

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

**приладобудівний факультет**

**кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

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

**на тему: «Автоматизована ультразвукова дефектоскопія зварних  
з'єднань підвищеної вірогідності»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ПК-01мп Кібаленко Вадим Віталійович \_\_\_\_\_

Керівник:

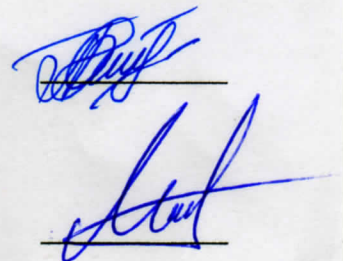
професор кафедри ПСНК, доктор технічних наук,  
професор, Куц Юрій Васильович \_\_\_\_\_

Консультант з розроблення стартап-проекту:

доктор економічних наук, професор,  
Бояринова К.О. \_\_\_\_\_

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,  
Мокійчук Валентин Михайлович \_\_\_\_\_



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


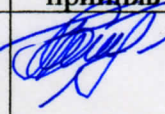
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 3 плакати

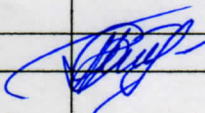
7. Орієнтовний перелік публікацій: одна стаття

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Бояринова К.О., д.е.н., професор; професор кафедри менеджменту факультету менеджменту та маркетингу КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір напрямку та формулювання завдання магістерської дисертації	1 тиждень	
2	Аналітичний огляд методів ультразвукової дефектоскопії, ОК та методів виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум	4 тижні	
3	Розрахунок типового акустичного тракту ультразвукової дефектоскопії	1 тиждень	
4	Теоретичне обґрунтування фазового методу для виявлення сигналів УЗ дефектоскопії	1 тиждень	
5	Розгляд базового фазового методу виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум	1 тиждень	
6	Розробка та моделювання удосконаленого методу виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум в середовищі Matlab	2 тижні	
7	Дослідження ефективності удосконаленого методу у виявленні сигналів за низького співвідношення сигнал/шум	2 тижні	
8	Розробка стартап-проекту	1 тиждень	
9	Формування висновків та оформлення пояснювальної записки та презентації	1 тиждень	

Студент

Вадим КІБАЛЕНКО

Науковий керівник

Юрій КУЦ

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

**приладобудівний факультет  
кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ **Юрій КИРИЧУК**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

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

**на тему: «Автоматизована ультразвукова дефектоскопія зварних  
з'єднань підвищеної вірогідності»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ПК-01мп Кібаленко Вадим Віталійович \_\_\_\_\_

Керівник:

професор кафедри ПСНК, доктор технічних наук,  
професор, Куц Юрій Васильович \_\_\_\_\_

Консультант з розроблення стартап-проекту:

доктор економічних наук, професор,  
Бояринова К.О. \_\_\_\_\_

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,  
Мокійчук Валентин Михайлович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Кібаленку Вадиму Віталійовичу**

1. Тема дисертації «Автоматизована ультразвукова дефектоскопія зварних з'єднань підвищеної вірогідності», науковий керівник дисертації Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджена наказом по університету від «3» листопада 2021 р. №3664-с
2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_
3. Об'єкт дослідження: процес ультразвукової дефектоскопії зварних швів гідроциліндрів
4. Вихідні дані: об'єкт контролю – зварні з'єднання; товщина стінки – 15 мм, матеріал – сталь 45; дефект – тріщини; робоча частота – 5 МГц; відношення сигнал/шум – не менше 1; особливі умови – передбачити автоматичне формування сигналу за наявності дефекту.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: оглянути методи ультразвукової дефектоскопії, проаналізувати методи виявлення сигналів на фоні шуму, розрахувати типовий акустичний тракт ультразвукової дефектоскопії, теоретично обґрунтувати фазовий метод для виявлення сигналів УЗ дефектоскопії, розглянути базовий фазовий метод сигналів за низького співвідношення сигнал/шум, удосконалити фазовий метод опрацювання сигналів за низького відношення сигнал/шум та провести його моделювання, проаналізувати ефективність удосконаленого методу в порівнянні з базовим.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 3 плакати

7. Орієнтовний перелік публікацій: одна стаття

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Бояринова К.О., д.е.н., професор; професор кафедри менеджменту факультету менеджменту та маркетингу КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір напрямку та формулювання завдання магістерської дисертації	1 тиждень	
2	Аналітичний огляд методів ультразвукової дефектоскопії, ОК та методів виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум	4 тижні	
3	Розрахунок типового акустичного тракту ультразвукової дефектоскопії	1 тиждень	
4	Теоретичне обґрунтування фазового методу для виявлення сигналів УЗ дефектоскопії	1 тиждень	
5	Розгляд базового фазового методу виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум	1 тиждень	
6	Розробка та моделювання удосконаленого методу виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум в середовищі Matlab	2 тижні	
7	Дослідження ефективності удосконаленого методу у виявленні сигналів за низького співвідношення сигнал/шум	2 тижні	
8	Розробка стартап-проекту	1 тиждень	
9	Формування висновків та оформлення пояснювальної записки та презентації	1 тиждень	

Студент

Вадим КІБАЛЕНКО

Науковий керівник

Юрій КУЦ

# РЕФЕРАТ

## **Актуальність теми**

Наразі застосування зварних з'єднань можна зустріти практично у всіх галузях промисловості. Це досить економічний спосіб з'єднання, який може використовуватись для зварювання деталей різних за товщиною. Зварні шви активно застосовуються в відповідальних конструкціях, що часто піддаються динамічним, інтенсивним та знакозмінним навантаженням. Через це в таких з'єднаннях часто утворюються тріщини, які досить швидко можуть призвести до руйнації, що можуть супроводжуватись як значними матеріальними збитками, так і призвести до травм однієї або більше людей. Зараз немало чуто новин, коли гідроциліндр, наприклад, кранів руйнується і з'являються негативні наслідки. За останніх кілька десятків ситуація з руйнацією гідроциліндрів ніяк не змінилась і відсоток таких неприємних випадків не зменшується, тому і необхідно періодично проводити обов'язковий контроль.

Метою такого контролю є завчасне виявлення по сигналам місцеположення дефекту та його параметрів, щоб відповідальний контролер зміг швидко проаналізувати результат та занести в паспорт контролю необхідну інформацію.

Для того, щоб результати контролю були більш достовірними, необхідно постійно покращувати методи виявлення інформаційних сигналів, особливо це стосується контролю за низького співвідношення сигнал/шум, коли шуми досить сильно впливають на результат контролю, внаслідок чого контролер отримує недостовірну інформацію.

Задачею магістерської роботи є удосконалення методу статистичного опрацювання сигналів ультразвукової дефектоскопії за низького відношення сигнал/шум, що базується на аналізі фазових характеристиках сигналу.

## **Мета і задачі дослідження**

**Мета дослідження** – підвищення вірогідності виявлення дефектів в ультразвуковій дефектоскопії за використання для аналізу сигналів методу статистичної фазометрії.

Для досягнення поставленої мети були розв'язані такі **задачі**:

- 1) Аналіз ОК та його типових дефектів.
- 2) Аналіз наявних методів ультразвукової дефектоскопії та методів виявлення сигналів за низького співвідношення сигнал/шум.
- 3) Обґрунтування використання фазового методу виявлення дефектів та розгляд його базового варіанту.
- 4) Удосконалення фазового методу опрацювання сигналів ультразвукової дефектоскопії за рахунок вагової обробки результатів нерівноточних фазових вимірювань.
- 5) Моделювання базового та удосконаленого фазового методу оброблення сигналів ультразвукової дефектоскопії.
- 6) Оцінювання вірогідності контролю розробленим методом.

**Об'єкт дослідження** – процес ультразвукової дефектоскопії зварних швів гідроциліндрів.

**Предмет дослідження** – метод та методика виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії за низького співвідношення сигнал/шум.

**Методи дослідження** ґрунтуються на теоретичних основах ультразвукового контролю, методах математичної статистики та теорії ймовірностей, методах комп'ютерного моделювання та цифрової обробки сигналів.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

- 1) Удосконалено фазовий метод виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії, який ґрунтується на статистичному опрацюванні фазових характеристик цих сигналів, і полягає у додатковому ваговому опрацюванні результатів фазових вимірювань, що дає змогу підвищити вірогідність виявлення дефектів зварних з'єднань за низького відношення сигнал/шум.

#### **Практичне значення результатів дисертації**

- 1) Розроблено методику реалізації фазового методу виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії за низького відношення сигнал/шум.

- 2) Розроблено та відлагоджено програмну реалізацію запропонованого методу в середовищі Matlab.
- 3) Проведено дослідження та порівняльний аналіз вірогідності виявлення дефектів за базовим і удосконаленим методами виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії.

### **Публікації**

За результатами виконаних досліджень була опублікована одна стаття.

### **Ключові слова**

Ультразвукова дефектоскопія, методи статичної обробки сигналів, фазометрія, відношення сигнал/шум.



## ABSTRACT

### **Actuality of theme**

Currently, the use of welded joints can be found in almost all industries. This is a very economical way of joining, which can be used to weld parts of different thicknesses. Welds are actively used in critical structures, which are often subjected to dynamic, intense and alternating loads. As a result, cracks often form in such joints, which can quickly lead to destruction, which can be accompanied by significant material damage and injury to one or more people. There is a lot of news now when the hydraulic cylinder, for example, cranes, is collapsing and negative consequences appear. Over the past few decades, the situation with the destruction of hydraulic cylinders has not changed and the percentage of such unpleasant cases does not decrease, so it is necessary to periodically monitor.

The purpose of such control is the early detection of the location of the defect and its parameters, so that the responsible controller could quickly analyze the result and enter the necessary information in the control passport.

In order to make the control results more reliable, it is necessary to constantly improve the methods of detecting information signals, especially for control at low signal-to-noise ratio, when noise has a strong effect on the control result, resulting in inaccurate information.

The task of the master's thesis is to improve the method of statistical processing of ultrasonic flaw detection signals at low signal-to-noise ratio, based on the analysis of phase characteristics of the signal.

### **The purpose and objectives of the study**

**The purpose of the study.** The adjustment of the status of detection of defects in ultrasonic flaw detection for the analysis of signals in the method of statistical phase measurement.

To achieve the set goals, the following tasks are **developed**:

- 1) Analysis of the object of control and its typical defects.
- 2) Analysis of existing methods of ultrasonic flaw detection and methods of signal detection at low signal-to-noise ratio.

- 3) Justification of the use of the phase method of defect detection and consideration of its basic version.
- 4) Improvement of the phase method of processing the signals of ultrasonic flaw detection through weight processing of the results of inaccurate phase measurements.
- 5) Modeling of basic and advanced phase method of ultrasonic flaw detection signal processing.
- 6) Estimation of probability of control by the developed method.

**Object of research** – the process of ultrasonic flaw detection of welds of hydraulic cylinders.

**Subject of research** – method and technique of detection of ultrasonic flaw detection signals at low signal-to-noise ratio.

**Methods of research** are based on the theoretical foundations of ultrasonic control, methods of mathematical statistics and probability theory, methods of computer modeling and digital signal processing.

**Scientific novelty of research:**

1) Improved phase method of detection of ultrasonic flaw detection signals, which is based on statistical processing of phase characteristics of these signals, and consists in additional weight processing of phase measurement results, which increases the probability of detecting weld defects at low signal / noise ratio.

**Practical value dissertation results:**

1) The technique of realization of a phase method of detection of signals of ultrasonic defectoscopy at low signal / noise ratio is developed.

2) Developed and adjusted the software implementation of the proposed method in the Matlab environment.

3) Research and comparative analysis of the probability of detecting defects by basic and improved methods of detecting signals of ultrasonic flaw detection.

**Publications**

According to the results of the research, one article was published.

**Keywords**

Ultrasonic flaw detection, methods of static signal processing, phasometry, signal-to-noise ratio.

## ЗМІСТ

Перелік основних скорочень .....	13
ВСТУП.....	14
<b>1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. Фізичні основи ультразвукового неруйнівного контролю</b>	<b>16</b>
<b>1.2. Аналіз об'єкта контролю та типових дефектів.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.1. Огляд об'єкта контролю.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2. Типові дефекти об'єкта контролю .....</b>	<b>23</b>
<b>1.3. Огляд відомих способів прозвучування зварних швів.....</b>	<b>26</b>
<b>1.4. Огляд відомих методів виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії за малого відношення сигнал/шум.....</b>	<b>32</b>
<b>1.5. Формування завдання дослідження.....</b>	<b>35</b>
<b>1.6. Висновки до розділу.....</b>	<b>35</b>
<b>2. УДОСКОНАЛЕННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1. Розрахунок типового акустичного тракту ультразвукової дефектоскопії.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1.1. Вибір робочої частоти датчика та розрахунок розміру мінімального дефекту.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1.2. Розрахунок п'єзоелементу.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1.3. Вибір моделі розрахунку акустичного тракту .....</b>	<b>39</b>
<b>2.1.4. Розрахунок коефіцієнта акустичного тракту .....</b>	<b>41</b>
<b>2.1.5. Розрахунок електроакустичного тракту .....</b>	<b>45</b>
<b>2.2. Модель аналізованого сигналу та поняття сигнал/шум....</b>	<b>46</b>

2.3. Теоретичне обґрунтування фазового методу виявлення сигналів УЗ-дефектоскопії .....	50
2.3.1. Статистична обробка характеристик сигналів за допомогою використання перетворення Гільберта.....	51
2.3.2. Обґрунтування вибіркової характеристики .....	53
2.4. Удосконалення відомого методу за рахунок вагової обробки результатів нерівноточних вимірювань.....	56
2.5. Розробка структурної схеми та розрахунок АЦП.....	59
2.5.1. Розробка структурної схеми .....	59
2.5.2. Розрахунок АЦП .....	60
2.6. Висновки до розділу.....	61
<b>3. МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ.....</b>	<b>62</b>
3.1. Методика проведення модельних експериментів .....	62
3.2. Моделювання процесу оброблення сигналів .....	64
3.3. Розроблення програмного засобу.....	67
3.5. Висновки до розділу.....	71
<b>4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА УЛЬТРАЗВУКОВА ДЕФЕКТОСКОПІЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПІДВИЩЕНОЇ ВІРОГІДНОСТІ».....</b>	<b>72</b>
4.1. Опис ідеї проекту.....	72
4.2. Технологічний аудит проекту.....	74
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .	75
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	84
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту...	87
4.6. Планування витрат на запуск стартап-проекту.....	92

<b>4.7. Висновки до розділу.....</b>	<b>93</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>95</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>97</b>

## Перелік основних скорочень

- УЗ – ультразвуковий
- УЗНК – ультразвуковий неруйнівний контроль;
- НК – неруйнівний контроль;
- ОК – об'єкт контролю;
- ФХС – фазова характеристика сигналів;
- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
- АХС – амплітудна характеристика сигналів;
- ГЗІ – генератор зондувальних імпульсів;
- ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;
- ЕАТ – електроакустичний тракт;
- С/Ш – сигнал/шум;
- ШПФ – швидке перетворення Фур'є;
- ПГ – перетворення Гільберта;
- ВДВ – вибіркова довжина вектора;
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
- ПК – персональний комп'ютер;
- ПЗ – програмне забезпечення.

## ВСТУП

Кількість підприємств, що застосовують гідроциліндри у складі своїх відповідальних установок щодня зростає. Це пов'язано з високим ККД, плавним безшумним ходом та точністю регулювання ходу. Їх можна побачити зараз практично на будь-якому підприємстві. Це різні підйомні та опорні механізми, верстати для згинання та штампування, преси. За допомогою гідравлічних підйомників на будівництві, виробництві, складських господарствах та в автоцентрах переміщуються різні вантажі. Точне регулювання ходу дозволяє вирівняти платформу підйомника з поверхнею, на якій відбувається навантаження або вивантаження. Цими прикладами застосування гідравлічних циліндрів не обмежене: вони є, наприклад, в деяких видах лабораторного устаткування. Плюс гідравліки – відсутність електричних компонентів, а отже, немає небезпеки короткого замикання чи іскри. Тому гідравлічне обладнання встановлюють на хімічних виробництвах, у лакофарбових цехах, у приміщеннях з високою запиленістю – скрізь, де висувуються суворі вимоги до пожежо- та вибухобезпеки. Також гідравлічне обладнання незамінне на рятувальних та аварійно-ремонтних роботах.

Незважаючи на нібито високу надійність гідроциліндрів, потрібно пам'ятати, що вони використовуються у таких установках, де руйнація гідроциліндра може призвести до значних матеріальних втрат та навіть гибелі людей. Більшість нині наявних гідроциліндрів створювались шляхом зварювання та продовжують створюватись. Це пов'язано з економічністю та досить високою продуктивністю створення зварних з'єднань. Проте, через неточність у виставленні параметрів зварювання чи підбору режиму зварювання, експлуатацію попри визначений термін та інші причини у зварних з'єднаннях мають місце небажані дефекти. А, враховуючи те, що вони зазвичай виготовляються із матеріалів зі значним загасанням – виникає потреба у застосування неруйнівного контролю (НК) та методів обробки сигналів при значному зашумленні корисної складової сигналів.



Ціль написання магістерської дисертації полягає у розробці удосконаленого методу, що базується на статистичному аналізі фазових характеристик сигналів, для виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії за низького відношення сигнал/шум (С/Ш).

