням частоти коефіцієнт згасання також збільшується.

На коефіцієнт загасання α_3 впливають показники коефіцієнтів поглинання a_1 і розсіювання a_2 . Тому його представляють як зважену суму:

$$\alpha_3 = a_1 f + a_2 f^2, \quad (1.2)$$

де f – частота ультразвукових коливань.

Розсіювання ультразвуку в середовищі відбувається через зміну його хвильового опору, що спричинене наявністю різних включень (пори, зерна), які характеризуються розмірами, границями тощо.

Тип розсіювання в твердих матеріалах залежить від співвідношення довжини хвилі і середнього розміру зерна матеріалу:

- при розмірі зерна, яке менше довжини хвилі, – релєївське розсіяння;
- при розмірі зерна, яке співмірне з довжиною хвилі, – стохастичне розсіяння;
- при розмірі зерна, яке більше довжини хвилі, – дифузне розсіяння [6].

Для мегагерцового діапазону частот ультразвуку, загасання в переважній більшості випадків відбувається за рахунок втрат енергії через розсіювання хвиль на окремих зернах і мало залежить від поглинання.

Коефіцієнт загасання який залежить від розміру зерна має вид:

$$\alpha_3 = K f^4 D^3, \quad (1.3)$$

де K – постійний для кожного матеріалу коефіцієнт, який залежить від швидкості поширення ультразвуку в матеріалі, густини і анізотропії матеріалу;

D – середній розмір зерна.

Поглинання також зменшує інтенсивність ультразвукової хвилі при її поширенні в ОК за рахунок нагрівання матеріалу, на що витрачається частина енергії. Магнітний гістерезис також впливає на поглинання ультразвуку в ОК.

Дисперсія в твердих матеріалах відбувається за рахунок зміни частоти коливання і теж певним чином впливає на загасання.

1.1.2. Використання та актуальність контролю певних КМ

З переліку конструкційних матеріалів можна зрозуміти, що їх незліченна кількість, та з розвитком технологій лише збільшуються. В даній роботі було прийняте рішення зосередитися на трьох матеріалах, а саме: алюміній, оргскло та конструкційна кераміка. Та зосередимося на кожному з матеріалів окремо.

Перший – **алюміній** - елемент, що з будь-яким елементом може утворювати стійку сполуку, а саме – киснем, воднем, хлором та різноманітними речовинами. Результатом даного поєднання є сплав, кожен з яких має певні фізичні та хімічні характеристики [3].

Найвідоміша галузь використання алюмінієвих сплавів - авіабудування. Значна частина конструкції літака виготовляється саме з алюмінієвих сплавів. Сплави цинку, магнію і алюмінію забезпечують високий запас міцності, що знайшло застосування в обшивці літаків та фундаментально важливих деталей конструкції.

Аналогічно використовуються алюмінієві сплави і в будові кораблів, підводних човнів і дрібного річкового транспорту. Тут з алюмінію найбільш вигідно робити надбудовні конструкції, вони більш ніж в половину знижують вагу судна, при цьому не погіршуючи їх надійності.

Отже, найбільш популярними сферами використання можна назвати:

- Авіабудування: насоси, двигуни, корпуси та інші елементи;
- Ракетобудування: як горючий компонент для ракетного палива;
- Суднобудування: корпусу і палубні надбудови;
- Електроніка: дроти, кабелі, випрямлячі;

- Оборонне виробництво: автомати, танки, літаки, різні установки;
- Будівництво: сходи, рами, оздоблення;
- Область ЖД: цистерни для нафтопродуктів, деталі, рами для вагонів;

- Автомобілебудування: бампера, радіатори;
- Побут: фольга, посуд, дзеркала, дрібні прилади;

Саме в для НК даний матеріалі та розвитку вдосконалення прийому сигналу є дуже важливою метою, адже, авіа-, ракето-, суднобудування є дуже важливими галузями виробництва. Дослідження товщини в на різних етапах виробництва та експлуатації залишаються актуальними.

Наступний конструкційний матеріал – **оргскло**. Органічне скло дуже «молодий» матеріал, але завдяки ряду властивостей (стійкість до механічних впливів, безпеку, прозорість, довговічність і т.д.) йому знайшлося застосування практично у всіх сферах діяльності людини [3].

Щодо галузі застосування це:

- Машинобудування.

Органічне скло застосовується в авіа- і автомобілебудування, використовується в багатьох приладах і верстатах. Також його використовують при будівництві малих і великих суден для скління і створення внутрішніх перегородок.

- Будівництво та архітектура.

Пластикові скла широко застосовуються в будівництві та архітектурі. З них виготовляють паркани, навіси, перегородки, різні елементи конструкції як зовні, так і всередині будівель і споруд.

- Меблі і предмети інтер'єру.

Завдяки відмінним споживчими властивостями, матеріал так полубився дизайнерам. Його використовують при виробництві меблів, світильників, акваріумів, з нього виходять дуже красиві вітражі. Користується великою популярністю і сантехніка з оргскла.

- Рекламна продукція.

Органічне скло використовується для виготовлення торгового і виставкового обладнання, зовнішніх рекламних конструкцій, офісних табличок і покажчиків. Крім того, його застосовують для виробництва сувенірної продукції, стендів, номерків і бирок.

– Медицина.

У медицині з органічного скла виробляють контактні лінзи і захисні окуляри. Матеріал застосовується при виготовленні оптоволокна, яке використовується в медичних інструментах для проведення ендоскопічних операцій.

Органічне скло міцно увійшло в наше життя. Його буквально можна зустріти на кожному кроці - вдома, в офісі, в магазині, на вулиці. Сфера застосування цього матеріалу дуже широка, і, цілком ймовірно, в найближчій перспективі він не здасть свої позиції, навпаки, з'являться нові вироби з оргскла і оригінальні варіанти його застосування.

Останній матеріал, а якому було зосереджено увагу при дослідженні – кераміка. Кераміка, як матеріал, була відома з найдавніших часів і є, можливо, першим штучним матеріалом створеним людиною. У міру розвитку наукових знань і вдосконалення технологічних процесів виробництва, стали з'явилася різні види кераміки, що відрізняються як за хімічним складом, так і за технологіями.

В даній роботі увагу зосереджено саме на технічній кераміці. Технічна кераміка – це штучно синтезовані матеріали з різним фазовим і хімічним складом, завдяки чому вона має ряд специфічних властивостей. Вона містить в своєму складі глину в малих кількостях або глина повністю відсутня в її складі. Основними елементами технічної кераміки є оксиди і сполуки металів (безкисневі). Більшість її видів мають спечену структуру і полікристалічне будова.

Цей різновид кераміки є перспективним матеріалом для конструкцій, що працюють при високих температурах (1200 ° С і вище). Вона використовується для теплообмінників, для хімічного і металургійного устаткування, деталей

двигунів внутрішнього згоряння і газотурбінних двигунів, ущільнювачів насосів.

Технічна кераміка порівняно недавно стала застосовуватися у виробництві, тому вироби і матеріали, на її основі тільки в останні десятиліття стали знаходити своїх споживачів в різних сферах виробництва. Завдяки своїм властивостям технічна кераміка є найбільш конкурентоспроможним матеріалом на ринку. Вироби з технічної кераміки знаходять широке застосування в багатьох сучасних сегментах життєдіяльності:

- керамічні вироби на основі Al₂O₃- і ZrO₂-кераміки застосовуються для виробництва медичних виробів: ендопротезів, імплантатів, що імплантуються систем і їх елементів. Дані вироби мають біоактивні покриття з наноструктурованого гідроксиапатиту і можуть успішно застосовуватися при хірургічному лікуванні захворювань і пошкоджень опорно-рухового апарату людини, а також в стоматології та щелепно-лицевої хірургії;
- керамічні вироби для електроніки та електротехніки: ізоляційні труби для вакуумних установок, ізолятори для вакуумних дугогасильних камер, різна техніка для зондування, фотоелектричне дослідницьке обладнання;
- в авіаційній і космічній промисловості застосовні керамічні вироби СВЧ-діапазона (металокерамічні генераторні лампи, коаксильного-хвильове модулі) для системи протиповітряної оборони, висотомірів, систем наведення;
- керамічні матеріали, що використовуються для автомобілебудування: підшипники кочення і ковзання, направляючі, поршні дозуючих насосів;
- керамічні ізолятори і підкладки використовуються в приладобудуванні: в приладах нічного бачення, силових напівпровідникових приладах;
- в побутовій сфері найбільш застосовними є вогнетриви і технічна кераміка для інших побутових потреб;
- в сфері будівництва керамічні матеріали застосовують як стінові і покрівельні вироби, елементи перекриттів, санітарно-технічні вироби.

1.2. Стислі теоретичні відомості про УЗТ

Методи УНК ґрунтуються на проходженні ультразвукових хвиль через ОК, зміні їх параметрів в залежності від властивостей ОК, що дозволяє контролювати характеристики і властивості матеріалу [] за характеристиками сигналів УНК.

Під час НК в матеріалі ОК не відбувається будь-яких помітних змін, що впливають на якість, параметри і характеристики цього ОК. Тому вироби, які не мають дефектів, зберігають свої властивості і якості, і можуть бути введені в експлуатацію.

Серед багатьох методів НК, які ґрунтуються на дії різних фізичних полів, широко використовуються акустичні методи контролю. Їм невласиві такі недоліки магнітних і електромагнітних методів, як неоднозначність показів приладів і суттєва залежність останніх від змін хімічного складу матеріалу. Більше того, для розв'язку завдань НК неметалевих матеріалів акустичні методи взагалі часто є незамінними.

Акустичні методи контролю використовують в різних галузях науки і техніки: локації, геодезії, геології, біології, медицині, будівництві, машинобудуванні, авіабудуванні тощо. Для розв'язку різних завдань безпосередньо використовують фізичну, хімічну чи біологічну дію ультразвуку. Прикладами останніх є товщинометрія і дефектоскопія металевих та неметалевих матеріалів та багатошарових конструкцій, вимірювання розмірів ОК, контроль фізико-механічних властивостей матеріалів та конструкцій [6].

Акустичні методи НК основані на реєстрації параметрів пружних хвиль, які збуджують або виникають в ОК. З їх допомогою:

- виявляють дефекти типу порушення суцільності (раковини, пори, неметалеві включення, тріщини різних видів, непровари, непропаї, дефекти багатошарових конструкцій);

- контролюють геометричні розміри виробів (товщину стінки труб, прутів, листів тощо, до яких є доступ лише з однієї сторони);
- визначають фізико-механічні властивості і структуру матеріалу (механічні властивості, модуль пружності, величину зерна, відхилення режимів термічної і пластичної обробки від визначених технологічних процесів).

Акустичні методи контролю поділяються на дві групи: методи, що ґрунтуються на прийманні акустичних хвиль (пасивні методи); методи, що ґрунтуються на випромінюванні і прийманні акустичних хвиль (активні методи). Класифікація акустичних методів контролю наведено в Додатку Б, де детально описані акустичні методи УНК та виконано їх порівняльний аналіз. Вибір методу НК залежить від вирішення конкретної задачі, що ставиться перед початком дослідження.

Ультразвуковий контроль серед акустичних методів НК має найкращу сукупність експлуатаційних характеристик, таких як: інформативність, технологічність, економічність, продуктивність, екологічність тощо.

В результаті застосування методів і засобів УНК для дослідження КМ, можна отримати інформацію: про якість виробів, джерела і причини появи дефектів, особливості їх розвитку в часі тощо. Це дозволяє контролювати виробнику процес виготовлення виробів з КМ високої якості завдяки:

- контролю якості вхідних матеріалів і комплектуючих виробів;
- корегування режимів і умов технологічних процесів виготовлення виробів;
- відбраковування неякісних і ненадійних готових виробів;
- оптимізації розробки нового чи удосконалення виготовленого раніше виробу, з точки зору його якості і надійності.

Крім того методи УНК мають такі корисні особливості: 1) можуть реалізовуватись без зупинки технологічних процесів, а ультразвукові хвилі можуть передаватися в рухомі об'єкти без безпосереднього механічного контакту з ними перетворювача (при використанні безконтактних перетворювачів); 2) вимірювання можуть проводитись в закритих ємностях з передачею ультразвукової енергії через стінки ОК; 3) ультразвукові хвилі

проходять через ОК, що дозволяє вивчати властивості матеріалу, в напрямі поширення хвилі.

Застосування ультразвукових методів залежить від: швидкості поширення і загасання ультразвукових хвиль в матеріалі; складу і структури матеріалу; відбиття і розсіювання ультразвукових хвиль на межі між середовищами з різними хвильовими опорами; зміни параметрів резонансних коливань твердих тіл, що пов'язане з навколишнім середовищем тощо [4].

Особливості реалізації УНК в залежності від завдань товщинометрії та умов поширення ультразвуку в різних матеріалах обумовили створення і розвиток різних методів УЗТ [5].

1.2.1. Основні положення луна-імпульсного методу ультразвукової товщинометрії

Луна-імпульсний метод ґрунтується на випромінюванні в ОК коротких імпульсів пружних коливань і реєстрації інтенсивності амплітуди і часу надходження ультразвукового зондувального луна-сигналу (донного сигналу), що проходить через ОК і відбивається від протилежної стінки ОК [9]. Основними інформативними параметрами є амплітуда сигналу і час затримки прийнятого сигналу відносно зондувального. Вимірюючи часову затримку сигналів визначають товщину ОК. Якщо товщина виробу відома, то за часовим інтервалом вимірюють швидкість поширення ультразвуку в матеріалі з наступним її використанням для визначенням фізико-механічних властивостей матеріалів.

Більшість ультразвукових товщиномірів працюють в діапазоні частот від 500 кГц до 100 МГц, а луно-імпульсні товщиноміри, в основному, працюють в діапазоні частот від 1,25 до 10 МГц. Ультразвукові товщиноміри поділяються на три групи, в залежності від типу ОК, цілей дослідження, та точності вимірювання:

- прилади ручного контролю виробів з гладкими плоско-паралельними поверхнями;

- прилади ручного контролю виробів з грубими непаралельними поверхнями;
- прилади автоматичного контролю виробів в технологічному потоці.

Узагальнена структурна схема ультразвукового луна-імпульсного товщиноміра [9] з амплітудним методом обробки сигналів представлена на рис. 1.3. Між перетворювачем і ОК під час вимірювання утворюється ультразвуковий канал, через який сигнал проходить в прямому і зворотному напрямках.

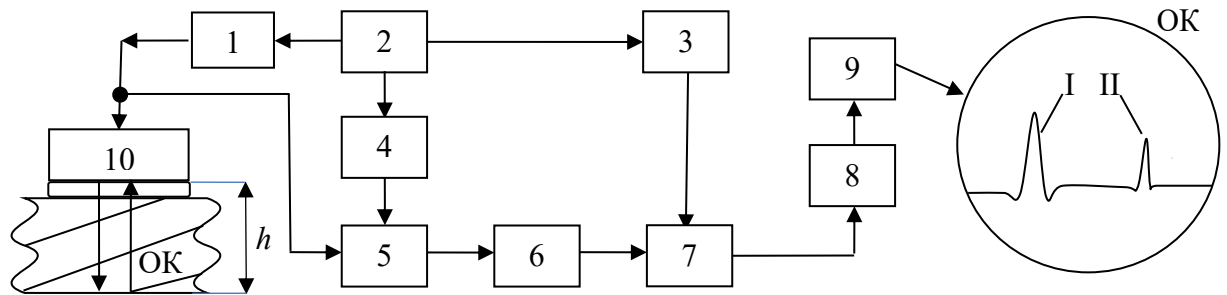


Рис. 1.3 – Узагальнена структурна схема луна-імпульсного товщиноміра:
 1 – генератор зондуючих імпульсів (ГЗІ); 2 – генератор синхронізуючих імпульсів (ГСІ); 3 – генератор розгортки; 4 – блок часового регулювання чутливості (ЧРЧ);
 5 – приймач; 6 – підсилювач; 7 – тригер; 8 – блок множення інтервалу;
 9 – індикатор; 10 – п’єзоелектричний перетворювач суміщеного типу.

Генератор синхронізуючих імпульсів (2) забезпечує синхронну роботу всіх вузлів товщиноміру, надсилаючи короткі імпульси на ГЗІ (1), генератор розгортки (3) і блок АРП (4). ГЗІ (1) формує високочастотні електричні сигнали, які збуджують в перетворювачі (10) ультразвукові коливання в формі коротких ультразвукових сигналів.

ПЕП суміщеного типу трансформує високочастотні електричні коливання напруги в механічні, які вводяться в ОК, приймає відбиті ультразвукові сигнали та перетворює їх в електричні імпульси. Перетворювач може додатково містити ультразвукову лінію затримки. На приймач (5) надходить відлуння ультразвукового імпульсу від протилежної поверхні ОК,

яке послаблене після проходження через ОК. Зазвичай він виконує підсилення і амплітудне детектування прийнятого сигналу.

Пристрій (6) підсилює і передає обвідну відбитого сигналу у тригер (7), тривалість імпульсу на виході якого дорівнює часу поширення ультразвукової хвилі в ОК.

Блок АРП (4) призначений для зменшення залежності амплітуди обвідної від часу поширення зондуючого імпульсу в ОК.

У випадку вимірювання ОК малої товщини тривалість вихідного імпульсу тригеру надто мала, тому для підвищення точності вимірювання застосовують блок множення (лінійної трансформації) інтервалу (8), в якому застосовують блоки лінійно-наростаючої напруги.

Індикатор (9) відображає на екрані обвідні випроміненого I і відбитого II сигналів. Переміщуючи ПЕП по поверхні ОК, контролюють його товщину, а також знаходять дефекти і визначають їх місцеположення. Зображення на екрані приладу залежить від типів розгортки, які детально розглянуті в [9, 10].