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

## 1.1. Фізичні основи ультразвукового неруйнівного контролю

Ультразвуковий неруйнівний контроль — це сімейство неруйнівних методів, при яких пучки високочастотних механічних хвиль вводяться в матеріали за допомогою перетворювачів для виявлення та характеристики глибинних та поверхневих пошкоджень чи дефектів [1].

Ступінь відбиття та пропускання ультразвукових (УЗ) хвиль більше залежить від фізичного стану матеріалів, які утворюють міжфазну поверхню (межу поділу), аніж від фізичних властивостей матеріалу. Так УЗ хвилі майже цілком відбиваються на межі поділу середовищ метал-газ та частково на межі метал-рідина, часткове відбивання також можна спостерігати між металом та іншим твердим тілом. При цьому відсоток відбитої енергії залежить в основному від співвідношення акустичного імпедансу матеріалу і кута падіння променів.

Зазвичай прилади ультразвукового контролю (УЗК) виявляють дефекти шляхом відслідковування одного чи декількох параметрів:

- 1) затухання УЗ хвиль, що виникає через розсіювання і поглинання у зразку;
- 2) швидкість хвиль, що контролюють час проходження УЗ хвилі через зразок;
- 3) відбивання ультразвуку від неоднорідностей власне у самому металі та від межі поділу границь матеріалу;
- 4) особливості, котрі можна спостерігати в спектральному відгуку для відбитого чи переданого сигналу.

Частоти від 1 до 25 МГц є найбільш вживаними при проведенні УЗ дефектоскопії. Вони є значно вищими за ті, що може сприймати людина на слух, так як діапазон частот людського вуха варіюється приблизно від 20 до 20 кГц.

Беззаперечно, ультразвуковий контроль є одним із найбільш поширених методів неруйнівного контролю через свою універсальність, адже ультразвукові поля можуть наводитись в будь-яких матеріалах та середовищах. В основному ультразвуковий неруйнівний контроль (УНК) використовують для контролю металів, особливо що стосується внутрішніх дефектів. Але за допомогою нього можна також вимірювати товщину і ступінь корозії, виявляти поверхневі дефекти, визначати певні фізичні властивості матеріалу, тощо.



Рис. 1.1. Ультразвуковий неруйнівний контроль

До переваг УНК над іншими методами НК відносять:

- 1) можливість створення та застосування ультрапортативного та високоавтоматизованого обладнання;
- 2) можливість виявлення підповерхневих та поверхневих пошкоджень та дефектів;
- 3) висока чутливість, що дає змогу виявити достатньо дрібні дефекти
- 4) чудова проникаюча здатність, яка дозволяє виявляти дефекти, що розташовані глибоко в деталі;

- 5) застосування методу не лише для пошуку дефектів, а й для виміру товщини, тощо;
- 6) достатність одностороннього доступу до контрольованого зразка (луна-імпульсний метод);
- 7) безпека для здоров'я персоналу, особливо в порівнянні з рентгенівським методом;
- 8) УЗД не впливає на тестовий зразок;
- 9) можливість постійного цифрового запису даних для перевірки та опрацювання офлайн.

До недоліків УНК можна віднести:

- 1) наявність мертвої зони у неглибокому шарі матеріалу;
- 2) високі вимоги до пильності та досвіду операторів;
- 3) складність у надійній перевірці зразків з шорсткою поверхнею та неправильною формою, дуже тонких чи дрібних, або тих, що є неоднорідними;
- 4) еталони необхідні у більшості випадків, як для калібрування приладів, так і для визначення характеристик дефектів;
- 5) необхідність застосування імерсійної рідини.

Зазвичай УНК проводиться для знаходження несучільностей. Але завдяки різним реалізаціям методу його можна використовувати для знаходження внутрішніх дефектів. Різні з'єднання, що отримуються завдяки зварюванню, пайки, адгезії також можна контролювати за допомогою ультразвуку.

Системи УЗК бувають різними. Це можуть бути як великі масивні системи з автоматичним переміщенням датчиків, так і портативні прилади з батарейним живленням, які застосовуються для ручного контролю в польових умовах, в лабораторії, тощо.

УЗК застосовують для перевірки матеріалів та контролю якості практично у всіх основних галузях промисловості. Сюди відносяться: виробництво металічних і композитних матеріалів, електронних та електричних компонентів. Також УЗК має місце при виробництві трубопроводів, мостів, двигунів та планерів, кораблів, автомобілів, тощо. В процесі експлуатації УЗК використовується для виявлення пошкоджень та дефектів таких як корозія, тріщини, тощо. Це досить важлива частина в будь-якій галузі, адже від якості і точності контролю можуть залежати життя та здоров'я людей, крім цього відсутні чи неточність контролю може також призвести до високих матеріальних збитків.

За допомогою УЗК визначають такі дефекти як тріщини, порожнечі, розриви, корозію, розшарування труб, тощо. Вони можуть бути в самій сировині, виникати під час термічної обробки чи виготовлення деталі, а також в процесі експлуатації. Всі ці дефекти в тій чи іншій мірі є небезпечними і можуть ховатись за шумами, які створюються як ОК та середовищем, так і вимірювальною апаратурою, тож досить важливим питанням є підвищенні вірогідності виявлення інформаційних сигналів для автоматичного УЗК.

## **1.2. Аналіз об'єкта контролю та типових дефектів**

### **1.2.1. Огляд об'єкта контролю**

Велика сила та лінійний рух, створювані циліндрами, є досить важливими критеріями, через які провідні конструктори надають їм перевагу. Гідроциліндри забезпечують працездатність значної кількості силового обладнання в промисловості та побуті. Вони виступають у ролі приводного двигуна зворотно-поступальної дії та при мінімальних витратах енергії можуть забезпечити повний цикл роботи силового обладнання.

Їх досить часто можна бачити навколо себе, наприклад, у вантажівках, тракторах, екскаваторах, кранах, підйомних платформах, тощо. Тож можна зробити висновок, що гідроциліндри є невід'ємною частиною машин і механізмів в суспільно важливих галузях промисловості таких як будівництво,

сільськогосподарська діяльність та інших. Найчастіше гідравлічні циліндри застосовують в якості основного елемента оснащення пресового устаткування.

Гідравлічний циліндр являє собою об'ємний гідродвигун, задачею якого є перетворення енергії потоку рідини в механічну енергію. Його можна порівняти з м'язом, так завдяки гідравлічній системі машини він створює рух, тому і схожий на м'яз.

Головними елементами конструкції будь-якого гідроциліндра є поршень, шток поршня та корпус-гільза. Їх роблять такими, щоб вони могли витримувати значні навантаження.

Принцип роботи будь-якого гідроциліндра полягає в створенні тиску робочою рідиною на поршень та подальшого виконання циклічної роботи штоком, внаслідок чого і передається зусилля на робочий вузол. В залежності від свого типу та призначення до таких вузлів можна віднести пресувальні та згинальні механізми, ущільнюючу платформу, тощо.

Нижче наведена детальна будова типового пристрою гідроциліндра.

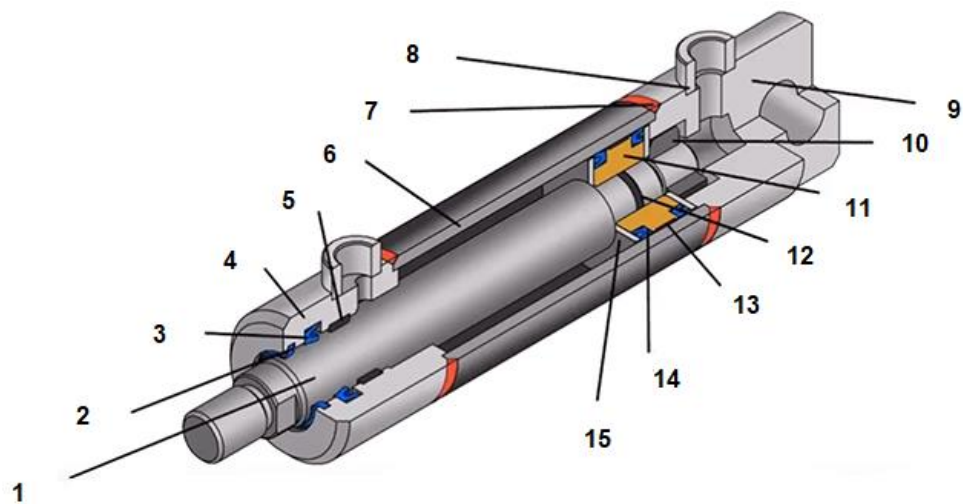


Рис. 1.2. Типовий пристрій гідроциліндра: 1 – шток; 2 – ущільнювач для захисту від забруднення; 3 – штокова манжета; 4 – передня кришка; 5 – направляюче кільце штока; 6 – гільза; 7 – зварні шви; 8 – бонки; 9 – задня кришка; 10 – гайка; 11 – поршень; 12 – резинове кільце; 13 – направляюче кільце поршня; 14 – поршневі манжети; 15 – шайби

Найбільш цікавим для нас елементом гідроциліндра є його гільза, адже до неї приварюють кришки і нам важливе забезпечення надійності цих зварних з'єднань. Після зборки циліндра та подальшого його укомплектування в ту чи іншу гідросистему він переходить у використання за призначенням. Під час експлуатації гідроциліндри піддаються досить інтенсивним, динамічним та знакозмінним навантаженням, тому потрібно заздалегідь виявляти появу дефектів чи несучільностей. Невчасний та неякісний контроль зварних з'єднань під час різних екстремальних чинників може призвести до небажаних наслідків: аварій, матеріальних збитків, травм чи навіть гибелі людей.

Найчастіше гільзу гідроциліндрів виготовляють зі сталі марок 35, 45 та використовують здебільшого у техніці для сільського господарства та будівництва. Це крани, трактори, екскаватори, тощо. Опрацювавши відповідну інформацію про використання гідравлічних циліндрів у цих видах техніки, для проектування системи можемо задатись такими параметрами найбільш часто вживаних гільзи — **товщина стінки: 15 мм, матеріал — сталь 45.**

Зазвичай кришки до гільзи приварюють на напівавтоматичних установках зварювання MIG/MAG. Ці апарати є професійними та широко застосовуються саме в промисловості. Вони дають змогу забезпечити якісне та естетичне зварне з'єднання.

По суті, основна різниця між MIG та MAG зварюванням полягає в типі захисного газу, що використовується під час процесу.

MIG (Metal Inert Gas) — дугове зварювання з використанням інертного газу. Гази, які називаються інертними, не вступають в хімічну реакцію. Зазвичай при такому виді зварювання використовують аргон або гелій, або ж їхню суміш.

MAG (Metal Active Gas) — дугове зварювання, при якому використовуються активні гази, зокрема такі як вуглекислий газ, азот та інші. Саме цей тип переважно і використовують при зварюванні гільзи гідравлічного циліндру з кришкою.

До переваг MAG-установок відносять:

- 1) якість зварного шва;
- 2) чистоту процесу та мінімальні бризки;
- 3) високу продуктивність;
- 4) економія (заміна наконечників електродів не потрібна);
- 5) універсальність.

До недоліків MAG-установок відносять:

- 1) висока вартість апаратури та необхідність докупки додаткових елементів для роботи комплексу;
- 2) складнощі в транспортуванні установки;
- 3) виконання зварювання лише в приміщенні (чутливість до вітру).

Нижче на рисунку 1.3 приведений приклад такої установки.



Рис. 1.3. Зварювальна система MAG для кільцевих швів гідроциліндрів

З вищесказаного можемо підсумувати, що процес зварювання для гідроциліндрів відіграє дуже важливу роль у створенні надійного нероз'ємного з'єднання. Незважаючи на те, що такі з'єднання створюються на



професійних установках, які ніби б мали забезпечувати стовідсоткову надійність, дефекти та несучільності утворюються в них досить часто. В наступному розділі буде розглянуто основні дефекти зварних з'єднань таких ОК.

### 1.2.2. Типові дефекти об'єкта контролю

Основні типи дефектів зварних з'єднань розглянуто у роботі [16].

Підбір правильної технології для зварювальних робіт не гарантує стовідсотковий захист від появи дефектів чи несучільностей. Вони можуть з'являтися як при ручному зварюванні, так і з використанням спеціальних напівавтоматичних установок з захистом за допомогою спеціальних газів. Причин появи небажаних дефектів може бути безліч. Серед них можна виділити наступні: недостатній рівень підготовки зварювальника, халатність при контролі якості, неточність у виставленні параметрів зварювання чи підбору режиму зварювання, експлуатацію попри визначений термін та порушення правил технічної експлуатації, тощо.

З розділу 1.1. нам вже відомо, що УЗК найчастіше використовують для виявлення внутрішніх дефектів. До них відносяться тріщини, пористість, свищі, металеві та шлакові включення, непровари, тощо [2]. Тож розглянемо їх більш детально.

**Пористість** — порожнечі в металі зварного з'єднання, здебільшого сферичної форми, які заповнені газом. Їх діаметр варіюється від декількох мікрометрів до 1-3 мм. Утворюються внаслідок швидкого застигання металу, який поглинає гази, що не встигли відділитися та вийти в атмосферу. Також до причин утворення пористості можна віднести подачу занадто великого потоку газу, наявність вологи під час процесу зварювання на зварних матеріалах, забруднена робоча поверхня, поганий підбір електродів та їх низька якість, тощо. Досить серйозний дефект, зварне з'єднання з таким дефектом слабшає і може зруйнуватись. Він може призводити до утворення тріщин у зварному з'єднанні.

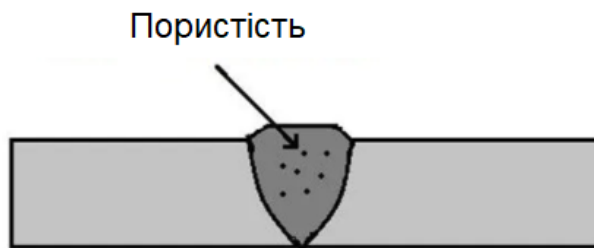


Рис. 1.4. Пористість у зварному з'єднанні

**Свищ** — це дефект зварного шва, який утворюється внаслідок інтенсивного виділення газу та має форму трубчастої порожнини. Найчастіше групуються в так звану «ялинку». Свищ утворюється тоді, коли підйомної сили недостатньо для того, щоб пара піднялася назовні. Досить серйозний дефект, який концентрує напруги у зварному з'єднанні. До факторів, які сприяють утворенню свищів відносять перегрів основного матеріалу під час зварювання, зовелику амплітуду коливань електроду та волога на електродах [16].

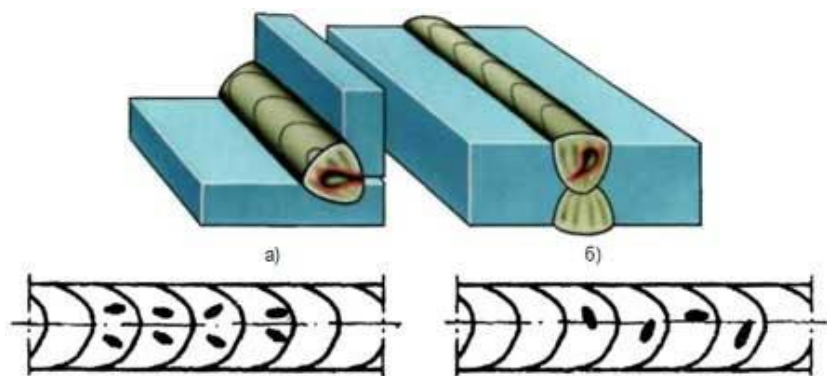


Рис. 1.5. Свищі у зварному з'єднанні

**Непровар** — дефект, що являє собою локальну несплавленість між з'єднуваними поверхнями та металом зварного з'єднання. Він утворюється через погану підготовку та очищення країв зварювання, легкоплавкі електроди, неправильно підібрана довжина дуги, слабкий струм та низька швидкість зварювання. Зазвичай непровари досить часто зустрічаються у роботах зварювальників-початківців.

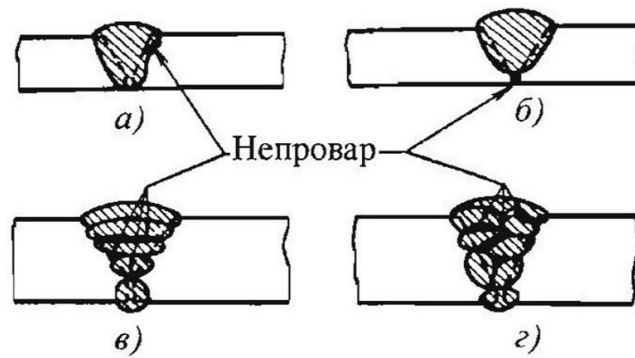


Рис. 1.6. Непровари: а) по краю матеріалу шва з металом, що зварюється; б) в корені з'єднання, в) поміж шарами, г) поміж валиками

**Шлакові включення** — поширений дефект зварювання. Навіть такі високотехнологічні установки як MIG і TIG не застраховані від появи неметалічних включень. Вони бувають різної форми: продовгуватої, круглої, плоскої та іншої форми. При такому зварюванні кусочки іржі або навіть вольфраму можуть спричинити забруднення зварного шва. Зазвичай ці дефекти мають більші розміри, аніж пори і краще виявляються під час дефектоскопії. Вони не такі небезпечні як пористість у зварному шві, але якщо вони розміщуються дуже кучно, то можуть в значній мірі знижувати механічні властивості зварного шва та погіршувати його структуру. Але якщо всі умови та режими процесу зварювання виконані чітко, то шлак просто осідає на зварне з'єднання і після того, як шов охолоне, ці шлаки можна легко видалити. Основною причиною утворення шлакових включень і є відхилення від визначених режимів зварювання. Також серед причин утворення шлаків у зварному шві можна також відмітити використання дещо довгої дуги, аніж потрібно, занадто високу швидкість зварювання та слабкий струм зварювання.

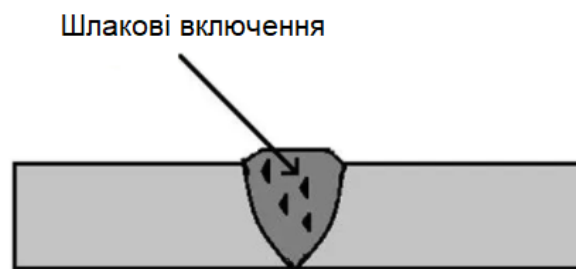


Рис. 1.7. Шлакові включення у зварному шві

**Тріщини** — розрив металу зварного шва або основного металу, або обох відразу. Безумовно найнебезпечніший вид дефектів, що можуть виникнути у зварному шві. Вони є недопустимими за всіма діючими стандартами.

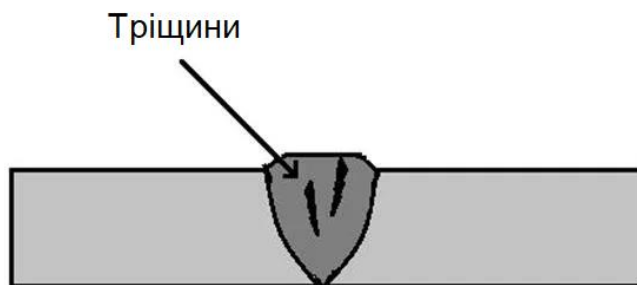


Рис. 1.8. Внутрішні тріщини у зварному з'єднанні

Також виникнення тріщин відбувається не завжди під час чи відразу після зварювання, а деякі з них ще й розміщуються в нижньому шарі зварного шва та не виходять на поверхню. Тріщини можуть з'являтися з часом під час експлуатації, коли зварне з'єднання піддається впливу навантажень. В основному тріщини у зварному з'єднанні виникають тоді, коли внутрішні напруження перевищують міцність металу шва, основного металу чи обох відразу. Внаслідок чого, вони стають осередком напруги, накопичуються та можуть досить активно поширюватись.

Оскільки гідравлічні циліндри відносяться до силових установок, то завчасне виявлення внутрішніх тріщин може вберегти від руйнації та інших негативних наслідків, тож варто зробити акцент у цій роботі саме на виявлення тріщин у зварних з'єднаннях ОК.

### **1.3. Огляд відомих способів прозвучування зварних швів**

З практичної точки зору для виявлення дефектів слід опиратись лише на ті параметри, які дозволяють за будь-яких умов його виявити, виміряти та виразити в числовій формі для подальшої оцінки та прийняття рішення щодо дефекту чи групи дефектів. До таких параметрів відносять: амплітуду луно-

сигналу, чисельність дефектів на одиницю довжини зварного з'єднання, умовні довжина та висота, координати дефекту по перерізу, тощо.

Для того, щоб визначати характеристики дефектів при УЗК зварних з'єднань використовують такі методи: луно-імпульсний, дзеркальний (луно-дзеркальний), тіньовий, дзеркально-тіньовий, дельта-метод, дифракційно-часовий (TOFD) та ревербераційний. Розглянемо ці методи більш детально.

Найбільш вживаним методом при УЗК є **луно-імпульсний метод** (рис. 1.9). Він дуже точний, особливо що стосується пошуку дефектів у матеріалах. Це надійний метод, який використовує лише один перетворювач, котрий у свою чергу є одночасно і генератором, і приймачем. Він прозвучує ОК короткими імпульсами УЗ-коливачів та реєструє віддзеркалені від дефектів луно-сигнали. Саме по цій причині цей метод і набув такого розповсюдження. Його зручно використовувати як при ручному контролі, так і у автоматичних установках. Наприклад, при ручному контролі не потрібно використовувати спеціальні фіксатори (як при застосуванні методу TOFD), тощо.

Коли імпульс від такого перетворювача відправляється, то на екрані осцилографа з'являється так званий зондувальний сигнал, якщо ж дефекту у виробі немає, то з'являється другий імпульс, який віддзеркалився від протилежної сторони ОК, цей імпульс називається донним. У випадку, коли виріб має дефект 3 (рис. 1.9, б), з'являється додатковий сигнал, який розташовується між початковим (зондувальним) та кінцевим (донним) сигналами. Також існує і такий випадок, коли дефект може повністю перекивати ультразвукові промені, тоді на екрані осцилографа ми не побачимо донний сигнал, адже сигнал від дефекту буде повністю його перекивати.

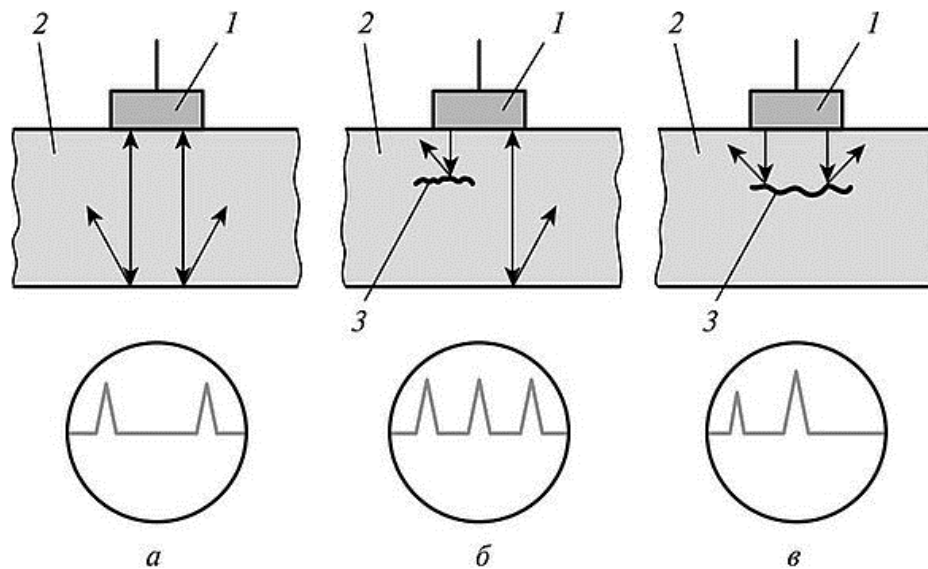


Рис. 1.9. Луно-імпульсний метод:

а) бездефектна деталь, на екрані осцилографа лише зондувальний та донний імпульси; б) деталь з дефектом 3, на екрані осцилографа з'являється проміжний імпульс; в) повне перекриття УЗ променів, на екрані осцилографа «перекритий» донний сигнал;

1 — випромінювач; 2 — ОК; 3 — дефект

Таким чином, за допомогою луна-методу, зчитавши інформацію з екрану дефектоскопа, ми можемо отримати інформацію про розміри та глибину залягання дефекту. Адже по горизонтальній лінії розгортки ми можемо визначити довжину шляху імпульсу від дефекту і потім визначити глибину залягання дефекту, а по вертикальній шкалі ми можемо оцінити його розміри за допомогою визначення висоти імпульсів, яка пропорційна амплітуді луно-сигналів.

**Дзеркальний або луно-дзеркальний метод УЗК** — досить подібний до луно-імпульсного методу, але потребує використання двох перетворювачів, що розміщені по одну сторону від ОК. Сутність такого методу полягає у аналізі характеристик акустичних імпульсів, що відбиваються від дефекту і реєструються приймачем. Зазвичай використовується такий метод для пошуку вертикальних дефектів, так перетворювачі розміщуються під прямим кутом і

якщо дефект є, то сигнал відбивається на приймач. Недолік цього методу проявляється у тому, що існує потреба у виміру відстані між перетворювачами час від часу.

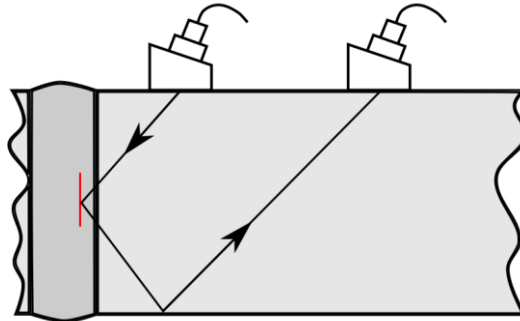


Рис. 1.10. Дзеркальний метод

При **тіньовому методі** генератор та приймач розміщуються по різні сторони до об'єкта контролю, так щоб приймач був розташований рівно по ходу проходження ультразвукових променів через ОК, які йдуть від генератора. Інформаційним параметром в такому випадку виступає амплітуда (інтенсивність сигналу), якщо дефекту в ОК немає, то прийнятий сигнал буде без змін амплітуди, але якщо ж дефект в ОК є, то приймачем буде прийнятий сигнал з меншою інтенсивністю, так як за дефектом з'являється так звана «звукова тінь», яка призводить до зменшення амплітуди, це нам і говорить про наявність дефекту в ОК.

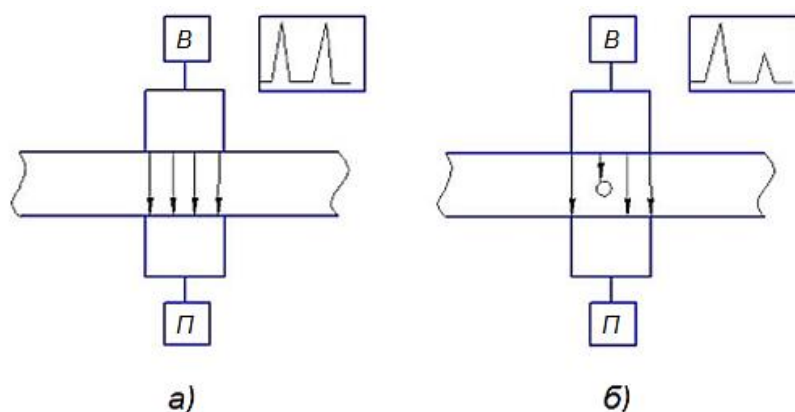


Рис. 1.11. Тіньовий метод: а) ОК без дефекту; б) ОК з дефектом

Однією з сильних сторін методу є те, що мертва зона при контролі відсутня. Також серед позитивних сторін методу можна відмітити практично незалежну амплітуду від орієнтації дефекту та досить високу перешкодостійкість.

Розглянемо **дзеркально-тіньовий метод**. Він є наслідником тіньового методу, але в цьому методі перетворювачі розташовуються по на одній поверхні ОК, а не по протилежним сторонам. Відрізняється від тіньового методу тим, що в даному випадку приймається донний сигнал, який прийшов від протилежної поверхні ОК, а не весь потік ультразвукових коливань. Про наявність дефекту при контролі цим методом буде свідчити загасання амплітуди чи взагалі пропадання відбитих коливань. Величина загасання амплітуди залежить від розмірів дефекту, чим більший дефект — тим і менша амплітуда.

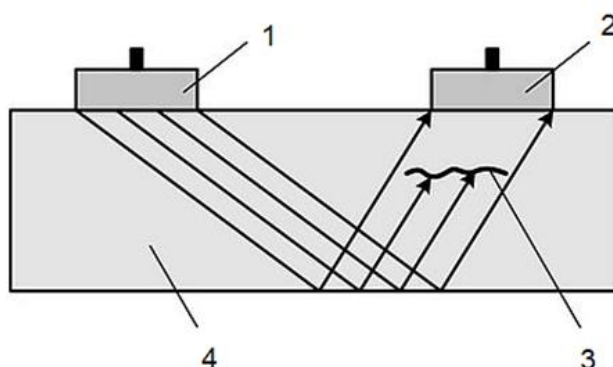


Рис. 1.12. Дзеркально-тіньовий метод:

1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – дефект; 4 — ОК

**Дифракційно-часовий метод (ТОFD)** виконується за допомогою пари датчиків, які розміщуються один напроти одного з однієї сторони ОК, що перевіряється. Один із цих зондів діє як випромінювач, що відправляє імпульс під кутом в ОК, а інший, приймач, приймає цей імпульс. Якщо ж в ОК є дефект, то виникає дифракція звукових хвиль, які і реєструє приймач [6]. При використанні дифракційно-часового методу ми можемо спостерігати положення сигналів на шкалі часу. Так, вимірюючи час прольоту імпульсу,



можна розрахувати глибину тріщини за допомогою тригонометрії. Цей метод дає змогу визначати розміри та місце розміщення дефектів.

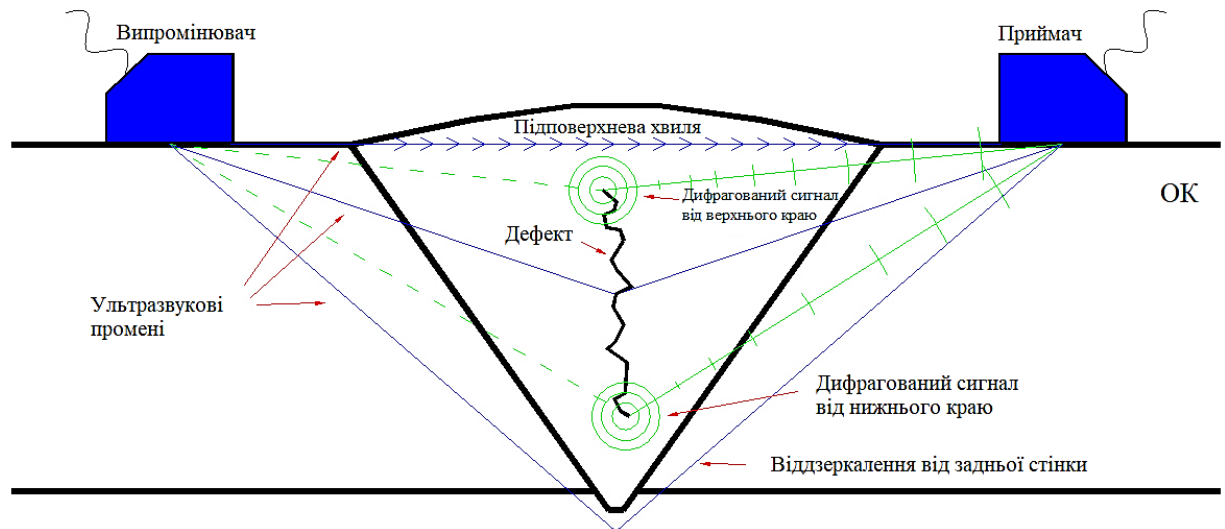


Рис. 1.13. Дифракційно-часовий метод

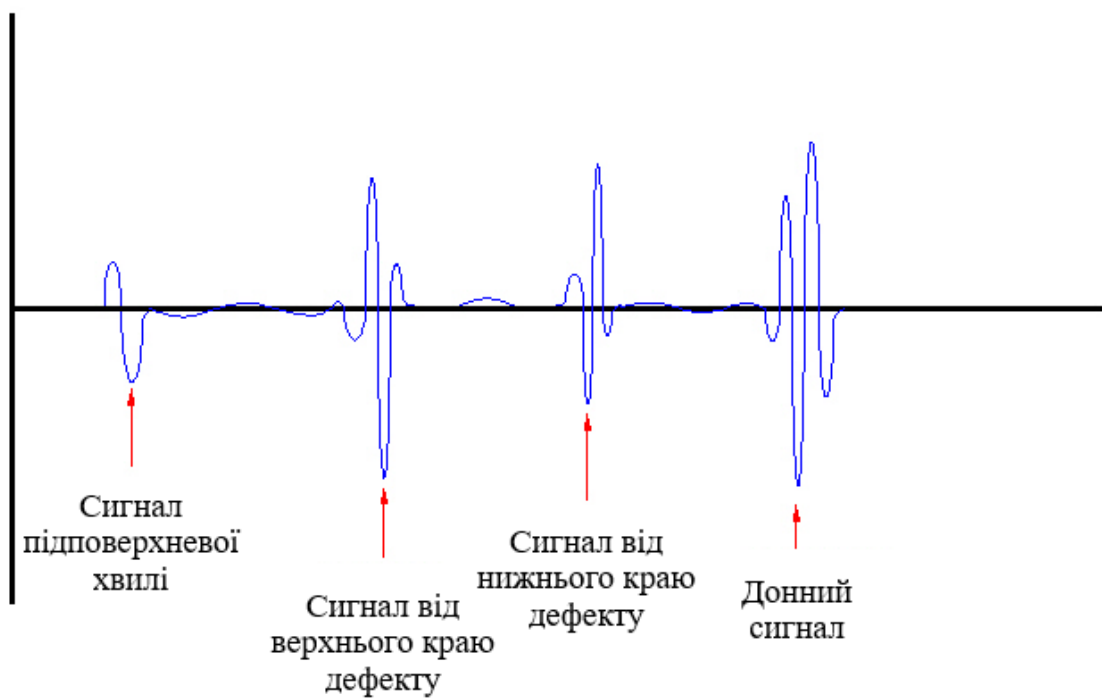


Рис. 1.14. Полярність сигналів, реєстрованих методом TOFD

Дельта-метод — досить складний та рідко використовується при проведенні УЗК. Для його застосування потрібно виконати дуже якісне зачищення зварного з'єднання та провести трудомістке налаштування дефектоскопа, це може зробити тільки висококласний фахівець, проте метод має підвищену чутливість до вертикально орієнтованих тріщин. В його основі

лежить реєстрація дифрагованих хвиль, які перевипромінюються «блискучими точками» — краями дефекту [7].