За умови вибору саме луно-імпульсного методу вимірювання, товщина вимірюється з формулою:

$$h = \frac{\lambda_{\text{ПЕ}}}{2} = \frac{C_l \cdot T}{2} = \frac{C_{\text{ПЕ}}}{2 \times f}, \quad (1.4)$$

де, C_l – швидкість поширення ультразвукових хвиль у виробі, T – часовий інтервал між випроміненим (зондувальним) імпульсом та прийнятим імпульсом (від дна ОК).

При використанні в товщиномірах перетворювача, підключеного за роздільносуміщеною схемою, швидкість також може бути розрахована за формулою (1.4). Проте у даному випадку формула (1.4) буде давати наближений результат, оскільки хвилі у виробі матимуть V-подібний шлях, а довжина такого шляху завжди більша, ніж подвоєне значення товщини.

1.2.2. Методика розрахунку акустичного та електричного трактів для луно-імпульсного методу дослідження ОК

Для початку проведемо *розрахунок датчику*, задаймося робочою частотою орієнтуючись на характеристики обраних матеріалів, для проведення досліджень.

На вибір конструкції датчику впливають такі параметри, як: метод УЗТ, конфігурація ОК, середовище для проведення контролю. Наразі, існує велика різноманітність видів п'єзoeлектричних датчиків для вимірювання товщини.

Основний елемент перетворювача – п'єзоелемент. Розміри і форму п'єзоелемента визначають з умов використання перетворювача. Товщина перетворювача є основною характеристикою, яка впливає на параметри контролю[6]. Часто, це товщина резонансна, яка попередньо визначається за формулою 1.4.

Поперечні розміри перетворювача задають характеристику направленості випромінювання (зони випромінювання, діаграму направленості, кутову і фронтальну роздільні здатності, чутливість і ін.), від поперечних розмірів залежить поява в спектрі випромінювання побічних сигналів, викликаних реверберацією в радіальному напрямі, у тому числі й на типах хвиль, що знову з'явилися.

В даній системі було прийнято рішення використати перетворювач прямого ведення. Прямими перетворювачами називають такі перетворювачі, які забезпечують випромінювання в ОК і приймання пружних хвиль під прямим кутом до поверхні виробу, що контактує з перетворювачем. Саме такий тип перетворювача є найбільш поширеним для луно-імпульсного методу УЗТ.

На рисунку 1.3 зображено схему внутрішньої будови прямого ПЕП, який перетворює електричну енергію в енергію пружних коливань і навпаки. 2-демпфер; 3-протектор ; 4-корпус; 5-електричний з'єднувач; 6-струмопровід; 7-заливальний компаунд; 8-контактний шар ; 9-акустична пастка; 10-ОК [6].

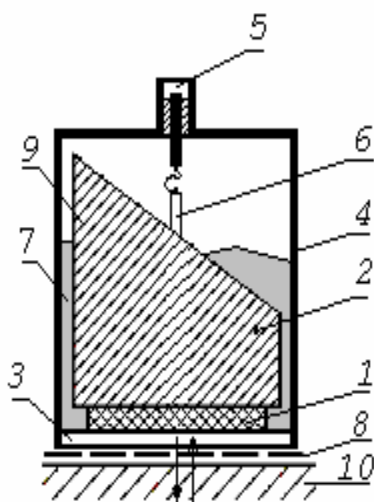


Рис. 1.3 – Елементи конструкції суміщеного ультразвукового перетворювача з нормальним вводом.

Задля того, щоб наша система володіла достатньою універсальністю проведемо розрахунок характеристик датчику та акустичного тракту системи. Це дозволить оцінити рівень сигналів, які будуть надходити для подальшої обробки.

Головною умовою, покладеною в основу методу, є наближена рівність в ОК швидкостей поздовжньої і головної хвиль, тобто $C_l = C_T$ (1.4). За цієї умови вибираємо швидкість УЗ.

Для розрахунків було обрано три конструкційних матеріали, а саме:

- алюміній;
- оргскло;
- конструкційна кераміка.

Основні характеристики та галузі застосування були вказані в попередньому пункті роботи. В табл. 2.1 вказані такі параметри, як: швидкість, густина та коефіцієнт згасання в матеріалах.

Таблиця 1.1 – Параметри контрольованих матеріалів

Назва	Швидкість УЗ, $\frac{м}{с}$	Густина, $\frac{кг}{м^3}$	Коефіцієнт згасання, $\frac{Нп}{м}$
Алюміній	6360	2700	1
Оргскло	2700	1180	25
Кераміка	9800	2600	3

Робоча частота перетворювача –5 МГц. Саме така величина була обрана виходячи з параметрів обраних матеріалів.

Розрахуємо довжину хвилі в матеріалах за формулою:

$$\lambda_{OK} = \frac{C_{OK}}{f_p}, \quad (1.5)$$

де, f_p – робоча частота перетворювача, а C_{OK} – відповідно табличне значення швидкості ультразвуку в певному середовищі.

Підставивши значення в формулу 1.5, отримаємо довжину хвилі в матеріалах:

$$\lambda_{OK_{ал}} = \frac{6360}{5 \cdot 10^6} = 1.27 \text{ (мм)}$$

$$\lambda_{OK_{ог}} = \frac{2700}{5 \cdot 10^6} = 0,54 \text{ (мм)}$$

$$\lambda_{OK_{кр}} = \frac{9800}{5 \cdot 10^6} = 1.96 \text{ (мм)}$$

Долі розрахуємо мінімальну вимірювану товщину. На визначення мінімальної товщини виробу впливає тривалість мертвої зони. Мертва зона - це зона нечутливості, яка складається з тривалості зондуючого імпульсу $\tau_{зі}$ - тривалості ревербераційних шумів перетворювача і $\tau_{ш}$ [6].

Глибина мертвої зони визначається за формулою:

$$h_{МЗ} = \frac{c \cdot \tau_{МЗ}}{2} \quad (1.6)$$

Коли постає задача вимірювати виріб малої товщини, важливим є максимально зменшувати $\tau_{МЗ}$. Досягти це можливо завдяки сильного демпфування ПЕ з розширенням смуги частот ПЕ та підсилювача у бік високих частот. Для зменшення похибки формування вимірювального інтервалу необхідно визначити мінімальне значення товщини:

$$h_{min} \approx h_{МЗ} = \frac{c}{2} \cdot (\tau_{зі} + \tau_{ш})$$

Розрахуємо T – періоду одного коливання, відбувається за формулою:

$$T = \frac{1}{f_p} = \frac{1}{5 \cdot 10^6} = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ (с)}$$

Загальний час зондуючого імпульсу τ_i знаходиться в межах:

$$\tau_i = (3 \div 5)T$$

Оперююсь на значення діапазону коефіцієнту, що впливає на тривалість зондуючого імпульсу прийемо його значення рівним - $\tau_i = 3 \cdot T$, тоді:

$$\tau_i = 3 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} = 0.6 \text{ (мкс)}$$

Ревербераційні шуми перетворювача можна зменшити при забезпеченні співвідношення частотних властивостей самого ПЕ, а також якістю акустичного і електричного демпфування. Можна вважати, що у випадку оптимального демпфування мінімальна вимірювана товщина визначається як:

$$h_{min} \approx \frac{c}{2} \cdot T$$

Спираючись на формулу 1.7 розрахуємо мінімальну товщину для зразків (ОК):

$$h_{min(ал)} = \frac{\lambda}{2} = 0.635 \text{ мм}$$

$$h_{min(ор)} = \frac{\lambda}{2} = 0.27 \text{ мм}$$

$$h_{min(кр)} = \frac{\lambda}{2} = 0.98 \text{ мм}$$

Довжина хвилі в п'єзоперетворювачі рівна:

$$\lambda_{пе} = \frac{c_{пе}}{f_p}$$

де $c_{пе}$ - швидкість звуку в ЦТС-19

$$\lambda_{пеп} = \frac{3300 \times 10^3}{5 \times 10^6} = 0.66 \text{ (мм)}$$

Розрахуємо товщину п'єзоелемента, підставимо значення у формулу (1.4):

$$h = \frac{3.3 \times 10^3}{2 \times 5 \times 10^6} = 0.33 \text{ (мм)}$$

З конструкційних міркувань, обираємо, що діаметр перетворювача, $d = 10$ мм, відповідно його радіус $a = 5$ мм.

Тоді, основні параметри п'єзоелемента наступні :

$$2a = 10 \text{ (мм)}$$

$$h = 0.33 \text{ (мм)}$$

Площа перетворювача визначається за формулою :

$$S_{\text{пеп}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78.54 \text{ (мм}^2\text{)}$$

Для виготовлення ПЕП застосовують матеріали, що включають ді групи якості. П'єзоелементи з матеріалів першої групи застосовують в високочутливих приймачах, випромінювачах звукових та ультразвукових коливань. Матеріали цієї групи успішно застосовуються саме для ультразвукової дефектоскопії, товщинометрії, гідроакустике, в діагностичної. Саме тому, для використання нашого ПЕП застосовується ЦТС-19.

Цей матеріал один із списку першої групи якості, а має такі акустичні характеристики (табл. 1.2.).

Таблиця 1.2 – Параметри ЦТС-19

Найменування параметру	Позначення	Числове значення
Швидкість звуку	C_1 М/с	3300
Густина	$\rho \cdot 10^3$ кг/м ³	7.45
Пезокоефіцієнти	$d_{33} \cdot 10^{12}$, Кл/Н	200
	$d_{31} \cdot 10^{12}$, Кл/Н	100
	e_{33} , Кл/м ²	15
Відносна діелектрична проникність	$\epsilon^{T_{33}} / \epsilon_0$	1725
Модуль Юнга	$\gamma^{10} 10^{-11}$, Па	0.7
Механічна добротність		50
Коефіц.електромех. зв.	k_p	0.40

Розрахунок акустичних імпедансів. Для біжучої хвилі пласкої форми тиск та коливальна швидкість синфазні, а отже, питомий акустичний імпеданс не залежить ні від часу, ні від координати та є дійсною величиною [11]. Кожний матеріал має певний імпеданс, що в загальному визнається за формулою (1.7):

$$z = C \times \rho \quad (1.7)$$

$C_{\text{цтс}}$ і $\rho_{\text{цтс}}$ – Значення беремо с табл. 1.2.

$$z_{\text{цтс}} = C_{\text{цтс}} \times \rho_{\text{цтс}} = 3300 \cdot 7450 = 2.458 \cdot 10^7 \quad \left(\text{Па} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}\right)$$

Розрахуємо акустичний імпеданс для кожного з досліджуваних матеріалів :

$$z_{\text{ал}} = \rho_{\text{ал}} \cdot c_{\text{ал}} = 2700 \cdot 6360 = 1.71 \cdot 10^7 \left(\text{Па} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}\right)$$

$$z_{\text{ог}} = \rho_{\text{ог}} \cdot c_{\text{ог}} = 1180 \cdot 2700 = 0.31 \cdot 10^7 \left(\text{Па} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}\right)$$

$$z_{\text{кр}} = \rho_{\text{кр}} \cdot c_{\text{кр}} = 2600 \cdot 9800 = 2.55 \cdot 10^7 \left(\text{Па} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}\right)$$

Розрахунок коефіцієнту проходження УЗ

Розрахуємо коефіцієнт проходження УЗ променю по інтенсивності за формулою:

$$T_i = \frac{4 \cdot z_1 \cdot z_2}{(z_1 + z_2)^2} \quad (1.8)$$

У формулі (1.8) в якості z_1 взято акустичний імпеданс ЦТС-19, а z_2 відповідно об'єкт контролю.

$$T_{i(\text{ал})} = \frac{4 \cdot z_{\text{цтс}} \cdot z_{\text{ал}}}{(z_{\text{цтс}} + z_{\text{ал}})^2} = \frac{4 \cdot 2.458 \cdot 10^7 \cdot 1.71 \cdot 10^7}{(2.458 \cdot 10^7 + 1.71 \cdot 10^7)^2} = 0.96$$

$$T_{i(\text{ог})} = \frac{4 \cdot z_{\text{цтс}} \cdot z_{\text{ог}}}{(z_{\text{цтс}} + z_{\text{ог}})^2} = \frac{4 \cdot 2.458 \cdot 10^7 \cdot 0.31 \cdot 10^7}{(2.458 \cdot 10^7 + 0.31 \cdot 10^7)^2} = 0.39$$

$$T_{i(\text{кр})} = \frac{4 \cdot z_{\text{цтс}} \cdot z_{\text{кр}}}{(z_{\text{цтс}} + z_{\text{кр}})^2} = \frac{4 \cdot 2.458 \cdot 10^7 \cdot 2.55 \cdot 10^7}{(2.458 \cdot 10^7 + 2.55 \cdot 10^7)^2} = 0.99$$

Розрахунок товщини шару контактної рідини. В якості контактної рідини що необхідна для надання акустичного контакту ПЕП з ОК шару в конструкції датчика необхідно забезпечити передачу пружних коливань ультразвукової частоти від перетворювача.

$$z_B = C_B \cdot \rho_B = 1500 \cdot 1000 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$$

Контактної рідини обираємо воду .

При контролі товщини важливо знати параметри контактної рідини, адже це впливатиме на час проходження хвилі через шар контактної рідини. Тому проведемо розрахунок:

$$C_{KP} = 1500 \text{ м/с}$$

$$\lambda_{KP} = \frac{C_{KP}}{f_{pob}} = \frac{1500}{5 \cdot 10^6} = 0,3 \text{ мм}$$

Визначимо товщину просвітлюючого шару за формулою:

$$h_{KP} = n \frac{1}{4} \lambda_{ПШ} = \frac{0,3}{4} = 0.075 \text{ мм}$$

Розрахунок акустичного тракту для прямого перетворювача

Розрахунок коефіцієнту проходження УЗ по інтенсивності дозволяє обчислити акустичний тракт. Акустичний тракт – це шлях ультразвукової хвилі від випромінюючого перетворювача до перетворювача-приймача. Основним результатом розрахунку акустичного тракту є коефіцієнт ослаблення акустичного тракту. Загальна формула для розрахунку акустичного тракту:

$$K_{ат} = \frac{p_{п}}{p_{в}} \quad (1.9)$$

де, $p_{п}$ і $p_{в}$ - акустичний тиск в приймаючому і випромінюючому перетворювачах, що виникає в процесі випромінювання-прийому сигналів.

Коефіцієнт акустичного тракту – числова величина. Розкривається коефіцієнт акустичного тракту через формулу акустичного тракту. Формула акустичного тракту враховує променеву картину, характеристики

спрямованості випромінювання-прийому і структурну схему акустичного тракту.

Формули для акустичного тракту є різні, і для того щоб визначити оптимальну для завдання формулу, необхідно визначити в якій зоні проводиться контроль – в дальній чи ближній.

Для цього скористаємося формулою для розрахунку ближньої зони :

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda}$$

де, a і λ – відповідно радіус перетворювача і довжина акустичної хвилі.

Визначимо ближню зону для обраних матеріалів:

$$r_{\text{бл(ал)}} = \frac{5^2}{1,27} = 19,7 \text{ мм}$$

$$r_{\text{бл(ог)}} = \frac{5^2}{0,54} = 46,3 \text{ мм}$$

$$r_{\text{бл(кр)}} = \frac{5^2}{1,96} = 12,8 \text{ мм}$$

З умови, що $3 \cdot r_{\text{бл}} \approx r_{\text{дл}}$, розрахуємо $r_{\text{дл}}$:

$$r_{\text{дл(ал)}} \approx 3 \cdot r_{\text{бл}} = 59 \text{ мм}$$

$$r_{\text{дл(ог)}} \approx 3 \cdot r_{\text{бл}} = 138,9 \text{ мм}$$

$$r_{\text{дл(кр)}} \approx 3 \cdot r_{\text{бл}} = 38,3 \text{ мм}$$

Дані розрахунки необхідні, для того, щоб визначитися в якій зоні буде проведено контроль. Адже, стабільний, добре відтворюваний зв'язок амплітуди луно-імпульсного сигналу спостерігається при його прозвучуванні в дальній зоні акустичного поля перетворювача. У ближній зоні структура поля є дуже неоднорідною, тому для цієї зони коефіцієнти акустичних трактів виведені з урахуванням певних спрощень.

Формула акустичного тракту у дальній зоні характеризує, що відбивачем є плоска горизонтальна поверхня, розташована в дальній зоні випромінювача,

розміри якої значно перевищують розміри випромінювача, тобто повністю перекривають акустичний тракт.

Формула акустичного тракту для дальньої зони:

$$K_{\text{ат}} = \frac{S_{\text{пеп}}}{2 \cdot \lambda \cdot H} \cdot T_i \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot H \cdot \delta} \quad (1.10)$$

У формулі фігурують наступні величини : $S_{\text{пеп}}$ – площа перетворювача; λ – довжина хвилі; H – товщина об'єкта контролю; T_i – коефіцієнт проходження УЗ по інтенсивності; R_p – відбиття променя від поверхні диску (за умовою приймаємо, що цей коефіцієнт дорівнює одиниці); δ – коефіцієнт згасання поздовжньої хвилі в об'єкті контролю (беремо значення по кожному матеріалу з довідника).