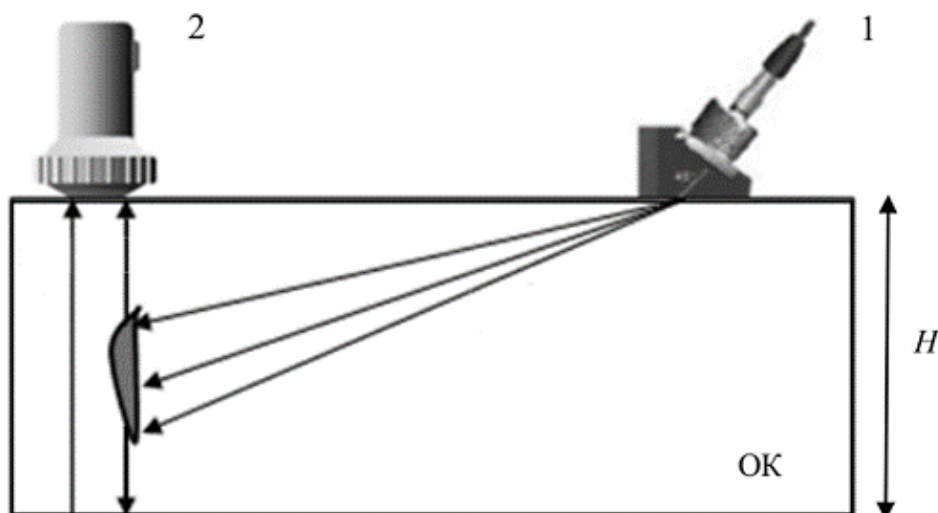


Рис. 1.15. Дельта-метод:

1 – випромінювач; 2 – приймач

#### **1.4. Огляд відомих методів виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії за малого відношення сигнал/шум**

Для виділення сигналу з шумів та перешкод застосовуються різні методи та технічні прийоми. Серед них найбільшого поширення набули кореляційний прийом, оптимальна фільтрація та накопичення сигналів.

Розглянемо спочатку проблему виділення сигналу із білого шуму.

Кореляційний прийом застосовується у випадках, коли форма сигналу відома. Така ситуація складається в радіолокації та при УЗ-дефектоскопії, коли відома форма зондувального імпульсу. Основу при кореляційному прийомі становить корелятор, який обчислює взаємно кореляційну функцію прийнятого сигналу і опорного сигналу. Форма опорного сигналу повинна збігатися з формою очікуваного сигналу, що приймається за відсутності перешкод. Як впливає з теорії оптимальних методів радіоприйому, кореляційний приймач забезпечує високу завадостійкість, але його практична реалізація досить складна [17].

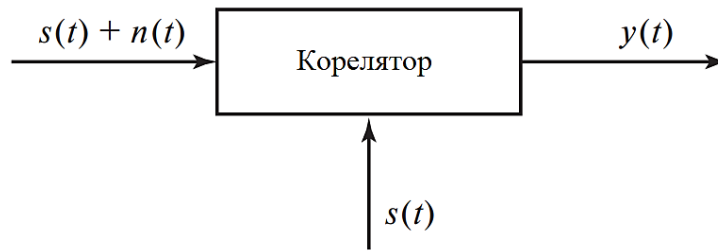


Рис. 1.16. Схема кореляційного приймача

Принцип лінійної фільтрації заснований на відмінності спектрів сигналу та завад. Зазвичай сигнал надходить разом із шумом та завадами, і потрібно відфільтрувати його таким чином, щоб максимально придушити шум та завади, а сигнал при цьому виділити та посилити.

Залежно від того, який параметр сигналу має найбільше значення, застосовують різні види оптимальних фільтрів. В УЗ-дефектоскопії найчастіше використовують спосіб фільтрації, який забезпечує максимально можливе відношення сигналу шуму на виході фільтра для сигналу відомої форми.

Імпульсна характеристика фільтра повторює формою вхідний сигнал, повернений у часі і зміщений вправо на  $t_0$  [9].

Таку імпульсну характеристику називають узгодженою формою сигналу, а такий оптимальний фільтр — узгодженим фільтром. Щоб узгоджений фільтр був фізично реалізований, потрібно, щоб його імпульсна характеристика тотожно дорівнювала нулю при негативних значеннях  $t$ . Для цього час запізнення  $t_0$  має бути не меншим, ніж тривалість сигналу.

Модуль частотної характеристики узгодженого фільтра повторює модуль вхідного спектру сигналу. На тих частотах, на яких сигнал сильніший за шум, коефіцієнт передачі фільтра робиться великим, щоб посилити сигнал; там, де шум сильніший за сигнал, коефіцієнт передачі – невеликий, а на тих частотах, на яких спектральна щільність сигналу дорівнює нулю, коефіцієнт передачі фільтра повинен дорівнювати нулю, щоб повністю придушити шум.

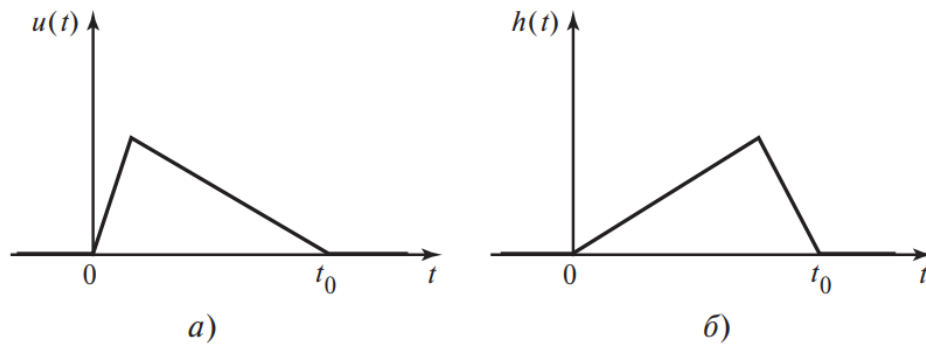


Рис. 1.17. Імпульсна характеристика узгодженого фільтра:  
 а) сигнал на вході узгодженого фільтра; б) імпульсна характеристика  
 узгодженого фільтра

Перевагою узгодженого фільтра в порівнянні з кореляційним приймачем є простіша технічна реалізація, недоліком — складність перебудови фільтра, якщо виникає необхідність налаштування його на іншу форму сигналу.

Застосування квазіоптимальних фільтрів. При фільтрації деяких сигналів на фоні шуму, наприклад таких, як відеоімпульси або прості радіоімпульси без внутрішньої модуляції, застосування узгоджених фільтрів є недоцільним, оскільки їх структура виявляється досить складною, а ефект від їх використання — незначним. У цих випадках доцільніше застосовувати так звані квазіоптимальні фільтри [17].

Квазіоптимальний фільтр – це порівняно простий пристрій, параметри якого підбираються таким чином, щоб отримати максимальне відношення сигнал/шум на виході. Для відеоімпульсу таким квазіоптимальним фільтром може бути простий RC-ланцюг, для радіоімпульсу – коливальний контур або резонансний підсилювач. Як показують розрахунки, відношення сигнал/шум на виході таких фільтрів виходить лише на 10% гірше, ніж у погодженого фільтра. Тому для простих сигналів квазіоптимальні фільтри можуть бути кращими, ніж оптимальні. Для складних сигналів узгоджені фільтри виявляються набагато ефективніше, ніж квазіоптимальні.

Усі перелічені вище методи виявлення сигналів базуються на амплітудних характеристиках сигналів.

### **1.5. Формування завдання дослідження**

Не так давно був розроблений метод фазової ультразвукової дефектоскопії в основі якого лежить статистичний аналіз фазових характеристик сигналів (ФХС). На мою думку, цей метод можна удосконалити та помітно збільшити вірогідність виявлення дефектів, коли відношення сигнал/шум досить низьке.

В даній магістерській дисертації я проведу дослідження, яке буде спрямоване на удосконалення вищесказаного методу за рахунок використання зваженої  $r$ -статистики, яка дасть змогу врахувати нерівноточність результатів фазових вимірювань в одному радіоімпульсі, так ми зможемо збільшити точність визначення фази, а завдяки цьому можна досягти збільшення амплітуди  $r$ -статистики та зменшити вплив шуму, тобто підвищити вірогідність виявлення дефектів.

### **1.6. Висновки до розділу**

У даному розділі було розглянуто важливість ультразвукових досліджень для контролю зварних з'єднань. Методи УЗК дають змогу досить точно та швидко отримувати інформацію про дефекти та несутільності в середині матеріалу. Це і ставить ультразвукову дефектоскопію на перше місце для вирішення задач з контролю внутрішніх дефектів зварних швів. Є можливість з великою точністю отримувати інформацію про розмір, габарити та глибину залягання дефекту. На противагу іншим методам до переваг УЗ-методу контролю також можна віднести відсутність негативного впливу на здоров'я контролера, що також є досить важливою складовою у виборі методу контролю та його поширеності використання. Ці позитивні сторони і мотивують розробників постійно покращувати та розвивати УЗК. Також було розглянуто методи прозвучування ОК, серед яких луно-імпульсний виявився

найбільш універсальним, простим у використанні та цілком задовольняти відповідні вимоги з контролю зварних швів гідроциліндрів.

Досить часто при контролі зварних з'єднань адитивний шум в сигналі заважає в отриманні його корисної складової, яка б дала точні дані про дефект. Розглянуті методи обробки сигналів ультразвукової дефектоскопії за низького відношення сигнал/шум все ще не досконалі та потребують впровадження покращень, які б дозволили з більшою вірогідністю виявляти дефекти у зварних з'єднаннях гідроциліндрів. Саме на це і будуть направлені подальші дослідження.

## 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

### 2.1. Розрахунок типового акустичного тракту ультразвукової дефектоскопії

#### 2.1.1. Вибір робочої частоти датчика та розрахунок розміру мінімального дефекту

Згідно до поставленого технічного завдання, маємо робочу частоту  $f = 5$  МГц. Як відомо, саме така частота є оптимальною при ультразвуковій дефектоскопії та широко використовується. Тепер розрахуємо довжину хвилі в матеріалі ОК (сталь):

В довіднику знаходимо швидкість поширення повздовжньої ультразвукової хвилі в сталі та коефіцієнту Пуансона для сталі марки 45.

$C_{ст} = 5900 \left(\frac{м}{с}\right)$  – швидкість звуку в сталі

$\nu = 0,3$  – коефіцієнт Пуансона

Знаходимо швидкість поширення поперечної хвилі в сталі марки 45 за наступною формулою:

$$C_{срт} = C_{ст} \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}} \quad (2.1)$$

$$C_{срт} = 5900 \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot 0,3}{2 - 2 \cdot 0,3}} = 3154 \left(\frac{м}{с}\right)$$

Знаходимо довжину поперечної хвилі:

$$\lambda_{срт} = \frac{C_{срт}}{f} \quad (2.2)$$
$$\lambda_{срт} = \frac{3154}{5 \cdot 10^6} = 6,307 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}$$

Тепер розраховуємо розмір мінімального дефекту:

$$d_d = \frac{\lambda_{\text{CTT}}}{2} \quad (2.3)$$

$$d_d = \frac{\lambda_{\text{CTT}}}{2} = 3,154 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}$$

### 2.1.2. Розрахунок п'єзоелементу

Спочатку вибираємо оптимальний матеріал для п'єзоелементу. Одним із найрозповсюдженіших матеріалів для п'єзоелементу є ЦТС-19, його і беремо за основу та знаходимо в довіднику його характеристики.

$C_{\text{цтс}} = 3300 \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right)$  – швидкість поширення ультразвуку в ЦТС-19

Тепер у нас є всі дані, щоб розрахувати довжину хвилі в цьому п'єзоперетворювачі:

$$\lambda_{\text{цтс}} = \frac{C_{\text{цтс}}}{f} \quad (2.4)$$

де  $f$  – робоча частота, яка дорівнює  $5 \cdot 10^6$  МГц.

$$\lambda_{\text{цтс}} = \frac{3300}{5 \cdot 10^6} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}$$

Знаходимо товщину п'єзоперетворювача за наступною формулою:

$$h = \frac{\lambda_{\text{цтс}}}{2} \quad (2.5)$$

$$h = \frac{6,6 \cdot 10^{-4}}{2} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}$$

Отже, 0,33 мм – товщина нашого перетворювача.

Тепер знаходимо діаметр п'єзопластини:

Рекомендують керуватися співвідношенням: поперечний розмір поділений на товщину має дорівнювати приблизно 20. Тоді величина збудження пластини буде ефективнішою.

$$\frac{2a}{h} \approx 20 \quad (2.6)$$



$$a = \frac{20 \cdot 0,33}{2} = 3,3 \text{ (мм)}$$

Отже, радіус п'єзопластини дорівнює 3,3 мм, тоді діаметр:

$$\begin{aligned} d_{\text{пеп}} &= 2a \\ d_{\text{пеп}} &= 2 \cdot 3,3 = 6,6 \text{ (мм)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Для зручності в розрахунках приймаємо  $d_{\text{пеп}} = 6 \text{ (мм)}$

### 2.1.3. Вибір моделі розрахунку акустичного тракту

Для того, щоб розпочати розрахунок акустичного тракту, нам необхідно визначитись із його розрахунковою моделлю та побудувати еквівалентну схему цього тракту.

УЗ промінь, що вводиться похило, заломлюється і щоб розрахувати акустичний тракт необхідно знайти розмір уявного перетворювача та його положення. Для цього необхідно випрямити акустичну вісь нашого перетворювача та замінити одним середовищем наступні середовища: падіння та відбивання.

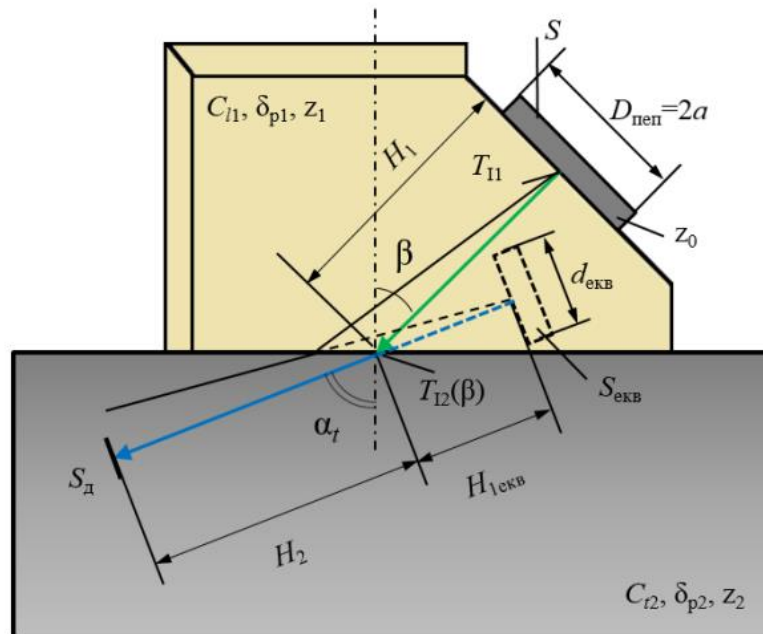


Рис. 2.1. Схематичне зображення акустичного тракту у випадку похилого введення УЗК

В якості матеріалу призми, яка надає можливість введення та прийом УЗ хвиль під потрібним кутом виберемо оргскло. Оргскло доступне та його досить просто обробляти, саме через ці ознаки воно набуло найбільшого поширення.

Відповідно до схеми акустичного тракту і променевої картини проведемо еквівалентні заміни:

$$d_{\text{екв}} = d_{\text{пеп}} \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} \quad (2.8)$$

$$H_{1\text{екв}} = H_1 n \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} = H_1 \frac{C_{l1}}{C_{t2}} \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} \quad (2.9)$$

Величина  $H_1$  визначається конструктивними характеристиками похилого перетворювача. Величина  $H_2$  залежить від глибини залягання відбивача.

Тоді загальна відстань, яку проходить ультразвукова хвиля від випромінювача до відбивача з урахуванням еквівалентних змін для похилого ПЕП:

$$H_{\text{заг}} = H_2 + H_{1\text{екв}} \quad (2.10)$$

Якщо відбивачем є циліндричний отвір довжиною  $l$ , діаметром  $d$ , що знаходиться в дальній зоні поля випромінювача, то коефіцієнт акустичного тракту для луно-імпульсного методу за умови введення поперечної хвилі можна записати в наступному вигляді [11]:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{l S_{\text{пеп}} \frac{\cos\alpha}{\cos\beta}}{4 \lambda_{\text{стт}} (H_2 + H_{1\text{екв}})^2} \sqrt{\frac{d}{\lambda_{\text{стт}}}} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p e^{-2(H_1 \delta_{p1} + H_2 \delta_{p2})} \quad (2.11)$$

де  $l$  – довжина отвору циліндричного отвору,  $S_{\text{пеп}}$  – площа випромінювача,  $\alpha$  – кут введення променя в ОК,  $\beta$  – кут падіння променя на межу призма-ОК,  $H_2$  – шлях променя від поверхні ОК до відбивача,  $H_1$  – шлях променя в призмі,  $d$  – діаметр циліндричного отвору,  $\lambda_{\text{стт}}$  – довжина поперечної хвилі в ОК,  $T_{I1}$  – коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі ПЕП-призма,

$T_{12}(\beta)$  – коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі призма-ОК,  $R_p$  – коефіцієнт віддзеркалення по тиску на межі ОК-дефект,  $\delta_{p1}$  – коефіцієнт згасання звуку по тиску поздовжньої хвилі в призмі,  $\delta_{p2}$  – коефіцієнт згасання звуку по тиску поперченої хвилі в ОК.

#### 2.1.4. Розрахунок коефіцієнта акустичного тракту

Перейдемо до визначення критичних кутів.

Для розрахунку першого критичного кута нам необхідно знайти з довідників швидкість поздовжньої хвилі лише в оргсклі, так як поздовжня швидкість УЗ хвиль в сталі вже визначена в розділі 2.1.

$C_o = 2730 \left(\frac{м}{с}\right)$  – швидкість звуку в оргсклі, тепер можемо знаходити перший критичний кут за наступною формулою:

$$\beta_{кр1} = \arcsin\left(\frac{C_o}{C_{ст}}\right) \quad (2.12)$$

$$\beta_{кр1} = \arcsin\left(\frac{2730}{5900}\right) = 27,562^\circ$$

Розраховуємо другий критичний кут, де вже в знаменнику використовуємо швидкість поперечної УЗ хвилі в сталі, яка також була визначена в розділі 2.1:

$$\beta_{кр2} = \arcsin\left(\frac{C_o}{C_{стt}}\right) \quad (2.13)$$

$$\beta_{кр2} = \arcsin\left(\frac{2730}{3154}\right) = 59,958^\circ$$

Звідси зробимо висновок, що хвиля повинна вводитись в межах кутів від  $27^\circ$  до  $60^\circ$ . З цього діапазону необхідно призначити кут введення.

Нехай кут введення  $\beta_l = 55^\circ$ .

Тепер розраховуємо кут заломлення хвилі в нашому матеріалі ОК за законом Снеліуса:

$$\frac{\sin\beta_l}{C_0} = \frac{\sin\alpha_t}{C_{стt}} \quad (2.14)$$

З цього співвідношення знаходимо  $\alpha_t$ :

$$\alpha_t = \arcsin\left(\frac{\sin\beta_l \cdot C_{\text{CTT}}}{C_0}\right) \quad (2.15)$$

$$\alpha_t = \arcsin\left(\frac{\sin 55^\circ \cdot 3154}{2730}\right) = 71,135^\circ$$

Ближня зона в таких ПЕП знаходиться в призмі, розраховуємо її:

$$r_{\text{бл}} = \frac{\left(\frac{d_{\text{ЕКВ}}}{2}\right)^2}{\lambda_{\text{CTT}}} \quad (2.16)$$

де  $d_{\text{ЕКВ}}$  – еквівалентний діаметр ПЕП, він розраховується за формулою (2.8):

$$d_{\text{ЕКВ}} = 6 \frac{\cos 71,135^\circ}{\cos 55^\circ} = 3,382 \text{ (мм)}$$

тоді

$$r_{\text{бл}} = \frac{\left(\frac{3,382}{2}\right)^2}{6,307 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3} = 4,535 \text{ (мм)}$$

Тепер розраховуємо еквівалентний шлях променю в призмі за формулою (2.9). Для розрахунку приймаємо  $H_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  м.

$$H_{1\text{ЕКВ}} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2730}{3154} \cdot \frac{\cos 71,135^\circ}{\cos 55^\circ} = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ (м)} = 4,88 \text{ (мм)}$$

Далі розрахуємо коефіцієнти проходження. Коефіцієнт проходження УЗ променю по інтенсивності на межі ПЕП-призма:

$$T_{I1} = \frac{4 \cdot z_{\text{ЦТС}} \cdot z_o}{(z_{\text{ЦТС}} + z_o)^2} \quad (2.17)$$

де,  $z_{\text{ЦТС}}$  – імпеданс ЦТС-19, а  $z_o$  – імпеданс оргскла;

$$z_{\text{ЦТС}} = \rho_{\text{ЦТС}} \cdot C_{\text{ЦТС}} \quad (2.18)$$

$$z_o = \rho_o \cdot C_o \quad (2.19)$$

З довідників визначаємо:

$$\rho_{\text{ЦТС}} = 7400 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right) \text{ – густина в ЦТС-19}$$

$$\rho_o = 1270 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right) \text{ – густина в оргсклі}$$

$$z_{\text{ЦТС}} = 7400 \cdot 3300 = 2442 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}\right)$$

$$z_o = 1270 \cdot 2730 = 3467 \cdot 10^3 \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2 \cdot \text{С}} \right)$$

$$T_{I1} = \frac{4 \cdot 2442 \cdot 10^4 \cdot 3467 \cdot 10^3}{(2442 \cdot 10^4 + 3467 \cdot 10^3)^2} = 0,435$$

Ми бачимо, що втрати енергії між ЦТС-19 та оргсклом становлять приблизно 56,5%, то потрібно використовувати просвітлюючий шар, щоб забезпечити умову, при якій коефіцієнт проходження буде наближено дорівнювати 1. Але так як в реальності через велику кількість чинників цього досягнути не можливо, то призначимо

$$T_{I1} = 0.95.$$

Розраховуємо імпеданс матеріалу, просвітлюючого шару, щоб потім віднайти його за значенням:

$$z_{\text{пш}} = \sqrt{z_{\text{цтс}} \cdot z_o} \quad (2.20)$$

$$z_{\text{пш}} = \sqrt{2442 \cdot 10^4 \cdot 3467 \cdot 10^3} = 9201 \cdot 10^3 \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2 \cdot \text{С}} \right)$$

За допомогою довідника знаходимо матеріал, імпеданс якого буде приблизно дорівнювати розрахованому та виписуємо його характеристики.

Цим матеріалом буде магній з такими характеристиками:

$$z_{\text{м}} = 9980 \cdot 10^3 \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2 \cdot \text{С}} \right);$$

$$C_{\text{м}} = 5740 \left( \frac{\text{М}}{\text{С}} \right);$$

$$\rho_{\text{м}} = 1740 \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right).$$

Розраховуємо товщину просвітлюючого шару за формулою:

$$d_{\text{пш}} = \frac{C_{\text{м}}}{4f} \quad (2.21)$$

$$d_{\text{пш}} = \frac{5740}{4 \cdot 5 \cdot 10^6} = 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ (м)} = 0,287 \text{ (мм)}$$

Для розрахунку коефіцієнта проходження УЗ променя по інтенсивності на межі призма-ОК потрібно скористатись залежністю коефіцієнта проходження хвилі з оргскла в сталь:

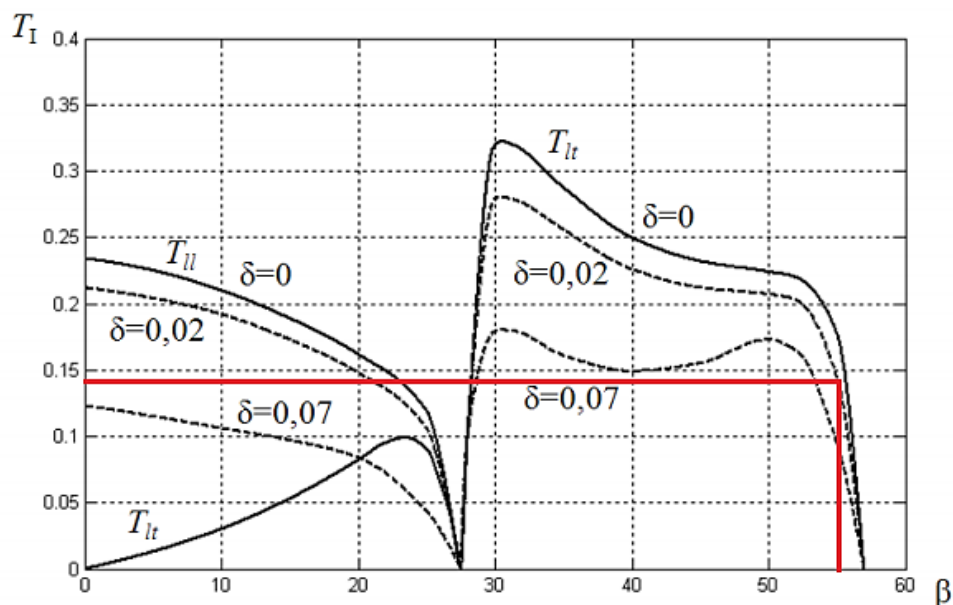


Рис. 2.2. Залежність коефіцієнта проходження при падінні повздовжньої хвилі з оргскла в сталь

Товщину шару рідини в довжинах хвилі приймаємо  $\delta = 0,02$ .

При нашому куті введення  $\beta = 55^\circ$ , коефіцієнт проходження буде дорівнювати  $T_{I2} = 0,14$ .

Задаємо коефіцієнт відбиття:  $R_p = 1$

Тепер розраховуємо площу ПЕП:

$$S_{\text{пеп}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пеп}}^2}{4} \quad (2.22)$$

$$S_{\text{пеп}} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,274 \text{ (мм}^2\text{)}$$

Задаємося коефіцієнтами згасання для оргскла та сталі:

$$\text{Для оргскла: } \delta_{po} = 40 \left( \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right);$$

$$\text{Для сталі: } \delta_{pст} = 6,8 \left( \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right);$$

Висота об'єкта контролю 15 мм, кут заломлення  $\alpha = 71,135^\circ$ , з цих даних розраховуємо  $H_2$ .

$$H_2 = \frac{H_{\text{ок}}}{\cos \alpha} \quad (2.23)$$

$$H_2 = \frac{15}{\cos 71,135^\circ} = 46,39 \text{ (мм)}$$

Довжину отвору (тріщини) приймаємо:

$$l = 1 \cdot 10^3 \text{ (м)}$$

Всі параметри для розрахунку коефіцієнта акустичного тракту відомі, ми можемо його розрахувати за формулою (2.11):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 28,274 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\cos 71,135^\circ}{\cos 55^\circ}}{4 \cdot 6,307 \cdot 10^{-4} \cdot (15 \cdot 10^{-3} + 4,88 \cdot 10^{-3})^2} \sqrt{\frac{3,154 \cdot 10^{-4}}{6,307 \cdot 10^{-4}}} \cdot 0,95 \cdot 0,14 \\ \cdot 1 \cdot e^{-2(10 \cdot 10^{-3} \cdot 20 + 46,39 \cdot 10^{-3} \cdot 6,8)} = 5,404 \cdot 10^{-5}$$

### 2.1.5. Розрахунок електроакустичного тракту

Питання акустичного тракту детально розглянуто в роботі [11].

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

Розраховані значення коефіцієнту акустичного тракту дають змогу приблизно оцінити напруги випроміненого та прийнятого сигналів, які задовольняють заданим вимогам. Напруга прийнятого суміщеним перетворювачем луно-сигналу визначається як:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{в}} \cdot K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{пп}} \quad (2.24)$$

де  $U_{\text{в}}$  – напруга випромінювання,  $K_{\text{а.т.}}$  – коефіцієнт акустичного тракту,  $K_{\text{пп}}$  – коефіцієнт подвійного перетворення.

Коефіцієнт  $K_{\text{пп}}$  близький по величині до коефіцієнту електромеханічного зв'язку п'єзоперетворювача, але на відміну від нього, окрім оцінки п'єзоелектричних властивостей п'єзоматеріалу, залежить ще від форми і розмірів перетворювача, частоти, демпфування (як механічного, так і електричного) та ін.

Для п'єзоперетворювача ЦТС-19 коефіцієнт подвійного перетворення знаходиться в межах  $K_{\text{пп}} = 0.1 \div 0.3$ . Прийmemo  $K_{\text{пп}} = 0,3$ .

При амплітудному способі детектування сигналів важливою задачею є забезпечення умов виявлення сигналу на фоні завад. Для цього повинна виконуватись умова:

$$U_{\text{min}} \geq n \cdot U_3 \quad (2.25)$$

де,  $U_{\text{min}}$  – мінімальна прийнята напруга ПЕП,  $U_3$  – максимальне значення напруги завад,  $n$  – ціле число.

Задаємося рівнем завад  $U_3 = 100$  (мкВ),  $n = 4$ , тоді:

$$U_{\text{min}} = 4 \cdot 100 = 400 \text{ мкВ}$$

Розраховуємо напругу випромінювання з формули напруги прийнятого суміщеним перетворювачем луно-сигналу:

$$U_{\text{в}} = \frac{U_{\text{п}}}{K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{пп}}} \quad (2.26)$$

$$U_{\text{в}} = \frac{400 \cdot 10^{-6}}{5,404 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3} = 24,672 \text{ (В)}$$

Прийmemo напругу випромінювання  $U_{\text{в}} = 30$  (В), тоді:

$$U_{\text{п}} = 30 \cdot 5,404 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3 = 0,486 \text{ (мВ)}$$

## 2.2. Модель аналізованого сигналу та поняття сигнал/шум

Вже відомо, що ультразвукова луно-імпульсна дефектоскопія для виявлення дефектів та різних несучільностей широко застосовується для проведення НК в промисловості.

Загальний вигляд моделі зонduючого УЗ-сигналу з гармонічним заповненням, що випромінюється в ОК:

$$u_3(t) = U(t) \sin 2\pi ft, t \in [0, T_3] \quad (2.27)$$

де  $U(t)$  – обвідна сигналу,  $f$  – частота сигналу,  $t$  – поточний час,  $T_3$  – інтервал часу заданого сигналу  $u_3(t)$ .

Зазвичай аналізується такий сигнал  $u_{\delta}(t)$  у виді адитивної суміші, яка містить корисну інформаційну складову, що представлена періодичною



послідовністю відбитих луно-сигналів (період повтору  $T_n$ ), сигнал ревербераційних шумів та гаусів шум [11].

$$u_o(t) = u_3(t - \tau) + u_p(t) + \xi(t) = u_k(t) + u_p(t) + \xi(t) \quad (2.28)$$

де  $\tau_3$  – затримка 1-го луно-імпульсу по відношенню до зондуючого;

$u_k(t)$  та  $u_p(t)$  – корисна та ревербераційна складові у сигналі відповідно;

$\xi(t)$  – гаусів шум, що має нульове математичне сподівання та дисперсію  $\sigma^2$ .

На рис. 2.4. продемонстровано типову модель поширення УЗ-променів при контролі зварного з'єднання луно-імпульсним методом.

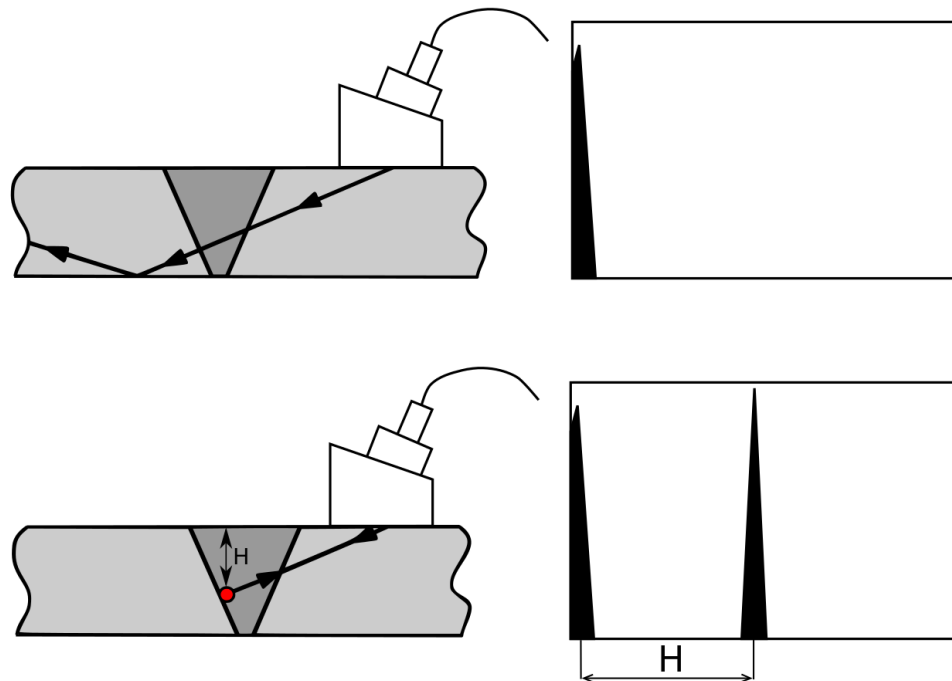


Рис. 2.3. Поширення УЗ-променів в ОК при контролі луно-імпульсним методом

Як вже відомо, при застосуванні луно-імпульсного методу за наявності дефекту на приймач надходить додатковий імпульс. Завдяки появі цього імпульсу можна судити про глибину та розміри дефекту. Тобто, вибраний метод контролю може забезпечити досить змістовною та точною інформацією про стан ОК, але при дефектоскопії луно-імпульсним має місце затухання

ультразвукових коливань. Воно виникає через такі процеси як поглинання, розсіювання, тощо.

При контролі цим методом є актуальною проблема отримання корисної інформаційної складової сигналу на фоні адитивного шуму.

Базова і загальноприйнята модель шуму відома як адитивний гаусів білий шум (Additive White Gaussian Noise), який імітує різні випадкові процеси, що спостерігаються в природі. Адитивний — як впливає з назви, шум додається до сигналу. Іншими словами, отриманий сигнал відповідає сигналу, що передається плюс деякий шум. Більш того, шум генерується випадковим чином і має індивідуальну ймовірність сигналу, тобто поява одного не впливає на ймовірність появи іншого. Білий — це стосується ідеї, що шум має однаковий розподіл потужності на кожній частоті. Отже, білий шум має постійну спектральну густину потужності (міра потужності сигналу в порівнянні з частотою) на всіх частотах. Гаусів — через випадкову природу джерела шуму для розрахунку ймовірності подій використовується математична модель. Гаусів розподіл або нормальний розподіл має нульове середнє значення в часовій області, що представлене у вигляді дзвоноподібної кривої, симетричної щодо середнього значення без зміщення вліво або вправо [19].