Розрахуємо акустичний тракт для суміщеного перетворювача:

$$K_{\text{ат(ал)}} = \frac{78,54}{2 \cdot 1,27 \cdot 65} \cdot 0,96 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot 65 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 0,35$$

$$K_{\text{ат(орг)}} = \frac{78,54}{2 \cdot 0,54 \cdot 65} \cdot 0,39 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot 65 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 0,011$$

$$K_{\text{ат(кр)}} = \frac{78,54}{2 \cdot 1,96 \cdot 65} \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot 65 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 0,2$$

Так як за розрахунками (1.10) проведення контролю в дальній зоні для виробів за оргскла не є доцільними, з врахуванням знаного коефіцієнта згасання та розміру. Отже, контроль необхідно проводити в ближній зоні випромінювання. Згідно цього, акустичний тракт прямого ПЕП в ближній зоні:

$$K_{\text{ат}} = 0,8 \cdot T_i \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot H \cdot \delta}$$

$$K_{\text{ат(орг)}} = 0,8 \cdot 0,39 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot 65 \cdot 25 \cdot 10^{-3}} = 0,012$$

Розрахунок електроакустичного тракту

Метою оптимізації акустичного тракту є досягнення такого співвідношення між характеристиками випромінюваного сигналу (частота, характеристика спрямованості, тривалість зондуючого імпульсу та ін.) і

характеристиками акустичного тракту (матеріал перетворювача, згасання звуку в об'єкті контролю, характеристики акустичного контакту, межі поділу, розміри і характер дефектів і ін.), для яких коефіцієнт акустичного тракту сягає максимального значення без погіршення основної якості пристрою: похибки вимірювання або достовірності контролю.

За допомогою попередніх розрахунків акустичного тракту, розрахуємо електроакустичний тракт.

Електроакустичний тракт – це частина електричної схеми, що включає і електричну сторону перетворювача, де відбувається електромеханічне пряме (або обернене) перетворення. Електроакустичний тракт визначає в більшості випадків резонансну (робочу) частоту випромінювання, форму зондуючого імпульсу і коефіцієнт перетворення електричної енергії в акустичну і навпаки.

Основною оцінкою ЕАТ є його коефіцієнт ослаблення.

$$K_{EAT} = \frac{U_{\Pi}}{U_B}$$

де U_{Π} - напруга прийнятого сигналу, приведена до входу аналогового електричного тракту U_B - напруга зондуючого сигналу.

Прийнявши, що коефіцієнти перетворення K_B (випромінювання) і K_{Π} (прийому) відповідно рівні:

$$K_B = \frac{p_B}{U_B} \text{ і } K_{\Pi} = \frac{p_{\Pi}}{U_{\Pi}}$$

$K_{\Pi\Pi}$ (коефіцієнт подвійного перетворення) буде рівний :

$$K_{\Pi\Pi} = K_{\Pi} \cdot K_B = \frac{p_B}{U_B} \cdot \frac{p_{\Pi}}{U_{\Pi}} = K_{EAT} \cdot \frac{1}{K_{AT}}, K_{EAT} = K_{AT} \cdot K_{\Pi\Pi}$$

то звідси :

$$U_{\Pi} = U_B \cdot K_{AT} \cdot K_{\Pi\Pi}$$

Згідно до попередніх розрахунків, значення напруги прийнятого сигналу становить $U_{\Pi} = 1\text{мВ}$, розрахуємо напругу випромінювання. Коефіцієнт $K_{\Pi\Pi}$ близький за величиною до коефіцієнту електромеханічного зв'язку і на відміну

від нього, окрім оцінки п'єзоелектричних властивостей п'єзоматеріалу, залежить ще й від форми і розмірів перетворювача, частоти перетворення, демпфування як механічного, так і електричного. Прийнемо $K_{пп}$ рівним 0,15.

Напруга на вході суміщеного перетворювача для діапазону мінімального та максимального коефіцієнту згасання:

$$U_{в(min)} = \frac{U_{п}}{(K_{ат(min)} \cdot K_{пп})} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,35 \cdot 0,15} = 19,04 \text{ мВ}$$

$$U_{в(max)} = \frac{U_{п}}{(K_{ат(max)} \cdot K_{пп})} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,012 \cdot 0,15} = 17,85 \text{ мВ}$$

$$U_{в(max)} = \frac{U_{п}}{(K_{ат(max)} \cdot K_{пп})} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,15} = 33,3 \text{ мВ}$$

1.3. Автоматизація системи УЗТ

Ручний УЗК – це процес, що складається з комплексу простих та складних операцій. На це впливають такі фактори, як потрібно враховувати при проведенні контролю, а саме:

1) Матеріал. Тип матеріалу та діапазон вимірюваної товщини є найважливішими факторами для вибору датчика та перетворювача. Адже, як було зазначено попередньо, кожен всі матеріалів мають свій імпеданс, що є критерієм при виборі датчику.

2) Товщина. Діапазони товщини також диктуватимуть тип датчика та перетворювача, який слід вибрати. Як правило, тонкий матеріал вимірюється на високих частотах, а товсті або загасаючі матеріали вимірюються на низьких частотах.

3) Геометрія. Зі збільшенням кривизни поверхні відбувається зменшення ефективності контролю, так як контакт між перетворювачем та ОК погіршується. Тому, при зменшенні радіусу кривизни, розмір перетворювача також повинен зменшуватися.

4) Температура. Загальні контактні перетворювачі зазвичай можна використовувати на поверхнях приблизно до 125 ° F або 50 ° C.

Для автоматизації процесів УЗТ необхідно враховувати фактори вказані вище. Адже, автоматизувавши контроль, можна значно підвищити його тоність вимірювання в результаті обмеження впливу похибки, що вносить оператор та конструкція приладу. Покладання на автоматичні пристрої функцій сканування, реєстрації результатів контролю і прийняття рішення про якість контрольованого виробу.

Мета автоматизації – підвищення продуктивності праці, поліпшення якості продукції, покращення керування, усунення людини від виробництва, небезпечних для здоров'я.

Автоматизація, за винятком простих випадків, вимагає всебічного, системного підходу до рішення завдання, тому окремі вирішення завдань засобами автоматизації, зазвичай називаються системами, наприклад:

- автоматична система керування;
- автоматизована система керування;
- система автоматизації проектних робіт (САПР);
- автоматизована система керування технологічним процесом.

Якщо всі функції, виконувані оператором, передати контролюючому пристрою, то в загальному вигляді воно повинно містити такі функціональні елементи: акустичний блок з перетворювачами і механізмом для переміщення перетворювачів; систему стеження за якістю акустичного контакту; електронний блок для генерування зондируючих імпульсів і прийому ехосигналів; систему подачі і збору контактної рідини; електронний блок для логічної обробки інформації про дефект, включаючи ЕОМ; реєстратори інформації на дефектограми в аналоговій або цифровій формі; систему самоконтролю зворотного зв'язку для управління траєкторією і швидкістю сканування в залежності від отриманої інформації про дефект; систему автоматичної відбраковування [12].

Рівень автоматизації є залежним від сукупності економічних, технологічних, технічних та інженерно-психологічних вимог. Залежить ці вимоги від методів, засобів контролю та визначається наявністю в ній певних систем (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Рівні автоматизації УЗ-контролю

Рівень автоматизації	Характеристика праці	Функції, що передаються автоматичного пристрою							
		Вимірювання координат та розміру ОК	Порядкове сканування	Контроль акустичного контакту	Завадостійкість	Контроль працездатності	Ресстрація первинної інформації на дефектограмі	Сканування за програмою	Оцінка якості виробу
0	Ручний	+	-	-	-	-	-	-	-
I	Ручний з атоматизацією певних операцій	+	-	-	-	-	-	-	-
II	Механізований	+	+	+	+	+	+	-	-
III	Автоматизований	+	+	+	+	+	+		-
IV	Автоматичний	+	+	+	+	+	+	+	

Система I рівня автоматизації дозволяють знизити людський фактор навантаження, що впливає на оператора за рахунок реалізації вимірювання параметрів ОК, в процесі ручного сканування.

Такі прилади повинні обробляти первинну інформацію і відобразити її в зручній для оператора формі на дисплеї, що має цифровий індикатор а інтерфейс. Так як вибірка може містити більше одного донного сигналу, а цифровий дисплей може відобразити дані тільки про один з них, в приладі повинен бути передбачений пристрій, що реалізує пріоритетний правило про відображення всієї інформації про корисний сигнал. Крім того, для підвищення достовірності виявлення донних імпульсів інформація,

відображена на дисплеї, повинна запам'ятовуватися. Період зчитування і скидання інформації повинен регулюватися [13].

Використання в системі мікропроцесор відкриває широкий спектр можливостей. Системи першого рівня мають вбудований мікропроцесор. А тому можна отримати інформацію не лише про амплітуду сигналу, але і частотну складову інформації, фазову характеристику, форму та спотворення сигналу, тощо. При цьому оператор може власноруч корегувати параметри контролю за допомогою клавіатури, відображення обраних параметрів спостерігається на дисплеї.

Система II рівня автоматизації повинні додатково містити пристрій сканування, шумозавади, контролю акустичного контакту і працездатності основних систем, а також реєстрації донних імпульсів.

Система сканування є найбільш складним і найменш надійним механізмом будь-якої автоматизованої системи неруйнівного контролю. Вона повинна забезпечувати порядкове прозвучу всього контрольованого металу шва по заданій траєкторії з постійною або регульованою швидкістю, гарантуючи при цьому надійний акустичний контакт.

Вибір акустичної системи залежить від товщини і геометрії виробу, характеру статистичного розподілу дефектів по типу, орієнтації і розташування в ньому. Найбільш поширені такі способи сканування:

1. Через підрядник-послідовне прозвучу всього виробу одноелементна перетворювачем, який здійснює поздовжньо-поперечне переміщення.

2. Одночасне прозвучу декількома рознесеними на різні фіксовані відстані перетворювачами, кожний з яких прозвучиває такого району за зниженими товщині. При цьому відпадає необхідність в поперечному переміщенні перетворювачів. Зазвичай такі перетворювачі об'єднані в одну матрицю і переключаються за допомогою електронного комутатора, керованого програмним блоком.

Найбільш ефективні системи сканування на основі промислових роботів з гнучкою програмою управління, що задається мікроЕОМ.

Факсимільний спосіб дає позначку про дефект, сигнал від якого перевищує пороговий рівень, у вигляді точки. Він застосуємо при контролі швів будь-якої товщини і дозволяє побудувати наочну дефектограми всього вертикального перетину контрольованого шва у вигляді топографії дефектів по їх умовним розмірами. Недоліком способу є неможливість вимірювання амплітуди сигналу.

Цифровий спосіб найбільш інформативний, але найменш наочний. Для повноти і наочності відображення інформації застосовують реєстратори, що комбінують ці основні способи.

Установки III і IV рівнів називають автоматичними стендами або лініями. Стенди - вельми складне, громіздке і дороге устаткування, тому застосовувати їх на виробництві не завжди доцільно.

Установками III рівня є установки для автоматизованого контролю прокату, зварних швів роторів турбін і товстостінних (до 300 мм) судин тиску для хімічної та енергетичної промисловості, а також установки для дистанційного ультразвукового контролю корпусу реактора АЕС в процесі експлуатації.

Установки IV рівня автоматично оцінюють розміри дефекту, порівнюють їх з нормативними і при перевищенні цих розмірів відправляють виріб за допомогою виконавчого механізму в «кишеню шлюбу». До цього класу відносять трубні дефектоскопи.

Ефективність автоматизованого контролю залежить від його узгодженості з технологічним процесом виготовлення виробу. Тому в деяких випадках доцільно не автоматизувати, а тільки механізувати процес сканувань, звільняючи оператора від зайвого фізичного напруження, але залишаючи за ним всі контрольні функції.

Розвиток автоматизації неруйнівного контролю йде по шляху багатфункціональності та роботизації операцій вимірювання. Серед них

можна виділити наступні основні напрямки. До першого з них відносять створення автоматизованих засобів контролю з аналізом сигналу в реальному масштабі часу. Швидкодіючі засоби контролю засновані на аналогових і цифрових методах обробки багатовимірного сигналу. У координатах амплітуда, частота, час будуються тривимірні зображення акустичних полів, що дозволяє оцінити в них амплітудно-фазові та просторові співвідношення, характеризуючі тонку структуру відбиваючої поверхні

В другому напрямленню варто віднести застосування автоматизованих систем обробки зображення. Ці системи, як наприклад – ультразвукові голографічні системи, здійснюють візуалізацію зображення та представляють його в двовимірному або тривимірному вигляді.

1.4. Висновки до розділу

Широкий спектр та поява нових конструкційних матеріалів обумовлює необхідність їх постійного контролю і дослідження в процесах виробництва і експлуатації. Застосування УЗТ дозволяє без руйнації ОК, визначити його товщину. Однак виникає проблема, щодо точності результатів ультразвукових вимірювань. Це приводить до суттєвого зменшення відношення С/Ш і ускладнення умов виявлення корисних сигналів.

Значна частина відомих методів виявлення сигналів на фоні шумів передбачає наявність апріорної інформації про модель і характеристики корисних сигналів УЗТ. В реальних каналах товщиномірів корисні сигнали спотворюються і не відповідають своїм теоретичним моделям, що знижує ефективність застосування відомих способів виявлення сигналів на фоні шуму.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ФАЗОВОЇ ЛУНО-ІМПУЛЬСНОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ

2.1. Структура опрацювання сигналів за луно-імпульсним методом УЗТ

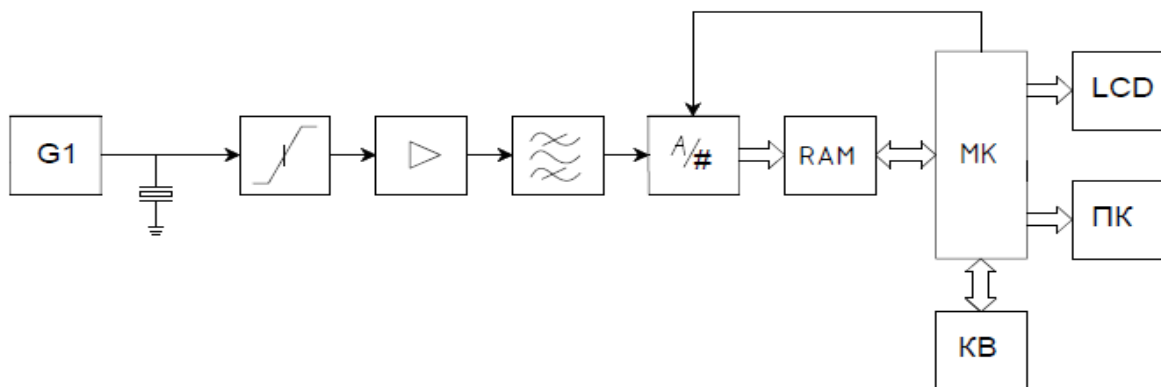


Рис. 2.1 – Функціональна схема луно-імпульсного товщиноміра:

- G1 – Генератор ударного збудження; 2 – Схема захисту; 3 – Блок підсилення;
4 – Смуговий фільтр (фнч); 5 – АЦП; 6 – Блок пам'яті;
7 – Мікроконтролер; 8 – Клавіатура; 9 – Комп'ютер.

Генератор ударного збудження формує сигнал який потрапляє на п'єзоелемент (ПЕП), який, в свою чергу, випромінює в об'єкт контролю зондуєчий імпульс. Відбитий донний сигнал потрапляє на схему захисту та підсилюється до відповідного рівня

Підсилений сигнал надходить до фільтра смугового фільтра. В якості смугового фільтра будемо використовувати активний фільтр другого порядку. Смуговий фільтр пропускає лише певну смугу частот, пригнічуючи певні складові вхідного сигналу.

Далі відфільтрований сигнал надходить на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), надходить до блоку пам'яті та поступає на мікроконтролер (МК). Після проходження обробки дані сигналу потрапляють на ПК- комп'ютер, де відбувається застосування програмного забезпечення

для підвищення точності вимірювання товщини в матеріалах зі значним коефіцієнтом загасання УЗ-хвилі. Курування прилад здійснюється завдяки з клавіатури. Для живлення системі застосовано акумулятор.

2.2. Дискретне перетворення Гільберта, як результат опрацювання сигналів

Згідно задачі для розроблення методу УЗТ фазові характеристики сигналів визначаються шляхом розрахунку дискретного перетворення Гільберта [13].

Тому розглянемо загальні принципи ДПГ, отже, нехай сигнал УЗТ $x(t)$ є реалізацією дійсного випадкового стаціонарного процесу $\xi(\omega, t)$, $t \in (-\infty, \infty)$, де ω - елементарна подія з області подій Ω , який належить до класу L^2 , тобто $\int_{-\infty}^{\infty} \xi^2(\omega, t) dt < \infty$. Даний вираз погоджений з основами, що покладені в теорії УЗТ, у відповідності з запропонованими сигналами, що використовуються у роботі.. Для $x(t)$ існує ПГ [14], яке може бути визначено як

$$\hat{x}(t) = \mathbf{H}[x(t)] = v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(\tau - t)} d\tau \quad (2.1)$$

де $\mathbf{H}[\cdot]$ – оператор ПГ,

$v.p.$ – позначення головного значення невласного інтегралу по Коші,

$\frac{1}{\tau - t}$ – ядро інтегрального перетворення.

Отже, значення, яке є спрженим по Гільберту сигнал $\hat{x}(t)$ є зображенням до початкового сигналу $x(t)$ з імпульсною характеристикою лінійного фільтру виду $\frac{1}{\tau - t}$. Функція, яка полягає у розробці методу реалізації називається фільтром Гільберта.