Гаусів шум може бути зумовлений структурними шумами матеріалу ОК, шорсткістю відбиваючої поверхні, розсіянням, поглинанням, тощо.

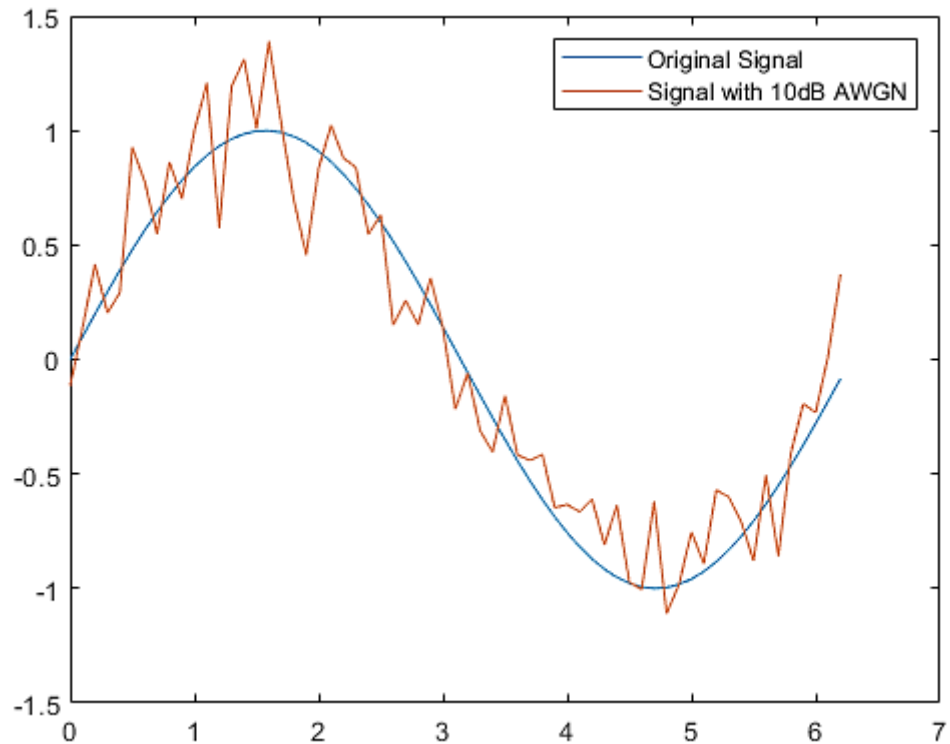


Рис. 2.4. Фрагмент моделі сигналу та сигналу з доданим адитивним білим гаусовим шумом (AWGN)

Досить часто рівень шумів досягає рівня корисної складової сигналу і стає неможливим виконати достовірний контроль ОК. Особливо це стосується матеріалів із високим рівнем загасання. Умови контролю та властивості ОК при луно-методі бувають різні, а отже, і відношення корисної складової до шуму також будуть різними. По цьому відношенню можна судити про чутливість та особливості будови контролюючої апаратури.

Визначення ефективності опрацювання сигналів апаратурою базується на визначенні співвідношення сигналу до шуму (С/Ш), по цьому параметру можна оцінити якість апаратури.

В загальному вигляді відношення С/Ш (SNR) визначається за формулою 2.29 [18]:

$$SNR = \frac{P_{sig.}}{P_{шуму}} = \left( \frac{A_{sig.}}{A_{шуму}} \right)^2 \quad (2.29)$$

де  $P_{sig.}$  та  $P_{шуму}$  – потужність корисного сигналу та потужність шуму відповідно;

$A_{sig.}$  та  $A_{шуму}$  – середньоквадратичне значення амплітуди сигналу та середньоквадратичне значення амплітуди шуму відповідно.

Оцінку параметру С/Ш можна розглядати різними способами [13]:

- 1) як відношення амплітуди сигналу до середнього квадратичного значення шуму;
- 2) як відношення пікового значення сигналу до середнього квадратичного значення шуму;
- 3) як відношення потужності сигналу до потужності шуму;
- 4) як відношення енергії сигналу до енергії шуму.

Для того, щоб вплив шумів на точність контролю був мінімальний, необхідно щоб співвідношення С/Ш було якомога більше .

Тож для того, щоб зменшити вплив шумів на вірогідність контролю існують і активно розробляються нові методи з обробки сигналів. Найчастіше вживані існуючі методи з обробки сигналів були розглянуті у розділі 1.4, які орієнтовані на виявлення амплітудних характеристик, проте точність амплітудних методів при низькому співвідношенню С/Ш бажає кращого.

### **2.3. Теоретичне обґрунтування фазового методу виявлення сигналів УЗ-дефектоскопії**

Як вже відомо, в основі луно-метода лежить опромінення досліджуваного ОК короткими УЗ імпульсами з подальшим вимірюванням інтервалу часу проходження цих імпульсів в ОК. Нині для аналізу таких сигналів найчастіше використовуються їх амплітудні характеристики. Методи, що засновані на аналізі амплітудних характеристик легкі в реалізації, проте схильні до втрати деякої інформації, яка отримується з фазової характеристики сигналів (ФХС). Через втрати певної інформації з ФХС контроль ОК проходить з меншою точністю та більшою похибкою. Особливо

це проявляється за малого співвідношення С/Ш. Для більш точного аналізу ОК за низького співвідношення С/Ш доречно використовувати метод, в основі якого лежить визначення часу затримки за круговими статистиками ФХС [10].

### 2.3.1. Статистична обробка характеристик сигналів за допомогою використання перетворення Гільберта

Перетворення Гільберта (ПГ) застосовується до сигналів УЗ дефектоскопії задля визначення їх фазових характеристик [20-23].

Найпростішим варіантом є визначення ПГ за допомогою згортки. Використовуючи такий підхід, ПГ дійсної функції  $x(t)$ , що визначена на всій області  $-\infty < t < \infty$ , є дійсною функцією  $\hat{x}(t)$  та визначається за допомогою формули (2.30):

$$\hat{x}(t) = \mathbf{H}[x(t)] = v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(\tau - t)} d\tau, \quad (2.30)$$

в якій  $\mathbf{H}[\cdot]$  – оператор ПГ, *v.p.* позначає головне значення інтегралу Коші,

функція  $\frac{1}{\tau - t}$  називається ядром ПГ.

Таким чином, функція  $\hat{x}(t)$  є згортокою вхідного сигналу  $x(t)$  та функції  $\frac{1}{\pi t}$ .

Фізично перетворення Гільберта еквівалентне спеціальному виду лінійного фільтра – фільтру Гільберта, де всі амплітуди спектральних складових залишаються незмінними, але їх фази зміщуються на  $\frac{\pi}{2}$ .

Однозначне представлення сигналу  $x(t)$  формується по його амплітудній та фазовій характеристиках за допомогою ПГ (2.30):

$$x(t) = A(t) \cos[\Phi(t)]. \quad (2.31)$$

Розрахунок характеристик  $A(t)$  та  $\Phi(t)$  відносно  $x(t)$  реалізується таким чином:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (2.32)$$

$$\varphi(t) = \Phi(t) \bmod 2\pi = \arctg \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}\hat{x}(t)[1 + \text{sign}x(t)]\}, \quad (2.33)$$

де  $(\cdot) \bmod 2\pi$  – операція, за допомогою якої визначається залишок числа по модулю  $2\pi$ , а  $\text{sign}[\cdot]$  – це знакова функція.

$$\text{sign}a = \begin{cases} 1, & a > 0; \\ 0, & a = 0, \\ -1, & a < 0. \end{cases} \quad (2.34)$$

Тобто, завдяки ПГ поточні зміни  $A(t)$  і  $\Phi(t)$  можуть бути проаналізованими та оціненими, що сприяє виявленню та аналізу ймовірнісного характеру ФХС та АХС. Абсолютно нормальним є те, що зашумлені ділянки часу з корисним сигналом та без нього створюють відмінність у ймовірнісних характеристиках  $\Phi(t)$  та  $A(t)$ . Внаслідок чого, виникає необхідність у виявленні корисних сигналів УЗ дефектоскопії за низького відношення С/Ш.

Проте сучасна вимірювальна техніка базуються на обробці цифрових інформаційних сигналів [24]. Тож і ПГ необхідно реалізувати у цифровій формі. У такому разі, дискретні характеристики періодичних сигналів визначаються за наступним алгоритмом. Береться час спостереження  $[0, T_C]$ , на якому задається ґратка  $S = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_n\}$  з упорядкованою множиною елементів, для цієї ґратки повинна виконуватись нерівність  $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_j < \dots < t_n \leq T_C$ . Розміщення елементів у цій ґратці  $S$  є рівномірним, вони являють собою арифметичну прогресію з різницею прогресії  $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ . Сигнал на ґратці  $S$  вказується у вигляді послідовності значень  $x(t_j) = x[j]$ , яка являє собою зображення неперервного сигналу  $x(t)$ . Періоди аналізу (декілька)  $x(t)$  розміщуються на інтервалі аналізу.

Множини  $S$  та  $\{x[j], j = \overline{1, n}\}$  – область визначення та областю значень аналізованої функції відповідно,  $n = \left[ \frac{T_C}{\Delta t} \right]^+$ , де  $[\cdot]^+$  – ціла частина.

Щоб отримати гільберт-образ  $\hat{x}[j]$  послідовності  $\{x[j], j = \overline{1, n}\}$ , можна виконати ДПГ. Це дає змогу отримати АХС:

$$A[j] = \sqrt{x^2[j] + \hat{x}^2[j]}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.35)$$

$$\varphi[j] = \operatorname{arctg} \frac{\hat{x}[j]}{x[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \operatorname{sign} \hat{x}[j][1 + \operatorname{sign} x[j]]\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.36)$$

Тобто, ДПГ надає можливість отримання масивів статистичних даних  $A[j]$  – АХС та  $\Phi[j]$  – ФХС, а також статистику фазових зсувів сигналів

$$\varphi[j] = \Phi[j] - 2\pi j \frac{\Delta t}{T}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.37)$$

де  $T$  – період сигналу  $x(t)$ .

Дискретні характеристики сигналу (2.35), (2.36), (2.37) можна обробляти за допомогою статистичних методів обробки даних.

У більшості випадків спостереження сигналів УЗ дефектоскопії відбувається на скінченних інтервалах часу. Проте, ПГ (2.30) базується на інтегруванні на нескінченному інтервалі часу, що є фізично неможливим. Тож практичний аналіз сигналів відбувається на обмеженому інтервалі спостереження  $T_C$ . Звідси випливає, що аналізується лише частина досліджуваного сигналу, яка представлена у вигляді добутку сигналу на вагову функцію (вікно). У такому разі можливе виникнення методичної похибки, яка більшає при приближенні до меж інтервалу спостереження сигналу та менша в його середині. Ця похибка базується на явищі Гіббса.

### 2.3.2. Обґрунтування вибірових характеристик

Обґрунтуємо вибірові характеристики для середнього фазового зсуву та його дисперсії. Результати окремого фазового вимірювання  $\varphi_j$  можна

зобразити відповідним плоским кутом  $\varphi_j$ , який висікає на колі одиничного радіуса  $R=1$  дугу довжиною  $l_j$  між додатною напіввіссю абсцис та вектором  $\overline{OP_j}$  (рис. 2.5,а). Вектор  $\overline{OP_j}$  має декартові  $[\cos \varphi_j, \sin \varphi_j]$  і полярні  $(1, \varphi_j)$  координати.

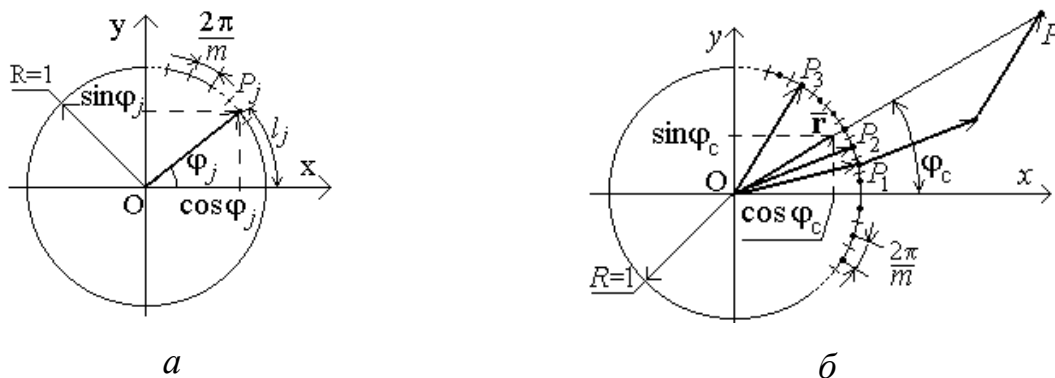


Рис. 2.5. Графічне зображення на колі результату одного вимірювання (а) та усереднення вибірки вимірювань фазових зсувів об'єму  $M = 3$  (б)

Вимірювання виконуються з певним кроком  $\frac{2\pi}{m}$ . Дискретному характеру результатів фазових вимірювань відповідає розбиття кола на  $m$  клас-інтервалів. Тому точки  $P_j$  – це середини клас-інтервалів.

Будь-яка конструктивна характеристика  $L$  кругового середнього, за якою обробляються результати фазових вимірювань, повинна задовільняти умову адитивності

$$\{L(\varphi_1 - v, \dots, \varphi_M - v)\}(\text{mod } 2\pi) \equiv \{L(\varphi_1, \dots, \varphi_M) - v\}(\text{mod } 2\pi), \quad v \in [0, 2\pi), \quad (2.38)$$

тобто для довільного кута  $v$  дробові частини (за модулем  $2\pi$ ) чисел  $\{L(\varphi_1, \dots, \varphi_M) - v\}$  та  $L(\varphi_1 - v, \dots, \varphi_M - v)$  мають збігатися. Інакше кажучи, фазовий зсув, що задається характеристикою  $L(\varphi_1, \dots, \varphi_M)$ , повинен адитивно залежати від початкового фазового кута  $v$ .

Для множини  $\{\varphi_j, j = \overline{1, M}\}$  визначимо поняття *вибіркового кругового середнього фазового зсуву* як напрямлення суми всіх одиничних векторів  $\overline{OP_1}, \dots, \overline{OP_M}$ . На рис.2.5,б розглянуто випадок  $M = 3$ . Сумарний вектор



$$\overline{OP} = \sum_{j=1}^3 \overline{OP}_j \quad \text{має декартові координати} \quad \left( \sum_{j=1}^3 \cos\varphi_j, \sum_{j=1}^3 \sin\varphi_j \right) \quad \text{і}$$

характеризується вибірковим круговим середнім фазовим зсувом  $\varphi_c$ . Фізичний зміст  $\varphi_c$  можна пояснити таким чином. Усі одиничні вектори закінчуються точками  $P_j$  одиничного кола. Якщо всім цим точкам приписати однакову “масу”  $1/M$ , то координати “центра мас” цієї системи визначатимуться

$$C = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \cos\varphi_j, \quad S = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sin\varphi_j. \quad (2.39)$$

Перерахунок координат вектора  $\vec{r}$  з декартової системи в полярну виконується відповідно до формул

$$r = |\vec{r}| = \sqrt{C^2 + S^2}, \quad (2.40)$$

$$C = r \cos\varphi_c, \quad S = r \sin\varphi_c. \quad (2.41)$$

Величину  $r$  називають *вбірковою результуючою довжиною вектора* (ВРД).

Отже, вектори  $\vec{r}$  та  $\overline{OP}$  розташовані у просторі під однаковим кутом  $\varphi_c$  до осі  $Ox$ . Значення  $\varphi_c$  можна обчислити як  $\varphi_c = \mathbf{L}[S, C]$ . Слід зауважити, що при  $r = 0$  напрямлення  $\varphi_c$  в інтервалі  $[0, 2\pi)$  однозначно не визначається.

Доведемо, що при  $r > 0$  ВКС  $\varphi_c$  задовільняє вимогу (2.38), а  $r$  не залежить від початку відліку кутів. Дійсно, якщо кожний з векторів  $\overline{OP}_j$  (рис. 2.5,б) повернути у просторі на кут  $\nu \in [0, 2\pi)$ , то це не вплине на  $r$ , а приведе лише до повороту вектора у просторі на такий же кут  $\nu$ . Після повороту  $\vec{r}$  нові координати кінця вектора становитимуть

$$\overline{C} = r \cos(\varphi_c - \nu), \quad \overline{S} = r \sin(\varphi_c - \nu). \quad (2.42)$$

Неважно пересвідчитись, що

$$\bar{C} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \cos(\varphi_j - \nu) = r \cos(\varphi_c - \nu), \quad \bar{S} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sin(\varphi_j - \nu) = r \sin(\varphi_c - \nu), \quad (2.43)$$

тобто

$$\varphi_c(\varphi_1 - \nu, \dots, \varphi_M - \nu) \equiv \{\varphi_c(\varphi_1, \dots, \varphi_M) - \nu\} \pmod{2\pi}, \quad (2.44)$$

$$r(\varphi_1 - \nu, \dots, \varphi_M - \nu) = r(\varphi_1, \dots, \varphi_M), \quad (2.45)$$

що, власне, доводить властивість адитивності ВКС фазових зсувів.