Перетворення (2.1) має змогу в одночас перетворювати $x(t)$ через його амплітудну $A(t)$ і фазову $\Phi(t)$ характеристики:

$$x(t) = A(t) \cos[\Phi(t)]. \quad (2.2)$$

Зазначені характеристики $A(t)$ і $\Phi(t)$ - функції часу і визначаються через ПГ за формулою:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$$

$$\varphi(t) = \Phi(t) \bmod 2\pi = \operatorname{arctg} \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} + \frac{\pi}{2} \{2 - \operatorname{sign} \hat{x}(t) [1 + \operatorname{sign} x(t)]\}, \quad (2.3)$$

де $(\cdot) \bmod 2\pi$ - позначення операції визначення залишку числа за модулем 2π , $\operatorname{sign}[\cdot]$ - знакова функція,

$$\operatorname{sign} a = \begin{cases} 1, & a > 0; \\ 0, & a = 0, \\ -1, & a < 0. \end{cases}$$

Аналізуючи вираз (2.3) робимо висновок, що ПГ ґрунтується на визначенні лише частини ФХС в межах інтервалу $[0, 2\pi)$, що пов'язано з циклічністю фази. В практиці фазових вимірювань, наприклад, у віддалеметрії [88] використовують визначення фази періодичних сигналів у фазових циклах – через цілу n і дробову Δn частини циклу

$$\Phi = 2\pi(n + \Delta n),$$

тобто Φ визначається через дійсне число $(n + \Delta n)$ з множником 2π . В цьому випадку $\Delta n = \frac{\Phi}{2\pi} \bmod 1$, тобто Δn є дробовою частиною дійсного числа. Через

Δn визначається відповідна, дробова, частина фази

$$\varphi = 2\pi \cdot \Delta n = 2\pi \left[\frac{\Phi}{2\pi} \bmod 1 \right] = \Phi \bmod 2\pi.$$

Функція $\varphi(t)$ має циклічний характер для періодичних сигналів (наприклад, для гармонічного сигналу $\varphi(t)$ має форму пилкоподібної функції з областю значень в інтервалі $[0, 2\pi)$. Особливість даної функції, а саме її стрибкоподібна зміна від значень 2π до 0 , дозволяє, в разі потреби, виконати розгортання функції і перейти від $\varphi(t)$ до $\Phi(t)$ на інтервалі спостереження сигналу $x(t)$. Потреба у розгортанні ФХС виникає, наприклад, в задачі визначення миттєвої частоти сигналу

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt}.$$

Наявності функції $x(t)$ в часовому проміжку $t \in (-\infty, \infty)$, дозволяє визначати функції $A(t)$ і $\Phi(t)$ у всіх точках інтервалу визначення $x(t)$. Виходячи з цього, ПГ сприяє надати оцінку і аналіз поточним змінам $A(t)$ і $\Phi(t)$ навіть в середині циклів періодичних сигналів.

Це підштовхує на подальше визначення та аналіз імовірностей ФХС і АХС. На певних проміжках часу, який містить корисну складову сигналу з її адитивною сумою шуму, які не містять корисного сигналу мають відмінність ймовірнісних характеристик $\Phi(t)$ та $A(t)$.

Для послідовності $\{x[j], j = \overline{1, n}\}$ існує дискретне перетворення з ядром Гільберта, що дозволяє отримати гільберт-образ $\hat{x}[j]$ цієї послідовності. На цій основі визначаються дискретні амплітудна, фазова (дробова частина) та частотна характеристики сигналу:

$$A[j] = \sqrt{x^2[j] + \hat{x}^2[j]}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.4)$$

$$\varphi[j] = \operatorname{arctg} \frac{\hat{x}[j]}{x[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \operatorname{sign} \hat{x}[j][1 + \operatorname{sign} x[j]]\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.5)$$

$$f[j] = \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi[j] - \Phi[j-1]}{\Delta t}, \quad j = \overline{2, n}, \quad (2.6)$$

де $\Phi[j]$ – дискретна ФХС після розгортання $\varphi[j]$.

Таким чином, дискретне ПГ дозволяє отримати масиви статистичних даних $A[j]$ – АХС, $\Phi[j]$ – ФХС і $f[j]$ – ЧХС, а в разі необхідності і статистики фазових зсувів сигналів

Дискретні характеристики сигналу (2.4) – (2.6) дозволяють застосовувати до них статистичні методи обробки даних.

Сигнали УЗТ, зазвичай, є обмеженими в часі і спостерігаються на скінченних інтервалах часу. Разом з цим перетворення (2.1) передбачає інтегрування на нескінченному часовому інтервалі, що фізично неможливо

виконати. На практиці завжди аналіз сигналів обмежений інтервалом спостереження T_C .

Продовження дослідження ПГ та застосування для УЗТ при аналізі сигналів вимагає детального аналізу можливостей при застосуванні полівіконної обробки сигналу УЗТ. Метою даного аналізу є мінімізація методичної похибки визначення ФХС.

2.3. Огляд кутових статистик для використання УЗТ

Отримання фазових характеристик досліджуваного сигналу і різниці ФХС як вибірки $\Psi = \{\varphi_j, j = \overline{1, n}, \varphi_i = [0, 2\pi)\}$, де $\varphi_i = (\Phi[j] - 2\pi f T_{Дj}) \bmod 2\pi$, створює передумови для застосування статистичних методів аналізу Ψ .

Оскільки вибірка Ψ розглядається як реалізація випадкового фазового зсуву з областю значень $[0, 2\pi)$, до неї слід застосувати методи статистичної фазометрії [13].

Обробка сигналів статистичним методом фазових вимірювань дає змогу на створення і обґрунтування нових методів обробки результатів вимірювань в УЗТ. Так як розвиток технологій дозволив використовувати в складі приладів та систем УЗТ комбінацію комп'ютерної техніки. Цей аспект дозволяє створити алгоритми обробки сигналів, та обробки результатів ФХС, різного ступеня складності і значно збільшувати точність і швидкодію систем.

2.3.1. Обґрунтування використання кутових статистичних характеристик для аналізу сигналів ультразвукової товщинометрії

Зі всіх відомих статистичних характеристик було обрано вибіркочувальну результуючу довжину вектору r так як вона, по-перше, є інваріантною до початкової фази сигналу (2.6), по-друге, піддається графітному аналізу результаті контролю.

Властивості лінійних характеристик та кутових характеристик різняться за певними параметрами. На це вказує: геометричне зображення кутових вимірювань, побудова яких відбувається на колі, зміна кута відбувається в діапазоні значень $[0, 2\pi)$. Результати кутових спостережень можна відобразити радіусами і точками на одиничному колі. Приклад відображення вибірки значень $\{\varphi_i, i = \overline{1, n}\}$ наведено на рис. 2.2 а).

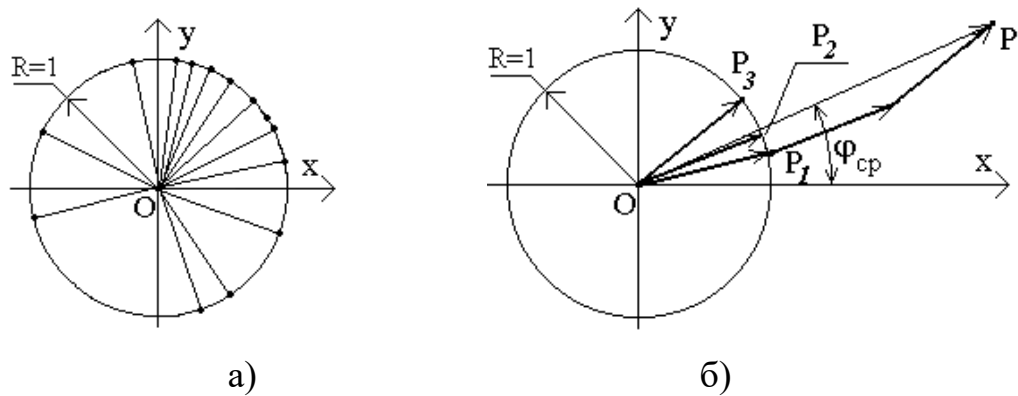


Рис. 2.2 – Графічне зображення результатів спостережень кутових величин на колі.

Вектор певної довжини можливо отримати завдяки усередненню значень на колі (рис. 2.2 б). Розрахунок вибіркового кругового середнього фазового зсуву $\varphi_{CP} = L(\bar{S}, \bar{C})$, що є аргументом вектору, який утворений сумою одиничних векторів $\overline{OP_1}, \dots, \overline{OP_n}$.

Значення вектору r застосовується при розкиді значень випадкового фазового зсуву відносно середнього – вибіркової кругової дисперсії $V = 1 - r$. Значення вибіркової результуючої довжини вектора r є незалежним від початку відліку кутів, тобто, при повороті векторів $\overline{OP_i}$ на деякий кут ν , значення r не зміниться, лише приведе до повороту вектору r у просторі на такий же кут ν .

Вектори r та \overline{OP} розташовані в просторі під однаковим кутом φ_{CP} до осі Ox. Значення вибіркового кругового середнього φ_{CP} визначається виразом

$$\varphi_{CP} = L[S, C] = \arctg \frac{S}{C} + \frac{\pi}{2} \{2 - (\text{sign}S)(1 + \text{sign}C)\}. \quad (2.7)$$

Множина значень $\{\varphi_i, i = \overline{1, M_r}\}$ та довжина вектора r , що має свій початок в точці $(0,0)$ та закінчення в точці $(\overline{C}, \overline{S})$, визначається як:

$$r = \sqrt{\overline{C}^2 + \overline{S}^2}, \quad (2.8)$$

де

$$\overline{C} = \frac{1}{M_r} \sum_{i=1}^{M_r} \cos \varphi_i, \quad \overline{S} = \frac{1}{M_r} \sum_{i=1}^{M_r} \sin \varphi_i,$$

де M_r – обсяг вибірки r , $M_r = T_D m = T_r = kT$;

k – кількість періодів, $k = 1, 2, 3, \dots$

Більші значення векторів r вказують на меншу дисперсію для випадку наявності сигналів і більшу – де сигналу немає. Отже, за значеннями r можна виявляти корисні сигнали у ЗТ. Дійсно, різниця ФХС ЗТ виду (2.7) і фази гармонічного сигналу з заданою частотою f визначається на інтервалі $[0, 2\pi)$ як

$$\Delta\varphi[j] = (\varphi[j] - (2\pi f j T_D)) \pmod{2\pi}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Ознакою присутності чи відсутності сигналу є зміна значень $\Delta\varphi[j]$, а отже, і значень результуючої довжини вектора r , що дозволяє виділити сигнали навіть на фоні значних завад [14]

Визначення вибіркової результуючої довжини вектора r (далі – статистика r) доцільно виконувати в кожному режимі з метою оцінки її поточних значень.

2.4. Висновки до розділу

Отже, у цьому розділі було представлено загальну методику за якою буде відбуватися ЗТ.

А саме, це структурна схема системи для отримання сигналу. Так як, система призначена для вимірювання товщини в матеріалах зі значним

згасанням УЗ-хвилі постає задача визначення товщини за низького значення відношення сигнал/шум.

Тому, було розглянуто теоретичні основи використання статистичних даних, що дають можливість визначити інформативну складову сигналу та підвищити точність проведення контролю. Метод ґрунтується на використанні перетворення Гільберта, визначення амплітудної та фазової характеристик сигналу. Базуючись на отриманих статистичних даних, побудова г-статистик у полівіконному режимі роботи.

Один зі шляхів розвитку луна-імпульсного методу УЗТ пов'язаний з визначенням і використанням для товщинометрії особливостей фазової характеристики інформативних сигналів. Використання ФХС відкриває нові можливості аналізу сигналів УЗТ, зокрема дозволяє застосовувати до ФХС методи статистичної фазометрії, узгоджені з кутовою природою ФХС.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛУ

3.1. Загальна методика моделювання

Для початку представимо графічним способом програмні операції завдяки блок-схемі, що зображена на рисунку 3.1

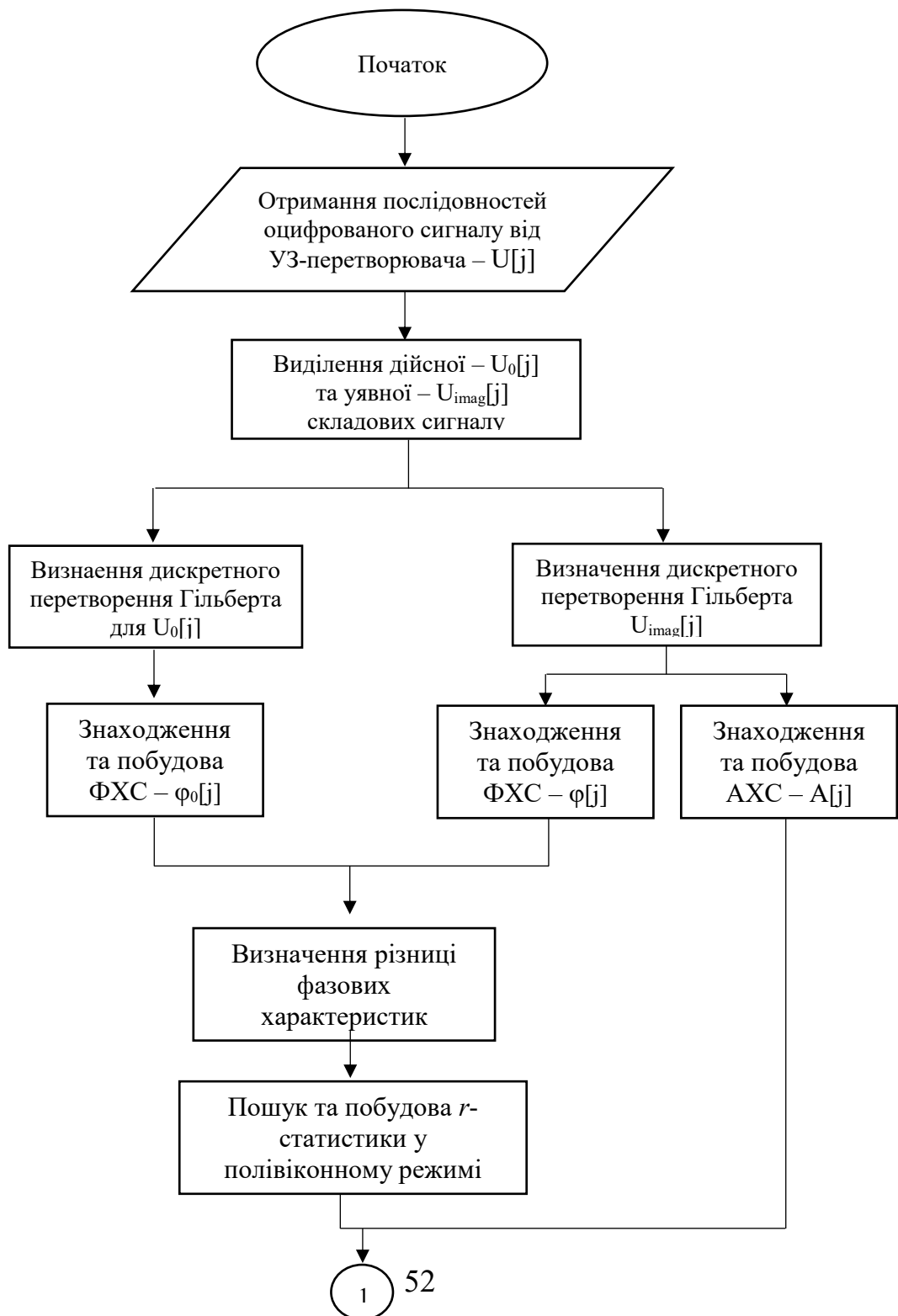




Рис. 3.1 – Методика проведення опрацювання сигналу

Після того, як сигнал пройшов етапи вказані у розділі 2.3 він потрапляє до комп'ютеру та починається програмне опрацювання.

Отже, отриманий сигнал від ПЕП у вигляді цифрових відліків потрапив на ПК . Далі на базі програмного забезпечення виконується дискретне перетворення Гільберта. Що дає можливість отримати гільбер-образ сигналу та визначити амплітудну та азові характеристики сигналу.

Формуємо різницю між двома фазовими характеристиками сигналів, що дорівнюватиме поточному значенню фазового зсуву сигналів.

Після того пошук r -статистики у полівіконному ковзному режимі. Порівняльний аналіз АХС та ФХС, візуалізація опрацьованих значень. Опрацювання похибки отриманих результатів ультразвукової товщинометрії.

3.2. Підготовка даних для моделювання

Для початку моделювання постала задача погодити параметри досліджуваних сигналів і режимів збору інформації між собою. До перших відносяться: тривалість та форма імпульсів, частота несучої, та ін. Режими збору інформації – це такі параметри, як: тип та тривалість вікна, час

дискретизації, час аналізу, період квантування та ін. Дані параметри впливають на результати дослідження процесу ультразвукового вимірювання товщини виробів. Тому, для зменшення впливу, погоджуємо параметри.

Перший етап моделювання складається з формування послідовності радіоімпульсів. Параметри сигналу приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри сигналу.

Назва	Умовне позначення	Числове значення	Одиниці вимірювання
Рівень сигналу	U	1	В
Частота сигналу	f	$5 \cdot 10^6$	Гц
Період дискретизації	T_D	$6.25 \cdot 10^{-09}$	с
Відношення сигнал/шум	η	≥ 1	
Кількість періодів сигналу-носія в одному радіоімпульсі	N_s	5	
Кількість відліків на період сигналу-носія	N_1	32	
Загальний розмір вибірки	N_Σ	5000	

За основу було обрано гармонійний сигнал, о зображено на рис. 3.2.