#### 2.4. Удосконалення відомого методу за рахунок вагової обробки результатів нерівноточних вимірювань

Відомий спосіб виявлення сигналів за  $r$ -статистикою ґрунтується на аналізі її поточних значень, які обчислюються за формулою [10]

$$r[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \sqrt{\left( \sum_{k=j-(M_w-1)/2}^{j+(M_w-1)/2} \cos \Delta\varphi[k] \right)^2 + \left( \sum_{k=j-(M_w-1)/2}^{j+(M_w-1)/2} \sin \Delta\varphi[k] \right)^2}, \quad (2.46)$$

$$j = (M_w - 1)/2, N - (M_w - 1)/2.$$

де  $M_w$  – апертура ковзного вікна,  $\Delta\varphi[k]$  – поточні значення фази сигналу, які отримані за його фазовою характеристикою. Вважається, що всі результати вимірювання фази отримані з однаковою точністю.

На ділянках реалізації сигналу, де присутня тільки шумова складова, значення  $\Delta\varphi[k]$  більш-менш рівномірно розподілені в інтервалі  $[0, 2\pi)$ , тому значення  $r$ -статистики на цих ділянках наближені до нуля. Натомість на ділянках, де присутня суміш гармонічного сигналу та шуму, значення  $\Delta\varphi[k]$  концентруються на інтервалах на багато менших за інтервалі  $[0, 2\pi)$ , тому значення  $r$ -статистики на цих ділянках наближені до нуля. Ця властивість власне і покладена в основу фазового способу виявлення радіосигналів.

Тепер розглянемо сутність удосконалення цього методу.

Нехай за результатами незалежних вимірювань випадкового фазового зсуву маємо вектор  $(\varphi_i, i = \overline{1, m})$ . Оскільки  $\varphi_i \in [0, 2\pi)$ , отримані результати вимірювання представимо одиничними векторами на колі. Це має сенс з

огляду на подальшу обробку сукупних фазових вимірювань, оскільки сумарний вектор несе інформацію як про вибіркоче кругове середнє  $\varphi_c$ , так і про розсіювання фази в околі цього значення. Середнє квадратичне відхилення (СКВ)  $\sigma$  для  $\varphi_c$  можна перерахувати у вибіркочову довжину вектора (ВДВ)  $r$  за формулою:

$$\sigma = \sqrt{-2 \ln r} . \quad (2.47)$$

По суті, підсумовування на колі – це вагова обробка: результати, які розміщені далі від  $\varphi_c$  повинні давати менший внесок у результуючий вектор. Цей висновок узгоджується з геометричним трактуванням обробки результатів нерівноточних фазових вимірювань, показаним на рис. 2.6.

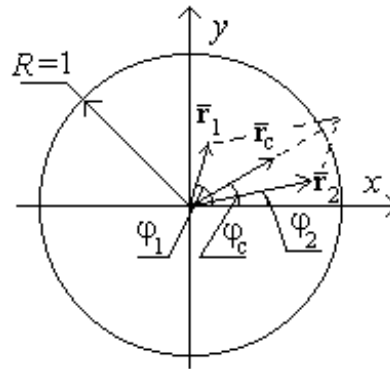


Рис. 2.6. Графік, що ілюструє підсумовування результатів нерівноточних фазових вимірювань

На цьому рисунку зображено процес усереднення результатів вимірювання  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  двох незалежних фазових зсувів з різними дисперсіями, які відображаються на одиничному колі відповідно векторами  $\bar{r}_1$ ,  $\bar{r}_2$ .

Значенню кута  $\varphi_2$ , що має меншу дисперсію, відповідає довший вектор  $\bar{r}_2$ . Сумарний вектор  $\bar{r}_c$ , який містить інформацію про сумарний кут  $\varphi_c$  і його дисперсію, розміщений ближче до вектора  $\bar{r}_2$

$$r_c = |\bar{r}_c| = 0,5 \cdot \sqrt{\bar{C}'^2 + \bar{S}'^2}, \quad \varphi_c = L(\bar{S}', \bar{C}') \quad (2.48)$$

$$\bar{S}' = 0,5 \cdot (r_1 \sin \varphi_1 + r_2 \sin \varphi_2), \quad \bar{C}' = 0,5 \cdot (r_1 \cos \varphi_1 + r_2 \cos \varphi_2) \quad (2.49)$$

Таке логічне обґрунтування не можна вважати строгим, але воно дає наочне представлення про визначення ВДВ  $r_c$  у випадку опрацювання результатів нерівно точних фазових вимірювань. Власне такий випадок і має місце при опрацювання фазової характеристики радіо імпульсного сигналу в адитивній суміші з шумом. В цьому випадку для різних ділянок аналізованої суміші маємо різні значення відношення сигнал/ шум, отже і результати обчислених поточних значень фазових зсувів сигналу матимуть різну точність. Це власне і дає підстави вважати, що використання формул (2.48), (2.49) дасть змогу покращити точність визначення  $r$ -статистики в задачі виявлення сигналів УЗК.

В УЗК зазвичай використовують радіоімпульсні сигнали з гауссовою обвідною. Такі сигнали спостерігаються на фоні шуму з незмінними статистичними характеристиками. Тому відношення сигнал/шум для середини радіоімпульсу (де амплітуда сигналу найбільша) більша, ніж для периферійних ділянок радіоімпульсу, для яких амплітуда радіоімпульсу зменшується, а дисперсія шуму лишається незмінною. Подібну залежність має і функція  $r[j, M_w]$ , яку можна використати як функцію зважування фазових даних. Враховуючи вище наведене в роботі запропоновано виявляти сигнали УЗК за зваженою  $r$ -статистикою, яка визначається згідно виразу

$$r_{зв}[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \sqrt{\left( \sum_{k=j-(M_w-1)/2}^{j+(M_w-1)/2} r[k] \cdot \cos \Delta\varphi[k] \right)^2 + \left( \sum_{k=j-(M_w-1)/2}^{j+(M_w-1)/2} r[k] \cdot \sin \Delta\varphi[k] \right)^2} \quad (2.50)$$

$$j = (M_w - 1)/2, N - (M_w - 1)/2.$$

Такий алгоритм опрацювання фазових даних передбачає на першому етапі визначення незваженої  $r$ -статистики, а на другому етапі – її використання для зважування фазових даних, за якими обчислюють функцію  $r_{зв}[j, M_w]$ , за якою власне і виявляють сигнали УЗК. Для цього виконують її порівняння з певним порогом  $\Pi$ : якщо  $r_{зв}[j, M_w] > \Pi$  приймається рішення про наявність сигналу УЗК, якщо  $r_{зв}[j, M_w] \leq \Pi$  приймається рішення про відсутність сигналу УЗК. Очікується, що такий ітераційний алгоритм опрацювання фазових даних

дасть змогу зменшити значення  $r_{\text{зв}}[j, M_w]$  на ділянках з шумом і на цій основі підвищити вірогідність правильного виявлення сигналів УЗК за рахунок зменшення помилки першого роду.

## 2.5. Розробка структурної схеми та розрахунок АЦП

### 2.5.1. Розробка структурної схеми

Структура запропонованої системи ультразвукового контролю представлена на рис. 2.7.

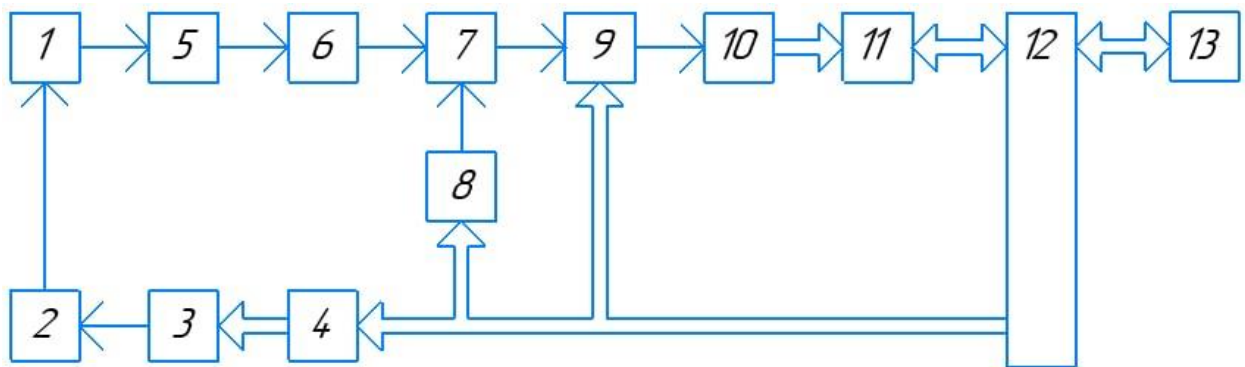


Рис. 2.7. Структурна схема системи ультразвукового контролю

На цьому рисунку були використані такі позначення:

- 1 – Ультразвуковий перетворювач
- 2 – Підсилювач
- 3 – ЦАП
- 4 – Цифровий генератор сигналу
- 5 – Вимірювальний підсилювач
- 6 – Попередній підсилювач
- 7 – ЧРЧ
- 8 – Блок управління ЧРЧ
- 9 – Підсилювач з керованим коефіцієнтом підсилення
- 10 – АЦП
- 11 – RAM

12 – Мікроконтролер

13 – ПК

Цифровий генератор сигналу 4 формує напругу живлення, після чого проходить через ЦАП 3 та підсилюється за допомогою підсилювача 4 і потрапляє на ультразвуковий перетворювач 1. Вихідний сигнал якого через вимірювальний підсилювач 5 потрапляє на попередній підсилювач 6. Підсилений сигнал потрапляє на схему ЧРЧ 7, яка керується блоком управління ЧРЧ 8. Схема ЧРЧ призначена для генерації регулюючого сигналу певної форми, а також компенсує ослаблення лунаїмпульсів обумовленого згасанням звуку. Після цього сигнал підсилюється підсилювачем з керованим коефіцієнтом підсилення 9, до потрібного рівня сигналу для коректної роботи АЦП 10. Оцифровані дані надходять до пам'яті RAM 11 для збереження даних і передачі їх до мікроконтролера 12. Мікроконтролер реалізує операції дискретного перетворення Гільберта та визначення фазової характеристики сигналів і передає їх до ПК 13. Останній обчислює функцію  $r_{зв}[j, M_w]$ , виконує її порівняння з порогом П, формує рішення щодо наявності дефекту, візуалізує та протоколює результати контролю та видає керуючий сигнал на зовнішні пристрої для бракування перевірених виробів.

### 2.5.2. Розрахунок АЦП

Розрахунок АЦП проводимо виходячи з умови того, що частота дискретизації повинна бути як мінімум у 2 рази більше максимальної частоти вхідного сигналу, тобто:

$$f_{\text{ацп}} > f_{\text{д}} \cdot 2 \quad (2.51)$$

де  $f_{\text{д}} = 2.5$  (МГц) – частота дискретизації;

$$f_{\text{ацп}} = 2.5 \cdot 2 = 5 \text{ (МГц)}$$

Мінімальна частота, яку ми повинні обрати, це 5 МГц. Призначимо  $f_{\text{ацп}} = 50$  (МГц).

Далі розрахуємо розрядність АЦП за формулою (2.34):

$$q_{\text{ацп}} = \left[ \log_2 \left( \frac{U_{\text{ацп}}}{Q} \right) \right] + 1 \quad (2.52)$$

де  $U_{\text{ацп}} = 5(\text{В})$  – напруга АЦП;

$Q = 0.1(\text{В})$  – призначений крок квантування АЦП;

$$q_{\text{ацп}} = \left[ \log_2 \left( \frac{5}{0.1} \right) \right] + 1 = [5.644] + 1 = 5 + 1 = 6$$

Обираємо розрядність АЦП рівною 6.

## 2.6. Висновки до розділу

У цьому розділі був розрахований типовий акустичний тракт ультразвукової дефектоскопії, розроблена структурна схема приладу. Так, як уже було визначено, що ультразвукова дефектоскопія буде проводитись для матеріалу із значним загасанням, а отже, визначення корисної складової сигналу буде відбуватись за низького відношення С/Ш, тож виникла необхідність у застосування методів статистичної фазометрії. Зокрема було розглянуто використання ПГ для отримання АХС та ФХС сигналу, важливість вибіркового статистик та було досліджено шляхи удосконалення цього методу для того, щоб зменшити вплив шумів на інформаційну складову сигналу та понизити рівень відбраковки, що б дало більшу точність вимірювальної апаратури. Виходячи з цього, було обрано шлях для удосконалення методу за рахунок вагової обробки результатів нерівноточних вимірювань.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

#### 3.1. Методика проведення модельних експериментів

Блок-схема на рис. 3.1. дає графічне уявлення про програмні операції та їх послідовність.





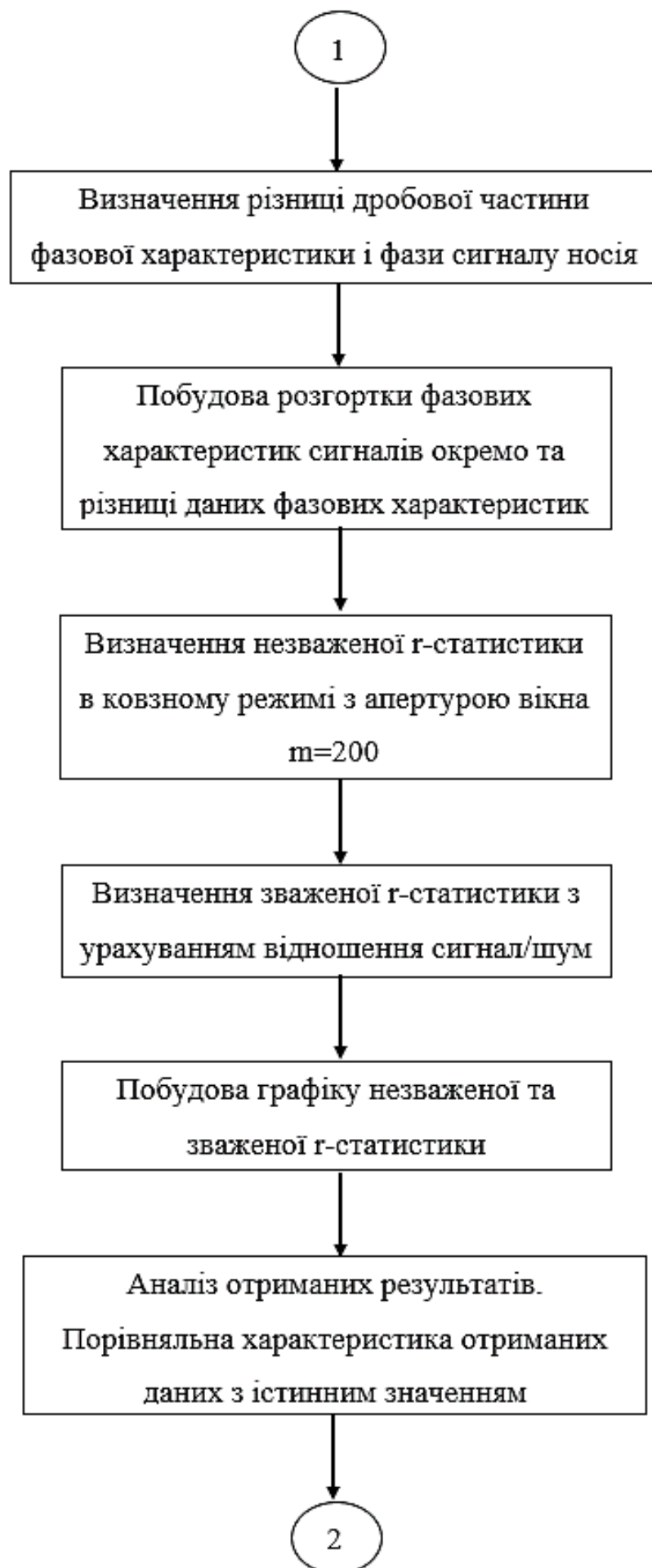




Рис. 3.1. Методика проведення обробки сигналу

Після проходження етапів сигналом, він потрапляє до ПК для програмного опрацювання.

Спочатку сигнал від ПЕП у вигляді цифрових відліків потрапляє на ПК. Після чого на базі ПЗ виконується обчислення аналітичного сигналу за допомогою перетворення Гільберта. Визначаємо дробову частину фазової характеристики суміші сигналу з шумом, різниці дробової частини фазової характеристики і фази сигналу носія. Будуємо розгортку фазових характеристик сигналів окремо та різниці даних фазових характеристик, визначаємо та будуємо графік незваженої та зваженої  $r$ -статистики. Аналізуємо отримані результати. Робимо порівняльну характеристику отриманих даних з істинним значенням та отримуємо значення в процентному відношенні про покращення вірогідності контролю.

### 3.2. Моделювання процесу оброблення сигналів

Перший крок моделювання має на меті створення послідовності радіоімпульсів для аналізу за функцією  $\{u[j], j=1, N\}$  з такими характеристиками:

- Частота сигналу:  $f = 5 \cdot 10^3$  (Гц);
- Період дискретизації:  $dT = 2 \cdot 10^{-6}$  (с);
- Відлік часу:  $T = 0: dT: 11 \cdot 10^{-3}$
- Середньоквадратичне відхилення шуму:  $\sigma = 0.15$
- Обсяг вибірки:  $N = 5500$ ;

Одержаний сигнал характеризується експоненційним коефіцієнтом затухання. Випадковий шум генерується та накладається на сигнал (рис. 3.2).