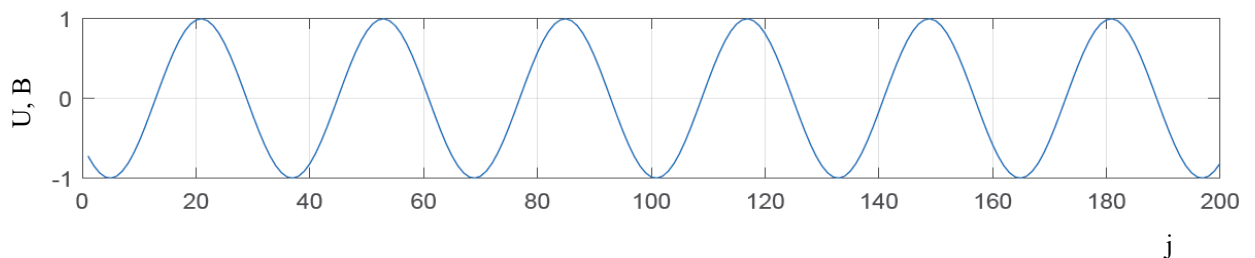
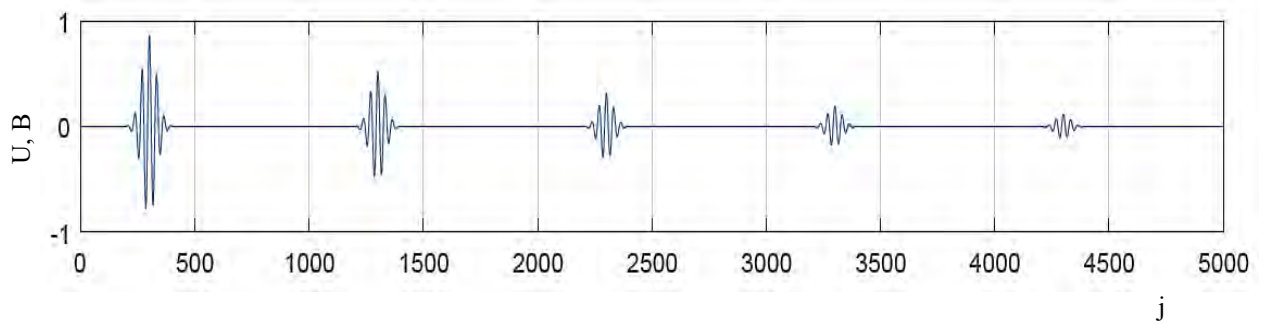
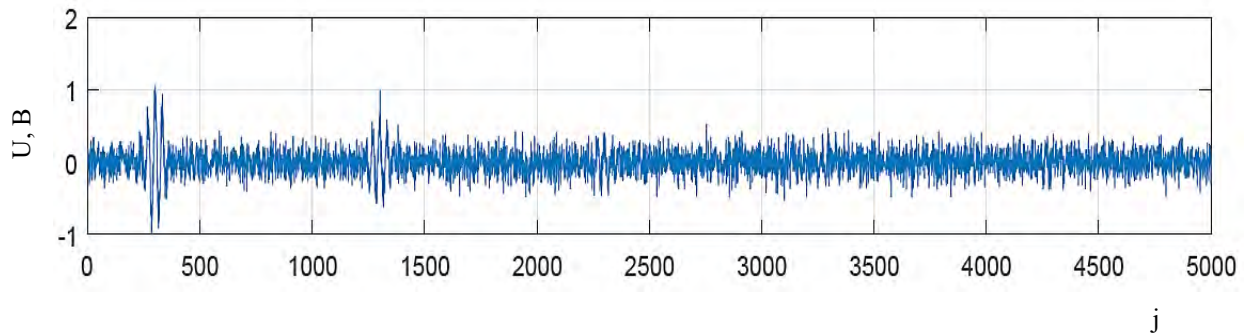


Рис. 3.2 – Графік гармонійного сигналу

На основі сигналу зображеному на рис. 3.2 було сформовано послідовність радіоімпульсів, що був проаналізований за функцією - $\{u[j], j = 1, N\}$. Отриманий сигнал має експоненційний коефіцієнт затухання, та згенерований випадковий шум накладений на сигнал (рис. 3.3).



а



б

Рис. 3.3 – Послідовність гаусових імпульсів (а),
послідовність радіоімпульсів з додаванням шуму (б).

Наступним етапом стало отримання гільберт-образу даної послідовності імпульсів. Для цього було застосовано дискретне перетворення Гільбурта. Основною задачею цього перетворення є отримання певної вибірки значень амплітудної та фазової характеристик сигналів. За результатами перетворення буде проведено порівняльний аналіз застосування АХС та ФСХ для задачі вимірювання товщини в виробках з високим рівнем загубленості прийнятого сигналу.

З метою порівняння амплітудного та фазового методів для зашумленого сигналу визначалась дискретна амплітудна характеристика сигналу, яка розраховувалась за формулою:

$$A[j] = \sqrt{u^2[j] + \hat{u}^2[j]}, \quad (3.1)$$

де $\hat{u}[j]$ – дискретне перетворення Гільберту сигналу $u[j]$.

На рис. 3.4 приведено графіки АХС без шуму і за наявності в сигналі адитивного гауссового шуму.

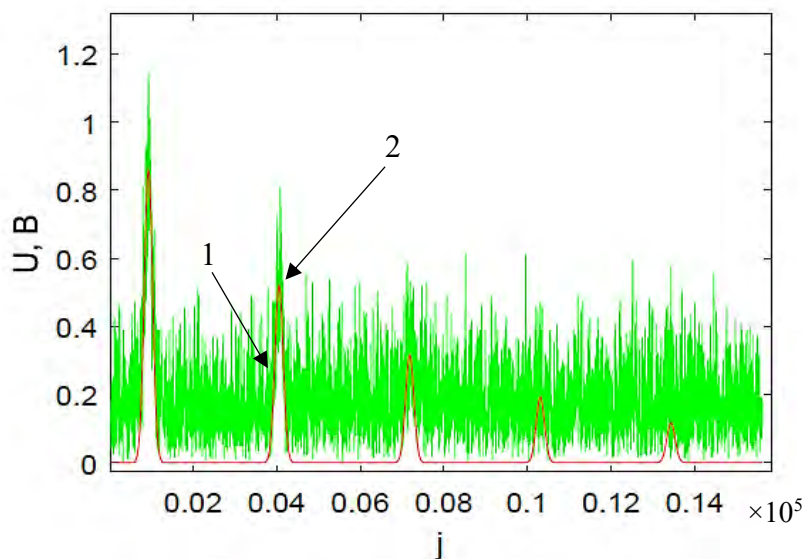


Рис. 3.4 – Графіки АХС без шуму - обвідної: 1 – для $u[j]$; і за наявності в сигналі адитивного гауссівського шуму - 2 – для адитивної суміші $u[j]$.

Рисунок 3.4 вказує на те, що розпізнання донних сигналів за наявності шуму за результатами АХС є не достовірним. В такому разі є необхідність перевірити ефективність застосування статистичний аналіз фазової характеристики сигналу (ФХС) для виявлення сигналів.

Рішення про наявність корисного сигналу будемо формувати за поточними значеннями результуючого вектору $r[j]$, отриманими в результаті статистичної обробки значень $\Delta\varphi[j]$. Визначення $r[j]$ виконується в ковзному режимі, обсяг усереднення і тривалість часового вікна виберемо однаковими і рівними M_r .

Графічне зображення перетворення Гільберта сигналу та суміші сигналу з шумом наведено на рисунку 3.5.

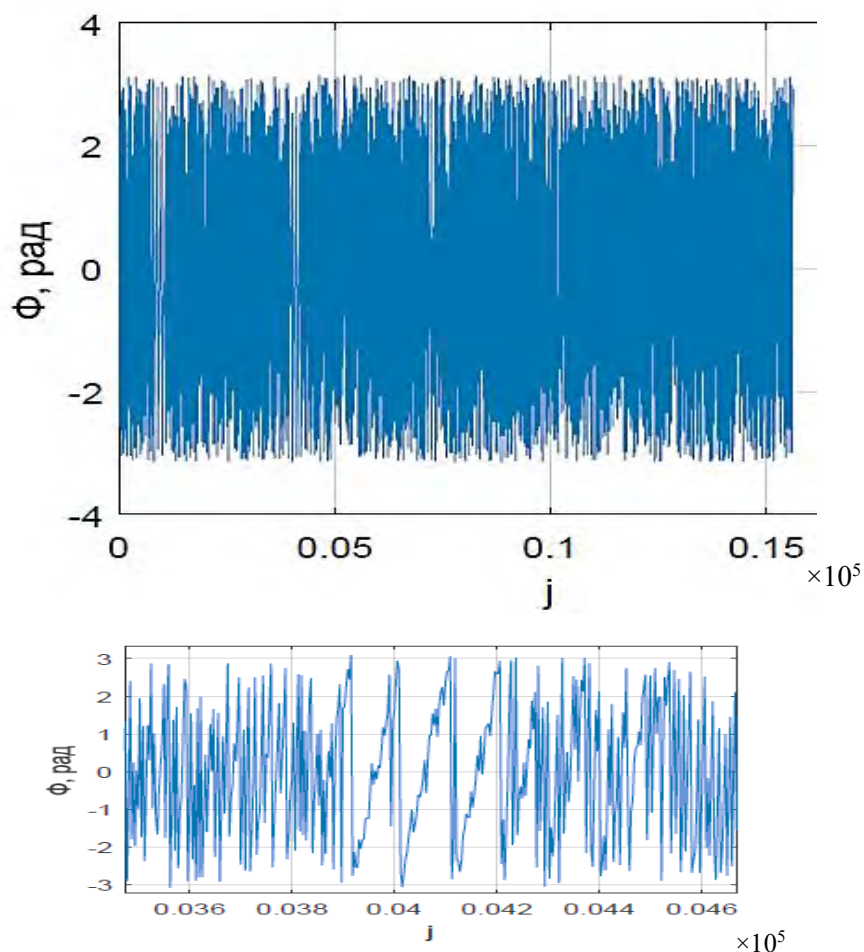


Рис. 3.5 – Фазова характеристики сигналу та суміші сигналу з шумом, за результатами ДПГ

Як видно з графіка, визначення $\varphi[j]$ супроводжується суттєвим впливом шуму, в результаті чого ФХС стрибкоподібно змінюється на величину 2π з частотою, що значно перевищує частоту гармонічного сигналу УЗТ.

Рисунок 3.5 вказує на те, що на ділянці існування радіоімпульсу, дробова частина ФХС має регулярний характер (покажимо це є для зондуючого імпульсу, для двох донних імпульсів дана закономірність не є настільки явною, але присутня). Визначення дробової частини різниці ФХС на ділянках, де присутні сигнали УЗТ, дає сталу величину, і дозволяє за оцінкою її вибіркової результуючої довжини визначити часове положення радіоімпульсу.

Отже, можна зробити проміжний висновок того, що ФХС дозволяє отримати більш достовірний результат контролю.

Наступним кроком, після аналізу АХС та ФХС була побудована розгортка фазових характеристик сигналів окремо та різниці даних фазових характеристик (рис.3.6)

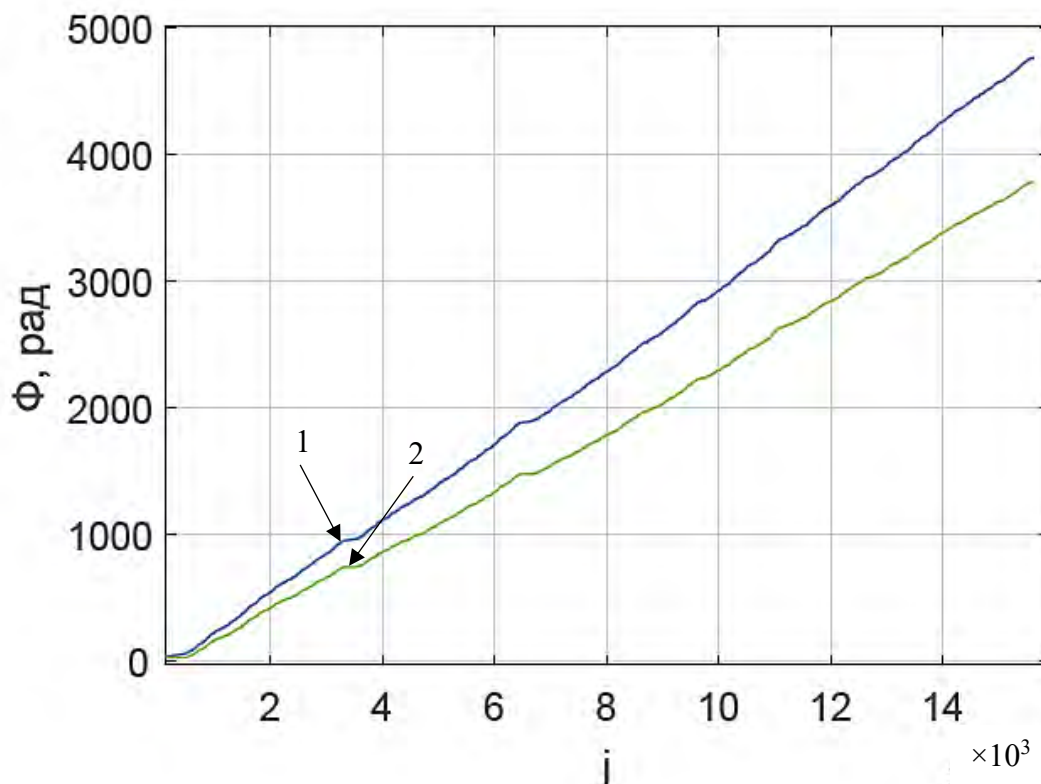


Рис. 3.6 – Дискретна фазова характеристика зашумленого сигналу (1), різниця фазових характеристик (2)

Для більш інформативного відображення результату виділимо одну з ділянок, даний фрагмент зобразимо на рисунку 3.6.

Після ого можемо спостерігати, що тих ділянках де присутній інформативний сигнал фаза має рівномірний характер збільшення. З графіку можна побачити, що фаза шуму не впливає на загальну картину.

Тому, різниця ФХС та фазової характеристики адитивної суміші сигналу з шумом результаті дає сталі значення фази. Ця закономірність спостерігається на ділянках корисного сигналу.

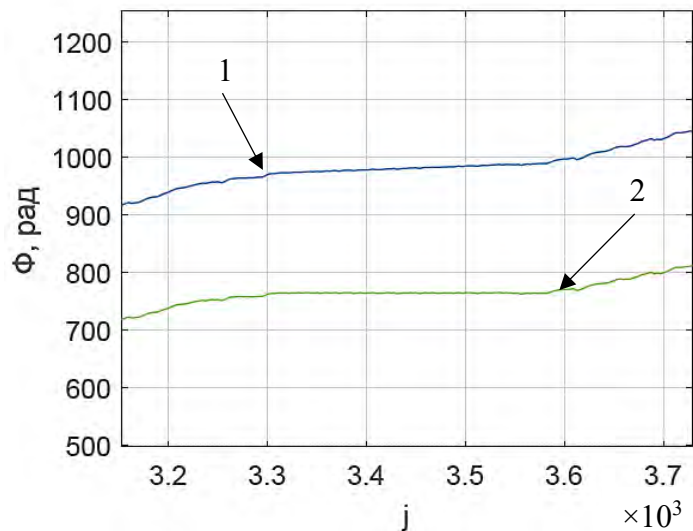


Рис. 3.7 – Ділянка фазової характеристики зашумленого сигналу (1) та різниця фазових характеристик (2)

3.3. Моделювання процесу отримання r -статистики за результатами аналізу ФХС у ковзному режимі

Наступний пункт роботи ґрунтується на проведенні віконної обробки в ковзному режимі. За основу було взято прямокутне вікно апертурою M_w . Результат віконної обробки – це побудова r -статистики (рис. 3.8). На рисунку показано графіки вибіркової результуючої довжини r для різних значень апертури вікна M_r .

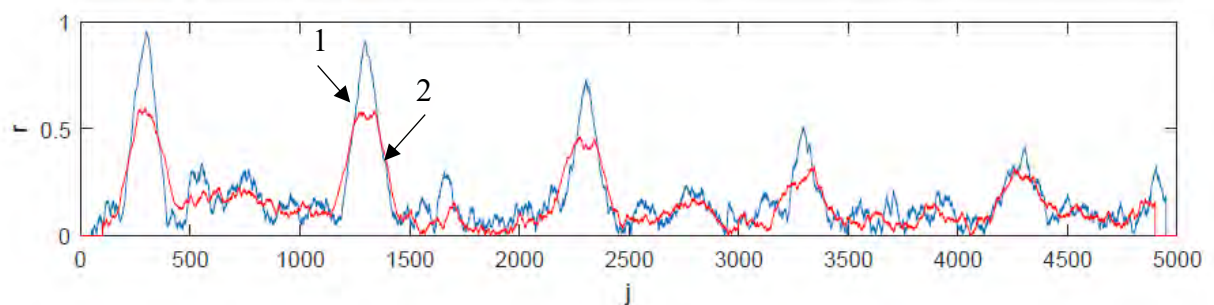


Рис. 3.8 – Графіки функцій $r[j]$ для $M_{r1} = 80$ (крива 1) і $M_{r2} = 180$ (крива 2)

Графік зображений на рисунку 3.8 дає зрозуміти, що апертура вікна впливає на вибірку значення r -статистики. При цьому значення апертури вікна

впливає на отримані в результаті вибірки значень r -статистики. Тому, з метою отримання аналізу впливу апертури віконної функції розрахунок r -статистики проводився для різних значень апертури вікна, було обрано два вікна апертурою $M_{r1} = 80$ та $M_{r2} = 180$.

Після цього для зменшення впливу шумів було запропоновано виконати перемноження характеристик. В результаті ого було отримано графік добутку r -статистик, що зображено на рисунку 3.9.

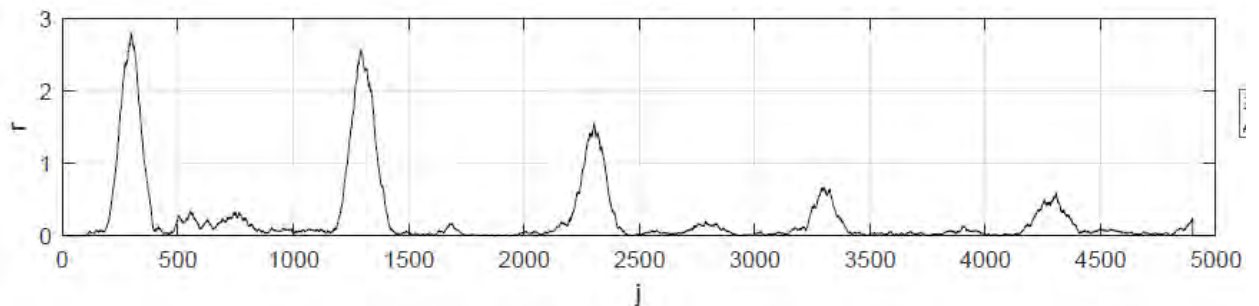


Рис. 3.9 – Графіки добутку функцій $r[j]$ для $M_{r1} = 80$ і $M_{r2} = 180$

Провівши аналіз результатів r -статистики при використанні двовіконного режиму було прийнято рішення додати ще один масив значень r -статистики. Для третього вікна було обрано апертуру вікна $M_{r3} = 120$ так як це являється усереднюючим, проміжним званням між M_{r1} та M_{r2} .

Результат цього перетворенн можна спостерігати на рисунку 3.10, та провести порівняльний аналіз з рисунком 3.9.

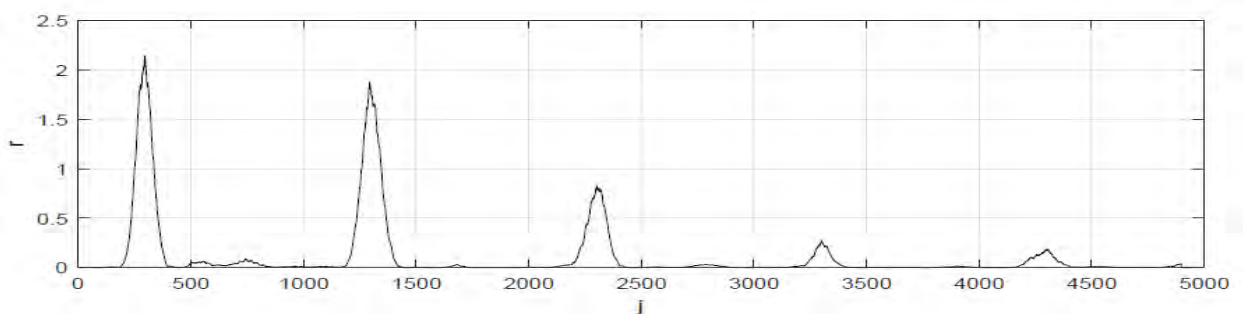


Рис. 3.10 – Результат добутку функцій $r[j]$ трьох вікон апертурою M_{r1} , M_{r2} і M_{r3}

З рис. 3.10 видно, що використання фазової обробки є ефективним в задачах виявлення донних сигналів УЗТ на фоні значних завад, і дає

можливість визначити часове положення донних сигналів при відношенні С/Ш рівному і меншому за 1. В даному експерименті відношення С/Ш визначалось як відношення пікових значень донного сигналу до σ (для першого донного сигналу відношення С/Ш = 1, для другого донного сигналу відношення С/Ш = 0,1). Використання вікон різної тривалості M_r дає додаткові можливості для підвищення точності визначення місця знаходження донних сигналів УЗТ.

Таким чином, даний спосіб дозволяє знайти послідовність затухаючих донних сигналів в присутності шумів, визначити затримку в часі $\tau_{1,z}$ між першим і z -тим донним імпульсами і за рахунок цього зменшити середньоквадратичну похибку визначення часового інтервалу $\tau = \frac{\tau_{1,z}}{z-1}$ в $\sqrt{z-1}$ разів.

Статистика r дозволяє визначити місце знаходження сигналу, але достовірність знаходження донного сигналу залежить від порогового рівня Π , який визначається з заданою ймовірністю. Питання достовірності визначення статистики r , вибору порогового рівня Π та дослідження законів розподілу статистики r досліджені в наступному розділі.

3.4. Висновки до розділу

Перетворення Гільберта дозволяє визначити фазові характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії і оцінити як їх інтегральні зміни на всьому інтервалі дослідження, так і зміни в межах одного періоду сигналу.

Ковзний режим визначення ФХС доцільно використовувати при значних обсягах вибірки $n > 2^{10} \div 2^{13}$, або коли обробку сигналу необхідно виконувати неперервно протягом певного інтервалу часу. Даний спосіб дозволяє отримати дискретні ФХС по мірі надходження даних, тобто, в реальному часі.

Узгодження параметрів досліджуваних сигналів і параметрів збору інформації дозволяє додатково підвищити точність вимірювань. Починаючи з

вибірок об'ємом більше 1200 абсолютна похибка визначення фазового зсуву сигналів не перевищує 0,1 рад.

У випадку апріорно невідомих параметрів сигналів УЗТ зменшення методичної похибки визначення дискретних ФХС можливе за рахунок використання віконної обробки досліджуваних сигналів. Додаткове підвищення точності оцінки ФХС можливе у випадку застосування подвійної віконної обробки сигналів, тобто, коли крім зовнішнього вікна доцільно застосовувати внутрішнє (прямокутної форми) вікно відбору даних. Тривалість останнього st визначається як необхідною точністю визначення ФХС, так і співвідношенням тривалості зовнішнього вікна до періоду досліджуваних сигналів і вимогами до швидкодії вимірювань за даним методом.

Визначення часового положення донних сигналів УЗТ в адитивній суміші із гауссівським шумом можливе на основі аналізу вибіркової результуючої довжини вектора r . Значення статистики r дає змогу впевнено виявляти донні сигнали УЗТ: на ділянках, де досліджуваний сигнал присутній, значення статистики r збільшуються, а де сигнал відсутній – зменшуються. Виявлення сигналів потребує реалізацій ковзного режиму аналізу фазових даних і визначення поточних значень статистики r .

Результати моделювання свідчать про можливість виявлення корисних сигналів на фоні адитивної завади при відношенні С/Ш меншим за 1 при використанні додаткової статистичної обробки ФХС досліджуваного сигналу.

Достовірність виявлення донних сигналів УЗТ за статистикою r потребують дослідження законів розподілу цієї статистики.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ СИСТЕМИ

4.1. Обґрунтування елементної бази для реалізації вимірювального підсилення

Вимірювальний підсилювач – вимірювальний пристрій, призначений для формування на своєму виході сигналу, що функціонально зв'язаний із сигналом вимірюваної інформації на вході[6].

Неінвертуючим називається підсилювач, у якому знак (фаза) вихідного сигналу рiна вхідному (- інвертуючий вхід; + неінвертуючий вхід). Принцип дії неінвертуючого підсилювача зображено на рисунку схеми 4.1.

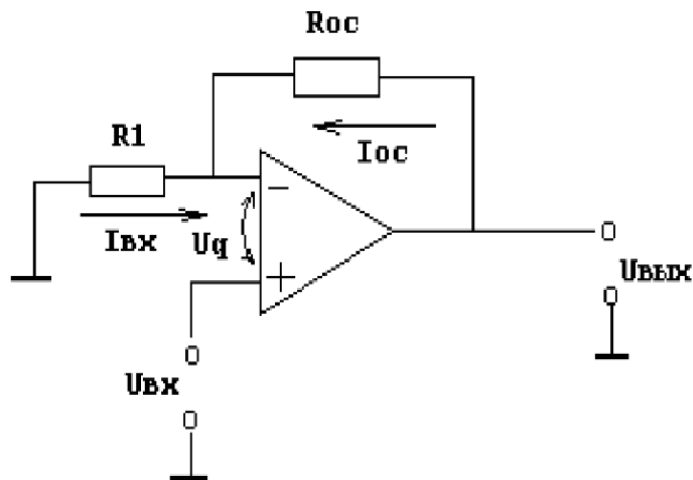


Рис. 4.1 – Схема неінвертуючого операційного підсилювача

Резистори визначають коефіцієнт підсилення:

$$K_U = \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.1)$$

де, K_U – коефіцієнт підсилення.

Як можна побачити з формули 4.1, коефіцієнт підсилення залежить від підбору значень номіналу опору резисторів.

З метою кращого підсилення сигналу та зменшення впливів шумів та згасання у самому операційному підсилювачі, було прийнято рішення розділити підсилення на два каскади.

В такому випадку загальний коефіцієнт підсилення сигналу буде визначитися як добуток за формулою:

$$K_{U\Sigma} = K_{U1} \cdot K_{U2} \quad (4.2)$$

Блок підсилення побудовано на двох операційний підсилювач серії LT1818, що має задовільні характеристики до завдання системи. Залежність K_U від частоти можна спостерігати на рисунку 4.2.

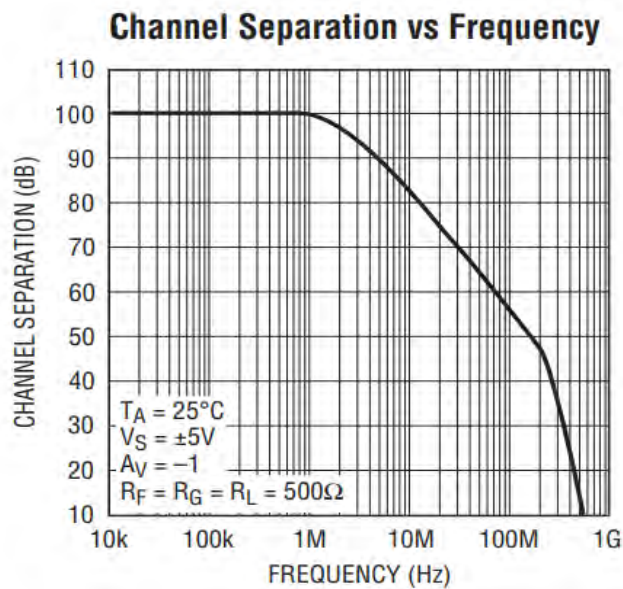


Рис. 4.2 – Графік залежності коефіцієнта підсилення від частоти для LT1818

За необхідності забезпечення підсилення у 90 разів, запропонований підсилювач зможе задовільнити.

Підбір значень номіналу опору здійснюється з урахуванням співвідношення 4.1:

Підбираємо $R_2 = 5 \text{ кОм}$, $R_1 = 1 \text{ кОм}$.

$$K_{U1} = \frac{5000}{1000} = 5$$

Підбираємо $R_4 = 5 \text{ кОм}$, $R_3 = 1 \text{ кОм}$.

$$K_{U2} = \frac{5000}{1000} = 5$$

Загальне значення коефіцієнту підсилення становитиме:

$$K_{U\Sigma} = K_{U1} \cdot K_{U2} = 5 \cdot 5 = 25$$

4.2. Обґрунтування вибору АЦП

Аналого-цифровий перетворювач важливий пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал в дискретний код (цифровий сигнал).

Як правило, АЦП – електронний пристрій, що перетворює напругу в двійковий цифровий код [15]. Для аналізу при виборі АЦП необхідно задатися значеннями U_{max} – максимум амплітуди та діапазон максимуму та мінімуму сигналів з виходу первинного перетворювача, відповідно – x_{max} , x_{min} .

Для узгодження діапазонів вихідних сигналів з перетворювача із діапазоном оцифрування АЦП розраховується за співвідношенням:

$$Ku \leq \frac{U_{\text{ацп}}}{x_{max}}$$

З урахуванням коефіцієнту підсилення можна визначити мінімальне значення сигналу на вході АЦП за формулою:

$$X_{min} = Ku \cdot x_{min}$$

Задаємося складовою похибки АЦП: похибка має бути не більшою за 1% це була регламентовано умовою технічного завдання.

$$\delta_{xm} = \frac{Q}{X_{min}} \rightarrow Q = \frac{\delta_{xm} \cdot X_{min}}{100\%}$$

де, δ_{xm} – граничне значення похибки перетворення;

X_{min} – номінальне значення напруги.

Тоді крок квантування розраховується за формулою:

$$q_{\text{ацп}} = \left[\log_2 \left(\frac{U_{\text{ацп}}}{Q} \right) \right] + 1$$

Позначимо $U_{\text{max}} = 1$ В, діапазон сигналів з виходу первинного перетворювача $x_{\text{max}} = 17,85$ мВ, $x_{\text{min}} = 4,92$ мВ.

Розрахуємо коефіцієнт підсилення для узгодження діапазонів сигналів з виходу перетворювача з діапазоном оцифрування АЦП:

$$Ku \leq \frac{U_{\text{ацп}}}{x_{\text{max}}} = \frac{2}{80 \cdot 10^{-3}} = 25$$

Розрахуємо мінімальне значення сигналу на вході АЦП з урахуванням коефіцієнту підсилення:

$$X_{\text{min}} = Ku \cdot x_{\text{min}} = 25 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,25$$

Задаємося складовою похибки АЦП: похибка має бути не більшою за 1% це була регламентовано умовою технічного завдання.

$$\delta_{xm} = \frac{Q}{X_{\text{min}}} \rightarrow Q = \frac{\delta_{xm} \cdot X_{\text{min}}}{100\%}$$

$$Q = \frac{\delta_{xm} \cdot X_{\text{min}}}{100\%} = 0,01 \cdot 0,25 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Розрахуємо крок квантування:

$$q_{\text{ацп}} = \left[\log_2 \left(\frac{U_{\text{ацп}}}{Q} \right) \right] + 1 = \left[\log_2 \left(\frac{2}{2,5 \cdot 10^{-3}} \right) \right] + 1 = 9 + 1 \approx 10$$

Згідно до розрахунків АЦП, що необхідний для відцифрування аналогового сигналу було обрано АЦП серії LTC2238 (Рис 4).

Основні технічні характеристики мікросхеми:

- a) Частота дискретизації: 65Msps.
- b) Напруга живлення 3 В (від 2,7 до 3,4 В)
- c) Низька потужність: 205 мВт / 120 мВт / 75 мВт
- d) SNR 61,8 дБ
- e) 85 дБ SFDR
- f) Немає пропущених кодів

- g) Гнучкий вхід: від 1VP-P до 2VP-P
- h) Пропускна здатність 575 МГц, повна потужність S / H
- i) Стабілізатор робочого циклу годин

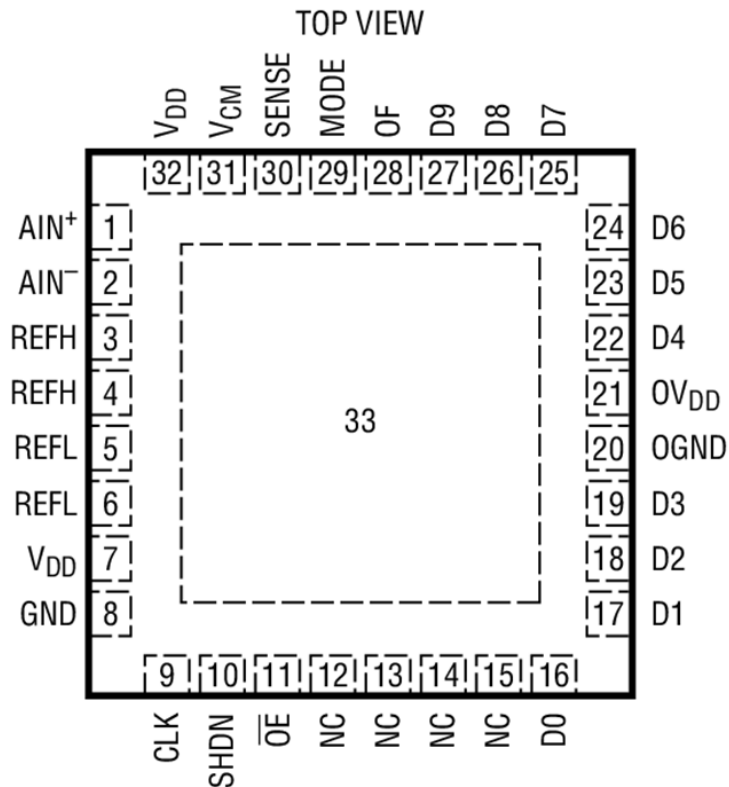


Рис. 4.3 – АЦП серії LTC2238

4.3. Обґрунтування елементної бази для реалізації блоку управління

Мікроконтролер або однокристална мікроЕОМ – виконана у вигляді мікросхеми спеціалізована мікропроцесорна система, що включає мікропроцесор, блоки пам'яті для збереження коду програм і даних, порти вводу-виводу і блоки зі спеціальними функціями (лічильники, компаратори, АЦП та інші).

Було обрано мікроконтролер AT32UC3A0512, характеристики мікроконтролера описані нижче:

- Високоєфективний, малопотужний, 32-розрядний
- Тактова частота до 66 МГц (продуктивність 1.24 DMIPS / МГц)

- Блок захисту пам'яті
- Багаторівнева шинна система
- Високоєфективна передача даних по окремим шинам для збільшення продуктивності
- 15 канальний ПДП периферійних пристроїв для автоматичної передачі даних
- Внутрішня високошвидкісна флеш-пам'ять
- Опціонально: 512 кбайт.
- Однотактний доступ на частоті до 30 МГц
- Частота роботи 66МГц
- 100 тисяч циклів запису, зберігання даних протягом 10 років.
- Біти захисту флеш-пам'яті і визначається користувачем конфігураційна область
- Вбудоване високошвидкісне статичне ОЗУ, однотактний доступ при максимальній тактовій частоті[16]

4.4. Висновки до розділу

Запропоновано схеми основних функціональних вузлів необхідних для реалізації автоматизованої системи ультразвукової товщинометрії. Представлено такі вузли: підсилювальний блок сигналу, АЦП, та блок управління системою.

В процесі вибору керувались необхідністю задовольнити вимоги заданої системи, зокрема і діапазон робочих частот. Наведено необхідні відомості для обґрунтованого вибору основних параметрів АЦП на які можна спиратись при виборі його типу. Пропонується привести данні для оцінки вірогідності контролю для повномірної оцінки системи .

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ

5.1. Теоретичні засади розрахунку

За мету даної магістерської дисертації було поставлено створення ультразвукової системи з високою точність проведення контролю, а тому похибка повинна не перевищувати 1%.

Системна похибка, зумовлена властивостями використовуваних вимірювальних компонентів. Похибка кожного конкретного приладу є систематичною, але її значення звичайно невідомо, а значить, її неможливо виключити введенням в результат вимірювання відповідної поправки. У паспорті приладу прийнято вказувати межі допустимої похибки, що означає максимально можливу похибку при рекомендованих умовах роботи приладу [16].

Вірогідність визначаємо, як $R = 100 - P_{ном}$, де $P_{ном}$ – сумарна похибка розробленої системи.

Сумарна похибка даної системи визначається двома складовими: сумарною інструментальною адитивною та сумарною інструментальною мультиплікативною похибками. Інструментальна похибка складається із похибки пристрою сполучення, похибки дискретизації та похибки квантування АЦП плати інтерфейсу.

Згідно розрахунків, приведена похибка дискретизації $\gamma_{дискр} = 1\%$.

Абсолютна похибка квантування АЦП визначається наступним виразом:

$$\delta_{квант} = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^N}$$

де U_{max} та U_{min} – граничні значення діапазону вимірювання АЦП, N – кількість розрядів квантування АЦП. U_{min} дорівнює нулю для вибраного АЦП.

$$\delta_{квант} = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^N} = \frac{2}{2^{10}} = 1.95 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Приведена похибка квантування АЦП визначається наступним виразом:

$$\gamma_{\text{квант}} = \frac{\delta_{\text{квант}}}{U_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{1.95 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 100\% = 0.09\%$$

Наведені похибки АЦП є адитивними.

Якщо час проходження ультразвукового сигналу через шар рідини входить у вимірювальний інтервал, сам вимірювальний інтервал збільшиться на величину:

$$\Delta\tau_1 = 2 \cdot \frac{h_p}{C_p} = 2 \cdot \frac{0.075 \cdot 10^{-3}}{1500} = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ (с)}$$

де C_p – швидкість звуку в контактній рідині (вода); h_p – товщина шару контактної рідини

Відносна похибка за рахунок проходження через контактну рідину:

$$\gamma_{\text{конт}} = \frac{\Delta\tau_1}{\tau_{\text{вим}}} \cdot 100\% = \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0.01\%$$

В ультразвуковій товщинометрії для контролю використовується, як правило, радіоімпульс. Тому, залежно від амплітуди сигналу і положення порогового рівня відлік часового інтервалу може дискретно зміститися на цілий період несучої частоти.

Сумарна абсолютна похибка формування вимірювального інтервалу складає: $\Delta\tau_1 = \pm|x_1 - x_2| \cdot T$ і за певних умов може бути доведена до нуля.

$$\Delta\tau_1 \leq \pm x \cdot T$$

де x – визначено за більшим із значень x_1 або x_2

При вживанні певних заходів до обробки сигналу можна зменшити x до значення 0.1. Тоді мінімальна похибка формування інтервалу складе:

$$\Delta\tau_2 \leq \pm 0.1 \cdot T = \pm \frac{0.1}{5 \cdot 10^6} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ (с)}$$

З урахуванням того, що максимальна швидкість УЗК становить 10^4 м/с, а мінімальна товщина ОК – 2 мм відносно значення похибки виділення часового інтервалу не перевищуватиме значення:

$$\gamma_{\text{ч}} = \frac{\Delta\tau_2}{\tau_3} \cdot 100\% = \frac{0,02 \cdot 10^{-6}}{0,4 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 0,5\%$$

Згідно значенням з даташиту задамося похибкою мікроконтролера – 10 мкВ, що рівна $\Delta_{\text{МК}} = 10$ мкВ.

Розрахуємо відносну похибку мікроконтролера :

$$\gamma_{\text{МК}} = \frac{1}{2^{32}} \cdot 100\% \approx 0\%$$

Сумарна похибка контролю складає :

$$P_{\text{пом}} = \gamma_{\text{квант}} + \gamma_{\text{конт}} + \gamma_{\text{ч}} = 0,09 + 0,01 + 0,5 = 0,6\%$$

5.2. Приклад розрахунку похибки вимірювання товщини ОК з матеріалу зі значним згасанням

Також було приведено розрахунок похибки яку утворює робота програми, результати якої наведено у розділі 3.

Отже було проведено експериментальне дослідження 10 запускі програми. З масиву даних отриманих завдяки застосуванню r -статистики було побудовано графік, зображений на рисунку 5.1. Для визначення значень вимірювань було обрано пороговий рівень рівний 0.2.

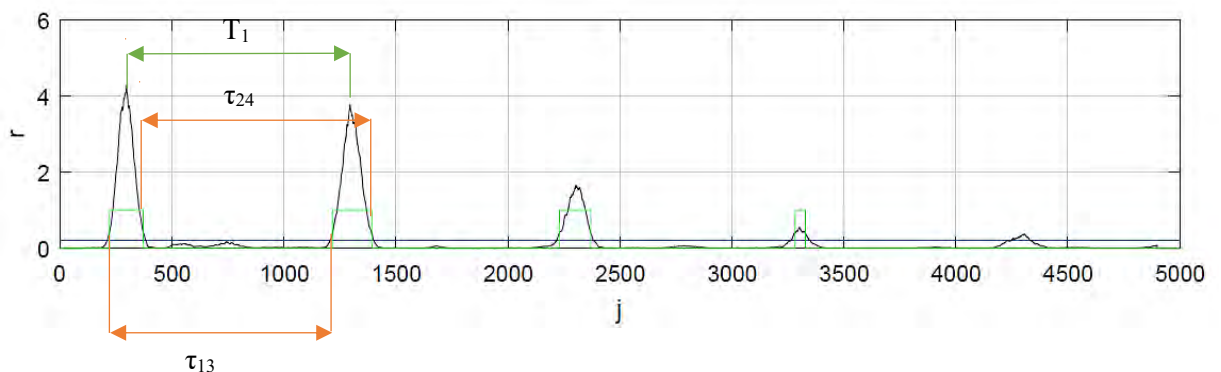


Рис. 5.1 – Встановлення порогового рівня для знаходження товщини

Визначення відстані було проведено за порівняльним аналізом різниці між передніми та задніми фронтами сигналу, а саме:

$$T_1 = \frac{\tau_{13} + \tau_{24}}{2}$$

За такою методикою було проведено розрахунок між першим та другим, другим та третім, третім та четвертим імпульсом, та отримано значення приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати модельних досліджень

№	Інтервал вимірювання		
	між 1 и 2 імпульсом	між 2 и 3 імпульсом	між 3 и 4 імпульсом
1	997	1002,00	1000,00
2	1001,00	997,50	1005,50
3	998,00	998,00	1005,50
4	1002,00	1001,00	998,50
5	998,00	998,00	996
6	999,00	995,00	1005
7	1000,50	999,00	996,00
8	996,00	1000,00	999
9	997,50	999,00	1002,50
10	1000,00	998,50	1005,00
Σ	998,90	998,80	1001,30

Для цих значень було проведено аналіз згідно співвідношення с/ш та середньоквадратичного відхилення (у кількості періодів дискретизації) для кожного масиву значень з визначених інтервалів, результат представлено на рисунку 5.2.

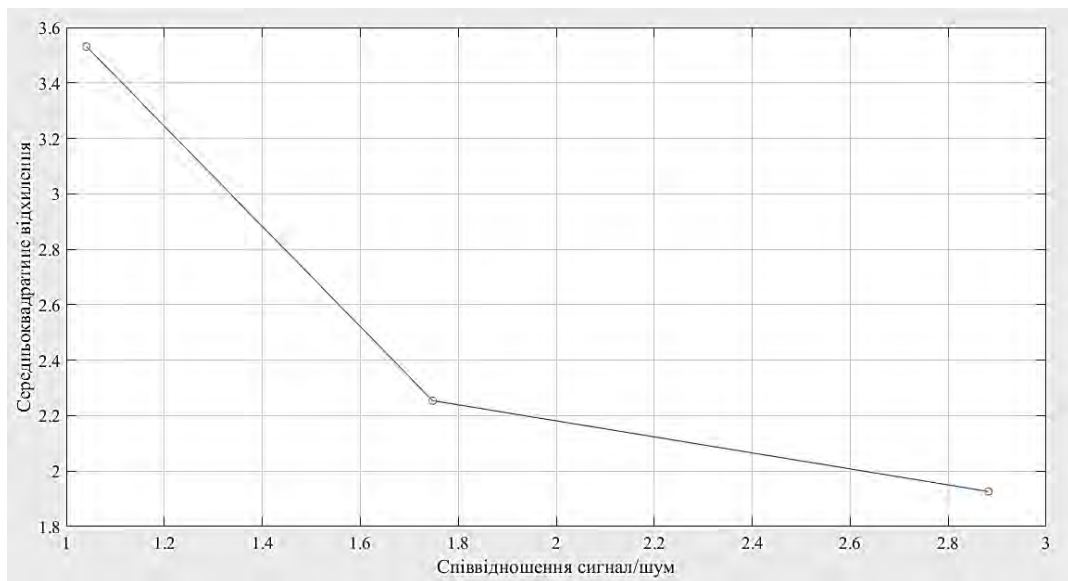


Рис. 5.2 – Залежність співвідношення с/ш від СКВ сигналу

З даного графіка можна побачити та переконатися, що значення отримані між 1 та 2 імпульсами маю знано менше значення СКВ, це вказує на знано вищу точність проведення контролю ніж у випадку вимірювання інтервалу між 3 та 4 імпульсами. Так як показник середньоквадратичного відхилення в цьому разі сягає значення майже вдвічі більшого.

Якщо прийняти гіпотезу про гаусовий розподіл похибки вимірювання часового інтервалу, тот довірчий інтервал для імовірності 0,95 становитиме 2σ .

Наприклад, для відношення $c/w = 1,04$:

$$\Delta_d = 2 * n * T_s = 2 * 3,55 * 6,25 * 10^{-9} = 44 \text{ (нс)}$$

5.3. Висновки до розділу

В даному розділі магістерської дисертації було проведено розрахунок апаратної похибки проведення ультразвукового луно-імпульсного вимірювання товщини. Було отримано значення похибки, що не перевищує допустимий рівень, а саме 0,6%. Це невеликий показник, за його наявності контролю буде мати високий показник точності.

Наступним кроком стала перевірка точності роботи програми, було проведено моделювання, визначення порогового для значень t -статистики. Шляхом проведення десятиразового запуску програми були отримані результати вимірюваних інтервалів. Розрахункове значення довірчого інтервалу для рівня 0,95 рівний 0,44 нс.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «УЗТ-1010»

Метою даного розділу є проведення маркетингового аналізу стартап-проекту для визначення можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. [19]

Ідея проекту полягає в тому, щоб підвищити точність контролю деталей із конструкційних матеріалів, що мають високий показник коефіцієнта згасання ультразвукової хвилі, а також прискорення процесу ультразвукового неруйнівного контролю із збереженням результатів контролю в електронному вигляді.

6.1. Опис ідеї проекту

Ідея стартап-проекту базується на системі ультразвукового неруйнівного контролю, що пропонує методом обробки інформації, який відрізняє від наявних аналогів на ринку підвищенням точності контролю.

З огляду на опис ідеї стартап-проекту опишемо інформаційну карту:

- назва – УЗТ 1010;
- автор проекту – Мороз Наталія;
- термін реалізації – до одного року;
- необхідні ресурси – технічні засоби, фінансові ресурси, команда людей для реалізації конструкційних, електротехнічних та програмних задач проекту, оренда приміщення;
- опис проблематики – стартап-проект вирішує задачу підвищення точності проведення ультразвукового контролю за рахунок впровадження в систему програмного забезпечення для обробки сигналів
- цільова аудиторія – промислові підприємства, що у процесі виробництва та експлуатації зобов'язані проводити контроль виробів високої точності;

– основні цілі - розробка нового алгоритму роботи системи для отримання результатів при проведенні ультразвукової товщинометрії, запуск проекту та впровадження його на український ринок.

Запропонована система має широкий сектор застосування для контролю товщини виробів з конструкційних матеріалів, хоча основний об'єкт контролю, на який вона орієнтована – матеріали з знаним згасання ультразвукової хвилі в ньому. Результат аналізу суті ідеї стартап-проекту наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Система ультразвукової товщинометрії для матеріалів зі знаним коефіцієнтом згасання.	1. Контроль товщини в виробах з конструкційних матеріалів.	Підвищена вірогідність контролю. Висока точність отриманого результату.
	2. Виявлення дефектів у процесі контролю товщини.	Можливість проведення повного контролю виробів.
	3. Широкий спектр промислових галузей виробництва та обслуговуючі підприємства	Зменшення об'єму виготовлення бракованих виробів.

Таблиця 6.1 дає цілісне уявлення про зміст ідеї та можливий розвиток на різноманітних ринках, для пошуку потенційних клієнтів. Основними напрямки застосування ідеї є використання у різних сферах промисловості, наприклад, автомобілебудування, літакобудування, воєнна промисловість та ін. Вимоги користувача ґрунтуються на підвищенні точності, а інколи і можливості, контролю виробів з матеріалів зі знаним згасанням і виключення впливу людського фактору на результати контролю.

Для більш наочної демонстрації переваг та недоліків даної системи контролю порівняємо параметри системи з деякими її аналогами, наявними на ринку.

Конкуренти:

Конкурент 1 – Автоматизована ультразвукова установка контролю «АУКП-250»

Конкурент 2 - Система автоматизованого ультразвукового контролю ROTOSCAN.

Конкурент 3 - Система ультразвукового контролю «US-50»

Табл. 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ n/n	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1.	Вартість, грн	20000	14000	32000	15000		+	
2.	Достовірність контролю, %	99%	97%	99%	98%			+
3.	застосування до широкого діапазону ОК	+	-	+	-		+	
4.	Максимальна товщина стінки виробу (мм)	250 мм	100 мм	230 мм	150 мм			+
5.	Збереження результатів контролю	+	-	+	-			+

Висновок: у даній таблиці визначено перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї; проведено попередній аналіз потенційних конкурентів, що вже існують на ринку, та визначено слабкі, нейтральні та сильні характеристики ідеї даного стартап-проекту. Однією із сильних сторін проекту є висока точність, можливість контролю габаритних виробів та швидке адаптивне опрацювання результатів.

6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В даному підрозділі проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, які наведено в таблиці (табл. 6.3):

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Система ультразвукової товщинометрії з підвищеною	Виготовлення на підприємстві на замовлення	Наявна	Доступна

2	точністю проведення контролю	Виготовлення складових елементів за допомогою 3D принтерів та ЧПУ станків	Наявна	Доступна
3		Електронна компонентна база	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: В якості оптимальної технології реалізації проекту обрано виготовлення складових елементів системи шляхом використання ЧПУ станків та 3D принтерів, при чому більшу частину складових частин буде виготовлено за допомогою станків ЧПУ, 3D принтери в свою чергу використовуватимуться для виготовлення елементів складної геометрії.				

Для реалізації конструкції, буде застосований фрезерний ЧПУ станок, на зразок – «ЧПУ-3018», що по своїм характеристикам задовільнить задачу для реалізації конструкції. Для реалізації деталей більш складної форми буде використаний 3D принтер – «Anycubic Prusa i3». Електронна база компонентів буде використана фірми – Atmel.

Висновок: результати технологічного аудиту ідеї проекту вказують на те, що реалізацію можливо здійснити завдяки використанню наявних на ринку технологій.

6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В цьому підрозділі визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту. Даний аналіз допоможе плануванню напрямкам розвитку проекту враховуючи такі критерії, як стан ринкового середовища, потреби потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Таблиця 6.4. збрала дані за характеристиками: наявність попиту, обсяг та динаміка розвитку ринку.

Табл. 6.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~1400000 грн.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні

5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Перевірка систем на стандартних зразках з метою підтвердження імовірності контролю/похибок вимірювання
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	83%

Висновок: ґрунтуючись на результатах таблиці 6.4. робимо висновок, що за попередньою оцінкою, ринок є привабливим для розвитку проекту.

Визначимо цільову аудиторію, якій можна запропонувати даний товар (табл. 6.5). Після чого сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної з груп клієнтів.

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
	Даний товар задовольняє потребу ринку в універсальній системі ультразвукової товщинометрії, що передбачає застосування для більшості конструкційних матеріалів.	Підприємства середнього розміру, які не мають коштів для придбання великої кількості вимірювальної апаратури та засобів неруйнівного контролю	Орієнтація на відносно недорогі універсальні напівавтоматичні засоби для вимірювання товщини виробів.	- до продукції: універсальність, надійність, висока тоність контролю - до компанії-постачальника: своєчасне виготовлення та надання продукції

Висновок: Наведена таблиця дає змогу оцінити цільову аудиторію та потреби до товару даного типу, визначили основні характеристики системи, які формують поведінку клієнтів відносно нашої системи, та визначили основні вимоги до системи.

Так як ринок приладів НК досить вузько направлений в Україні, він має певні особливості, які можуть стати на заваді при спробах ввести новий товар, але попри це ринок, і запропонований проект можуть надавати такі можливості, що сприятимуть швидкому введенню продукту на ринок.

Тому складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та фактори загроз (табл. 6.6, 6.7).

Табл. 6.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Проходження сертифікації обладнання для роботи на міжнародному ринку	Обмеження у виході на міжнародний ринок, зменшення продажів в результаті чого, втрата прибутку, у процесі проходження ресертифікації.	Відслідковувати необхідності сертифікації, для уникнення простою
2	Помилка в роботі програми	Виникає при різних умовах, які мають вплив в реальних умовах контролю	Наявність майстрів сервісного центру
3	Поява конкурентів	Зниження рівню продажів, зменшення існуючих та появи нових клієнтів, втрата лідерської позиції на ринку.	Зосередження на підвищенні якості проекту, встановлення конкуренто-спроможних цін.
4	Завади при виході на ринок	Бракує фінансових, людських, технічних ресурсів, існує складність швидкого накопичення клієнтської бази	Заручення фінансової підтримки від держави/ пошук інвесторів для виходу на ринок; підбір працівників; забезпечення підприємства необхідним обладнанням; створення рекламної компанії на різноманітних майданчиках
5	Попередній інструктаж	Оскільки системи неруйнівного контролю мають певні особливості, що відрізняють їх непростими інструкціями для користувача, яких може бути недостатньо для початку роботи з системою	Компанія має змогу найму людей з закінченими курсами дефектоскопістів, які будуть виконувати роль консультантів

Табл. 6.7 – Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Відсутність даного типу технології	На даний момент на ринку відсутні системи ультразвукового неруйнівного контролю, які базуються на тих же явищах.	Акцентування уваги клієнтів на наявності відмінності системи від існуючих та пов'язані з цим переваги

2	Вірогідність контролю	Споживачі висувають високі вимоги до такого параметру систем неруйнівного контролю як вірогідність	Споживачі висувають високі вимоги до такого параметру Акцентування уваги потенційних клієнтів на 89 систем неруйнівного контролю як вірогідність тому, що дана система забезпечує високу достовірність контролю
3	Обмеження щодо контролю виробів з певних матеріалів	На практиці системи ультразвукового неруйнівного контролю мають обмеження по згасанню	Акцентування уваги цільової аудиторії на можливості системи виявляти дефекти малих розмірів з високою
4	Невисокий рівень конкурентів	Можливість стати лідером на ринку мультимедійних електронних видань.	Встановити свої правила на ринку збуту.

Висновок: в таблицях 6.6 та 6.7 приведено найбільш важливі фактори що загрожують та сприяють впровадженні даного проекту на загальний ринок. Найважливіший фактор - відсутність даного типу технології, на цю перевагу йде найбільший орієнтир.

Таблиця 6.8 наводить аналіз пропозиції, для визначення загальних рис конкуренції на ринку.

Табл. 6.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - чиста	На ринку засобів неруйнівного контролю відсутня монополія компаній-лідерів галузі	Проведення масштабної рекламної компанії
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/...	Конкуренція частіше спостерігається в межах країни.	Представлення нового типу продукції
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	Конкуренція є тільки між представниками галузі неруйнівного контролю	Акцентування уваги клієнтів на універсальності системи
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція існує в межах кожного окремого методу контролю (ультразвуковий, вихрострумний тощо.)	Поєднання декількох методів контролю в одній комплексній системі.

5. За характером конкурент-них переваг - цінова / нецінова	Здійснюється вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та нанотехнологій, патентування і брендуння і умов її продажу	Аналіз цін на ринку конкурентів
6. За інтенсивністю - не марочна	Важливими є характеристики продукту, а не конкретний виробник	Покращення характеристик системи.

Висновок: представлена вище таблиця вказує на те, що на теперішній стан ринок характеризується вільною конкуренцією в локальних масштабах, а тому фактори, що однозначно обмежують входження на ринок - відсутні.

Таблиця 6.9 приводить більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за М. портером).

Табл. 6.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», ДП «Тест», «Ультрак он»	<i>Визначити бар'єри входження в ринок</i>	<i>Визначити фактори сили постачальників</i>	<i>Визначити фактори сили споживачів</i>	<i>Фактори загроз з боку замінників</i>
Висновки :	Висновки : Низький рівень конкуренції дає можливість виходу на ринок	ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», ДП «Тест», «Ультрак он»	Незважаючи на те, що на ринку є компанії з досвідом, проект має можливість успішного виходу на ринок	Так, клієнти висувають вимоги щодо достовірності систем неруйнівного контролю	Фактори загроз відсутні

Висновок: за результатами аналізу даних таблиць можна зробити висновок, що в даний момент з огляду на конкурентну ситуацію щоб вийти на ринок та бути конкурентоспроможним проект повинен не поступатись в якості витратами більш відомих компаній, але в той же час повинен пропонуватися за дещо нижчою ціною ніж в конкурентів. В таблиці 5.10 наведемо фактори конкурентоспроможності, які засновані на аналізі конкуренції, який проведений в табл. 5.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5)

та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 5.6-5.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності.

Табл.6.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Високий рівень точності контролю	Дана система забезпечує високу точність вимірювання товщини виробів
2	Максимальний розмір виробу	Система спроможна визначити великі габаритні розміри різних виробів, чого не можуть деякі продукти конкурентів
3	Новизна системи	Проект не має прямих аналогів на ринку
4	Інноваційний методи в виробництві	Використання нових алгоритмів та сучасної елементної бази
5	Цінова категорія	Ціна, яка відповідає якості системи та є сприятливою на ринку для споживача, тим самим задовольняє вибір користувача
6	Універсальність продукту	Запропонована система задовольняє високу якість контролю для широкого спектру виробів.

Висновок: за результатами таблиці 6.10 було визначено та обґрунтовано фактори впливу конкурентоспроможності. До факторів віднесено високий рівень точності і новизна системи. Базуючись на ці дані виконаємо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Табл. 6.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «УЗТ-1010»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Високий рівень точності контролю	17			•				
2	Максимальний розмір виробу	19			•				
3	Новизна системи	20	•						
4	Інноваційний методи в виробництві	20		•					
5	Цінова категорія	16				•			
6	Універсальність продукту	15				•			

Висновок: дана таблиця (табл. 6.11) вказує на те, що продукт компанії має ряд переваг над основними конкурентами, що робить його більш привабливим в очах потенційних клієнтів.

Проведемо SWOT-аналіз стартап-проекту (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)) (табл. 6.12)

Табл. 6.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Наявність якісного сайту, з актуальною інформацією - Кваліфікований персонал - Сучасна елементна база для виготовлення приладу - Конкуренто-спроможна ціна - Простота роботи, інтуїтивність інтерфейсу - Якісність і висока точність результатів роботи 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Низька підтримка на державному рівні, - Низький рівень технологічного забезпечення у навчальних закладах. - нестабільна конкурентна позиція; - низька прибутковість; - вузький асортимент - потреба в інвестиціях
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - збільшення попиту; - впровадження нового програмного забезпечення для створення більш нових версій системи контролю - проведення реклами в цільовому секторі екологічно небезпечним об'єктом; - модернізація обладнання 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - можливість появи нових конкурентів; - сповільнення розширення ринку на міжнародному рівні; - зростаючий конкурентний тиск; - підвищення конкурентного тиску зі сторони товарів-субститутів;

Висновок: SWOT-аналіз показує, що сильні сторони компанії та її продукту переважають над слабкими сторонами, і ринок в свою чергу надає більше можливостей для введення нового товару, ніж створює загроз. Таблиця 6.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Табл.6.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Розроблення програмного забезпечення для систем неруйнівного контролю	95%	2-3 місяці
2	Укласти договір з партнерами про розширення партнерської діяльності	85%	2 місяців
3	Залучення інвесторів	85%	5 місяців

Висновок: розглянувши можливості ринкового впровадження стартап-проекту можна зробити висновок, що основною альтернативою є отримання держзамовлення на прилад, оскільки ймовірність отримання ресурсів висока, а терміни реалізації менші.

6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Табл. 6.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ n/n	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Приватні та державні промислові компанії	Висока	Високий	Середня	Помірна
2	Лабораторії	Вище середнього	Середній	Низька	Помірна
3	Приватні особи	Середня	Низький	Майже відсутня	Висока
Які цільові групи обрано: Приватні та державні промислові підприємства, лабораторії					

Висновок: за результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, для яких будемо пропонувати автоматизовану систему контролю виробів та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію масового маркетингу, із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму. Для роботи в обраних сегментах ринку сформуємо базову стратегію розвитку (табл. 6.15).

Табл. 6.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ n/n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова Стратегія розвитку*
1	Розроблення програмного забезпечення для систем НК	Стратегія спеціалізації	Підвищення якості контролю, точність вимірювань, ціна, швидкість передачі даних	Стратегія диференціації

Висновок: в таблиці 6.15 було визначено базову стратегію – стратегія диференціації, що ґрунтується на альтернативі розвитку проекту, це розроблення програмного забезпечення, підвищення якості контролю, точності вимірювань.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Табл. 6.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «пер- шопрхідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових спо- живачів, або заби- рати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конку- рентної поведінки*</i>
1	Ні	Забирати у існуючих конкурентів	Ні, в цьому немає потреби	Стратегія виклику лідеру

Висновок: стратегія ґрунтується на пошуку існуючих споживачів у конкурентів, основні характеристики формуються самостійно та не копіюються у конкурентів.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 6.17). що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати систему на ринку.

Табл. 6.17 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Вимоги до товару цільо- вої аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкуренто- спроможні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключо- вих)</i>
	Ціна, Простота використання, Точність, Надійність	Стратегія диференціації	Універсальність застосування	Ультразвукова товщинометрія, комплексні системи контролю, універсальність

Висновок: результатом підрозділу є узгодження системи рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, було прийняте рішення зупинитися на стратегіях спеціалізації для охоплення ринку та стратегія диференціації – як базова стратегія розвитку.

6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 6.18 сформуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 6.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Висока точність контролю	Збільшення вірогідності контролю шляхом застосування нових методів обробки інформації	Наявність інформаційної технології ультразвукової дефектоскопії з підвищеною достовірністю контролю
2	Універсальність	Система може буди застосована для різни матеріалів, незалежно від фізичних властивостей	Можливість проводити контролю, що забезпечує універсальний прилад
3	Низька ціна	Пропонування товару за дещо нижчою ціною ніж в конкурентів	Збільшення кількості клієнтів за рахунок ціни та якості продукції

Висновок: розглянута таблиця показує ключеві потреби – висока точність, універсальність системи та низька ціна порівнянні з ринковою на даний час.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнимо ідеї продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 6.19).

Таблиця 6.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність контролю	99%	
	2. Мінімальний товщин виробу	2 мм	
	3. Можливість виявлення сигналів невідомої частоти	+	
	Якість: ГОСТ 14782-86 контроль неруйнівний.		
Пакування			
Марка: «Ультразвукові системи НК» МЗ			

III. Товар із підкріпленням	До продажу включається
	Після продажу включається
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: За рахунок наявності інформаційної технології обробки сигналів ультразвукової товщинометрії яка базується на методах обробки сигналів, яку раніше не набула широкого вжитку.	

Висновок: в таблиці 6.19 ми створюємо трьохрівневу модель нашого товару що включає задум товару та його вигоди, основі характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 6.20).

Таблиця 6.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	~10000 грн.	~16000 грн.	~85000 грн/рік	22000/12000

Висновок: в даній таблиці проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замінники, а також середній рівень доходів споживачів. За отриманими даними буду встановлена верхня та нижня межа на нашу програму.

Таблиця 6.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Замовлення з сайду (онлайн-форма)	Отримання замовлення онлайн, консультація, обробка замовлення, доставка, сервісна підтримка.	Висока	Оптовий/поштучний продаж продукції

Висновок: із наведеної вище таблиці можна зробити висновок, що оптимально системою збуту є продаж та установка витратоміру палива великими партіями. Основні шляхи збуту – це продаж через мережу інтернет. Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції

маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 6.22).

Таблиця 6.22 – Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Замовлення товарів онлайн, необхідність консультування	Інтернет	Ціна; Достовірність контролю; Універсальність;	Донести до цільової аудиторії переваги продукту	Розміщення оглядових статей на електронних ресурсах.

Висновок: було створено концепцію маркетингової комунікації, вона вказала на подальший напрямок розвитку для виходу на ринок. Наразі специфіка поведінки така, що стало зручним створювати замовлення саме онлайн, та при цьому надавати консультацію, адже товар вузькоспеціалізований і потребує додаткової інформації про товар. Виходячи з цього, пошук відбуваються в інтернеті.

6.6. Висновки до розділу

Запропоноване дослідження відображає можливість ведення проекту на ринок, що обумовлено попитом на системи ультразвукової товщинометрії. В даному розділі було розглянуто рентабельність запропонованої системи, незважаючи на наявність конкуренції, проект рентабельним по певним параметрам.

В процесі досліджень було запропонована автоматизована система з описаною методикою програмного забезпечення. Така система пропонує розробку альтернативного методу обробки уз-сигналів, що дає знано вищу точність в проведенні контролю. Наразі розвиток даної галузі є дуже перспективним напрямком.

На даний момент продукт є конкурентоспроможним, але для підвищення довіри споживачів і формування своєї бази клієнтів необхідно:

1. Вдосконалити конструкцію та технологію виробництва системи шляхом використання технологій ЧПУ та 3д принтиру.
2. Провести рекламну компанію серед сповивачів конкурентів.
3. Розробити систему таким чином щоб питання постачання обладнання вирішувалось швидко і мобільно (в перспективі перевагою також буде наявність реалізації сервісного ремонту).

Перспективою розвитку проекту є вихід на міжнародний ринок. Цьому сприяє високий попит на системи з великою прецизійністю до проведення контролю. Завадою на шляху до цього може стати проходження необхідної сертифікації.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації було проведено аналіз підвищення точності контролю для виробів зі значним згасанням ультразвукової хвилі. Принцип вимірювання базувався на луно-імпульсній товщинометрії. На основі результату було запропоновано використання статистичних методів визначення та опрацювання ФХС в УЗТ.

Було отримано наступні наукові та практичні результати

1. Проведено аналіз існуючих конструкційних матеріалів, з урахуванням теоретичних даних розраховано коефіцієнти акустичного та електроакустичних трактів для розробки системи.

2. На основі дискретного перетворення Гільберта розроблений метод статистичної фазометрії УЗТ, що дозволило виділити інформативну складову зашумленого сигналу.

3. Розроблено алгоритм роботи програмного забезпечення для, яка полягає у отриманні та аналізі r -статистики в ковзному полівіконному режимі опрацювання фазових характеристик цих сигналів.

4. Отримані результати моделювання процесів виявлення сигналів УЗТ та оцінювання часових інтервалів між відлуннями можуть бути використані під час проектування нових ефективних засобів ультразвукової луно-імпульсної товщинометрії.

5. Проведено аналіз похибок вимірювання часових інтервалів, що дав задовільний результат.

6. Розроблено стартап-проект для реалізації даної системи з опрацюванням сигналів УЗТ на український ринок, для отримання рентабельності впровадження системи з запропонованим методом УЗТ.

Список використаної літератури

1. Інформаційні системи і технології : навч. посіб. / [П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, К. С. Бабіч та ін.]. — К. : НАУ, 2013. — 324 с.
2. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал/шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала: Труды МАИ. Выпуск № 83/М, 2010. – 210 с.
3. Карлова О.В. Інформаційна технологія аналізу характеристик сигналів вихрострумове неруйнівного контролю: дис... магістр. техн. наук ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, «Національний Авіаційний Університет», наук. кер. Куц Ю.В. – Київ, 2012, - 103с.
4. Бистра І.М. Вдосконалення методу та засобів ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням: дис... канд. техн. наук ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, «Національний Авіаційний Університет», наук. кер. Куц Ю.В. – Київ, 2014, - 162с.
5. Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів. Навч. посібник / В.К. Качанов, О.В. Мозговий, О.І. Пітолін, В.П. Попко, Г.Ю. Рябов /за ред. В.П. Бабака. – К.: ІСДО, 1994. – 132 с.
6. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
7. Тихонов В.Н. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
8. Марченко Б.Г. Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів. Навчальний посібник /Б.Г. Марченко, М.В. Приймак, Л.М. Щербак. – Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2001. – 179 с.
9. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й Крауткремер, Г. Крауткремер; Пер. с нем. – М.: Металургия, 1991. – 752 с.

10. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с
11. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». 2010. – 448 с.
12. Качанов В.К. Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / В.К. Качанов, И.В. Соколов // Дефектоскопия. – 2007. – № 12. – С. 18-42.
13. Соколов И.В. Сплит-способ ультразвукового контроля / И.В. Соколов // Дефектоскопия. – 2007. – № 12. – С. 3-17.
14. Тютякин, А. В. О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики / А. В. Тютякин // Контроль. Диагностика. - 2012. - № 8. - С. 11-16.
15. Куц Ю. В. Статична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернопіль: Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя, 2009. – 383с.
16. Близнюк О.Д. Застосування методу статистичної фазометрії в ультразвуковому неруйнівному контролі / О.Д. Близнюк, В.С. Єременко, Ю.В. Куц, І.М. Лапіга, С.В. Шенгур // Збірник наук. праць «Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій» Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. НАНУ Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – Випуск 14. –2009. – С. 50–55.
17. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. –М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.
18. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. НьюЙорк, 1970: Пер с англ.(в четырех томах) / Под общей ред. К.Н. Трофимова; Том 3. Радиолокационные устройства и системы / Под ред. А.С. Винницкого. – М.: Сов. Радио, 1978. – 528 с.

19. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.