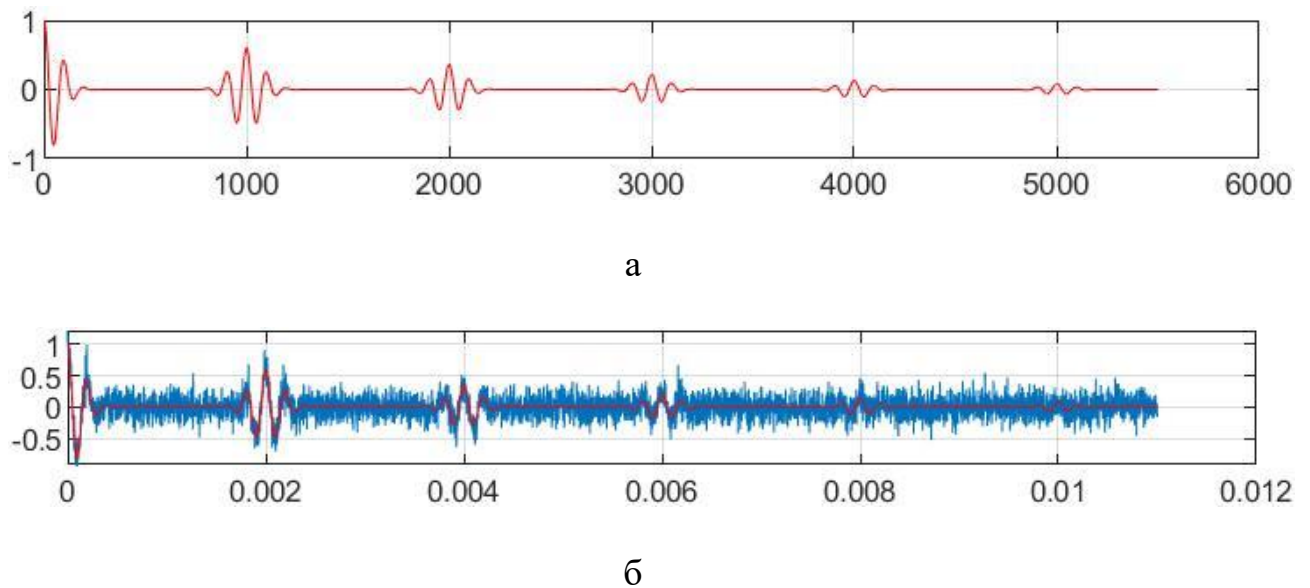
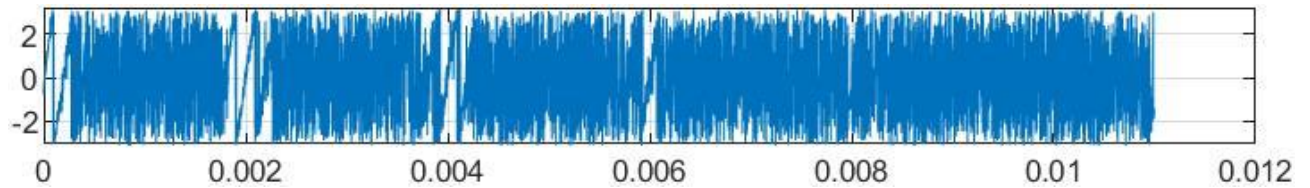


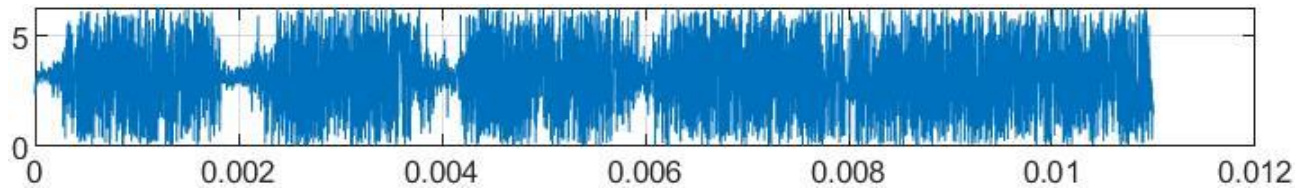
Рис. 3.2. Послідовність Гаусових імпульсів (а), послідовність радіоімпульсів з доданим шумом (б)

Наступним кроком було одержання гільберт-образу сигналу за допомогою ДПГ для згенерованої послідовності. Це перетворення дає змогу отримати вибірку ФХС. На рисунку 3.3 зображена дробова частина фазової характеристики суміші сигналу з шумом (а). Дробова частина – це фазова характеристика в межах  $[+\pi; -\pi]$ . Також зображено різницю дробової частини фазової характеристики і фази сигналу носія (б). На ділянках, де присутній радіоімпульсний сигнал графік має поглиблення. При попаданні ковзним вікном на цю ділянку, всі відліки фази будуть попадати приблизно в одну точку і r-статистика матиме максимум. А на ділянках де є розкид (тобто між

поглибленнями), значень в інтервалі  $[+\pi; -\pi]$  фазові відліки розмиті по колу, тому їх додавання на колі буде давати величину близьку до нуля.



а



б

Рис. 3.3. Дробова частина фазової характеристики суміші сигналу з шумом (а), різниця дробової частини фазової характеристики і фази сигналу носія (б)

На наступному етапі моделювання було побудовано розгортку фазових характеристик сигналу з шумом та фазової характеристики сигналу-носія.

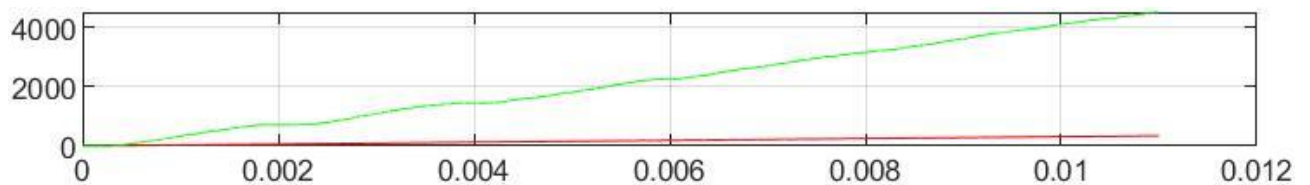


Рис. 3.4. Зелений колір – розгорнута фазова характеристика суміші сигналу з шумом, червоний колір – розгорнута фазова характеристика сигналу-носія

Наступним кроком є побудова графіку зваженої та незваженої  $\gamma$ -статистик для апертури вікна  $m = 100$ .

Зважена  $\gamma$ -статистика дає більшу за амплітудою статистику, що полегшує виявлення сигналів і зменшує ймовірність помилкового визначення дефекту за цією ознакою. Також зважена  $\gamma$ -статистика значно зменшує рівень шумів, що дозволяє виявляти сигнали з малою амплітудою.

Горизонтальна червона лінія на графіку – це пороговий рівень, при якому перевищення цієї межі буде виявляти імпульси сигналу.

Як бачимо на рисунку 3.5 зважена  $r$ -статистика дає змогу визначити 5-й імпульс сигналу. Також слід зазначити, що шуми зваженої  $r$ -статистики ніколи не перевищують шуми незваженої  $r$ -статистики.

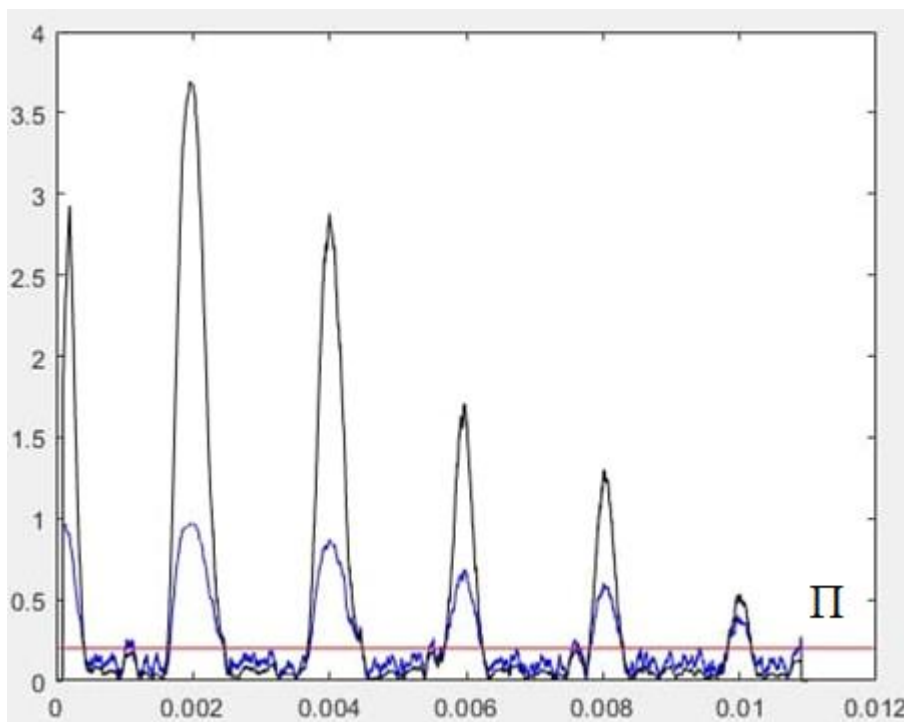


Рис 3.5. Синій колір – незважена  $r$ -статистика, чорний колір – зважена  $r$ -статистика

### 3.3. Розроблення програмного засобу

Розглянемо код програми:

```

2 -   dT=1/50E4;
3 -   T=0:dT:11E-3;
4 -   fr=5E3;
5 -   D=[0:2/1E3:10E-3;0.6.^(0:5)]';
6 -   N=length(T);
7 -   y=pulstran(T,D,'gauspuls',fr,.5);
8 -   sigma=0.15;
9 -   y1=y+sigma.*randn(1,N);
10 -  yh=zeros(1,N);yhl=zeros(1,N);fi=zeros(1,N);fil=zeros(1,N);
11 -  A=zeros(1,N);Al=zeros(1,N);Fi=zeros(1,N);Fil=zeros(1,N);
12 -  r=zeros(1,N);r1=zeros(1,N);r2=zeros(1,N);r3=zeros(1,N);

```

Рисунок 3.6. Призначення початкових значень

На рисунку 3.6 бачимо, що спочатку призначаємо період дискретизації (2 рядок), після цього задаємо відлік часу (3 рядок), далі задаємо частоту сигналу (4 рядок), створюємо масив значень загасання сигналу (5 рядок), визначаємо довжину масиву, тобто обсяг вибірки (6 рядок). Наступним кроком формуємо послідовність радіоімпульсів (7 рядок), де  $T$  – час,  $D$  – експоненціальна обвідна,  $fr$  – частота сигналу носія. Задаємося середньоквадратичним відхиленням шуму (8 рядок). Створюємо послідовність радіоімпульсів з додаванням шуму (9 рядок). Останнім кроком цього блоку буде створення нульових масивів для запису розрахунків (10-12 рядки).

```

14 -   yh=hilbert(y);yhl=hilbert(y1);
15 -   fi=atan2(imag(yh),y);fil=atan2(imag(yhl),y1);
16 -   Fil=unwrap(fil);
17 -   A=sqrt(y.^2+(imag(yh)).^2); Al=sqrt(y1.^2+(imag(yhl)).^2);

```

Рисунок 3.7. Обчислення складових сигналу

На рисунку 3.7 спочатку обчислюємо аналітичний сигнал за допомогою функції Гільберта (14 рядок). Наступним кроком обчислюємо арктангенс кутів (15 рядок). Визначаємо розгорнуту фазову характеристику сигналу (рядок 16). Обчислюємо обвідну сигналу, тобто амплітудну характеристику (рядок 17).

```

19 -   figure%1
20 -   subplot(5,1,1);
21 -   plot(y,'r');grid on
22 -   subplot(5,1,2);
23 -   plot(T,y1,T,y,'r');grid on
24 -   subplot(5,1,3);
25 -   plot(T,fil);grid on
26 -   Fi0=2.*pi.*fr.*T; dfi=mod(fil-Fi0+pi,2.*pi);
27 -   subplot(5,1,4);
28 -   plot(T,Fi0,'r',T,Fil-Fi0,'g') ;grid on
29 -   subplot(5,1,5);
30 -   plot(T,dfi);grid on

```

Рисунок 3.8. Побудова графіків сигналу

Наступним блоком є побудова графіків. Спочатку створюємо нову фігуру (рядок 19). Вибираємо місце в фігурі, де буде розташовані графіки (рядки 20, 22, 24, 27, 29). Будуємо графіки за допомогою функції plot (рядки 21, 23, 25, 28, 30). Розраховуємо фазу сигналу носія за формулою (3.1):

$$\varphi_0 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot T \quad (3.1)$$

де  $\varphi_0$  – це різниця фазових характеристик.

```

32 -     m=100;
33 -     for l=1:1:N-m;
34 -         dfiX=dfi(1:(1+m));
35 -         S=sum(sin(dfiX));    C=sum(cos(dfiX));
36 -         Z=C+i.*S;
37 -         r1(1+m/2)=abs(Z)./length(dfiX);
38 -     end
39
40 -     for l=1:1:N-m;
41 -         dfiX=dfi(1:(1+m));
42 -         S=sum(sin(dfiX).*r1(1:(1+m)));    C=sum(cos(dfiX).*r1(1:(1+m)));
43 -         Z=C+i.*S;
44 -         r2(1+m/2)=abs(Z)./length(dfiX);
45 -     end

```

Рисунок 3.9. Розрахунок незваженої та зваженої г-статистик

Наступний блок коду - це розрахунок г-статистик. Спочатку задаємося віконною апертурою (рядок 32). Далі створюємо цикл для визначення незваженої г-статистики (рядки 33-38). Формуємо масив *dfiX* зі значеннями від 1 до 100 (рядок 34) і для всіх цих різниць ми вираховуємо суму синусів і суму косинусів (рядки 35-36).

Наступний цикл визначає зважену г-статистику з урахуванням відношення сигнал/шум (рядки 40-45). Це відношення має таку ж форму, як і г-статистика. Також формуємо масив значень (рядок 41) і розраховуємо суми синусів та косинусів (рядки 43-44).

```

47 - figure%2
48 - subplot(2,1,1);plot(T,r1,'r')
49 - subplot(2,1,2);plot(T,r2,'g')
50
51 - figure%3
52 - plot(T,r1,'b',T,r2.*4,'k',[0 0.012],[0.3 0.3],'r')

```

Рисунок 3.10. Побудова графіків порівняння зваженої та незваженої  $r$ -статистик

Спочатку створюємо нову фігуру (рядки 47, 51). Вибираємо місце в фігурі, де будуть розташовані графіки та будуємо графіки за допомогою функції `plot` зі зазначеними кольорами на графіку (рядки 48, 49, 52).

### 3.4. Аналіз вірогідності контролю розробленим методом

У моделюванні були використані вікна з апертурою  $m = 100$ . Слід зазначити, що введений вираз  $r2 * 4$  є емпіричним коефіцієнтом і не має значення для відношення сигнал/шум. Але за допомогою нього ми вирівнюємо амплітуди наших  $r$ -статистик. Це необхідно для більш наочного аналізу.

Проаналізувавши рисунок 3.5, можемо зробити висновок, що є певне зменшення шумів для зваженої  $r$ -статистики при відношенні сигнал/шум рівним 0.5. Також при цьому ж відношенні останній, п'ятий імпульс, виявляється частіше, ніж при незваженій  $r$ -статистиці. Цей висновок був підтверджений на основі проведених 100 модельних експериментів.

При відношенні сигнал/шум рівним 0.5 було проведено 100 моделювань. З них можна зробити висновок, що зважена  $r$ -статистика визначила (тобто значення імпульсу «перетнуло» межу червоної лінії) останній імпульс 100 разів із 100, а незважена  $r$ -статистика – лише 85 із 100. Це свідчить про те, що цей метод є кращим на 15%. Також зважена  $r$ -статистика спотворює набагато менше шумів, ніж незважена  $r$ -статистика. Слід зазначити, що шуми зваженої  $r$ -статистики ніколи не перевищують шуми незваженої  $r$ -статистики.

Крім того, це покращує точність вимірювання цим методом за рахунок виявлення останнього імпульсу і дає можливість статистично усереднити більші обсяги наших експериментальних даних.



### 3.5. Висновки до розділу

У цьому розділі було визначено загальну методику проведення обробки сигналу за допомогою методів статистичної фазометрії. Зокрема, був розроблена програма в середовищі Matlab для обробки сигналів, яка включала застосування ПГ для обчислення аналітичного сигналу, визначення розгорнутої ФХС та обвідної сигналу – АХС, розрахунок фази сигналу носія та  $r$ -статисти. Після чого обчислювалась незважена та зважена  $r$ -статистики за відповідними циклами, які в подальшому були графічно зображені на графіку. На графіку порівняння зваженої та незваженої  $r$ -статистики був вибраний пороговий рівень, який дав змогу оцінити ефективність удосконаленого методу з вагою обробкою результатів нерівноточних вимірювань. Після 100 ітерацій розрахунку цих  $r$ -статистик з різним шумом за допомогою циклу, дослідження показали перевагу удосконаленого методу на рівні 15%.

## 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА УЛЬТРАЗВУКОВА ДЕФЕКТОСКОПІЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПІДВИЩЕНОЇ ВІРОГІДНОСТІ»

### 4.1. Опис ідеї проекту

Розглянувши у попередніх розділах важливість розробки системи з можливістю контролю за низького співвідношення С/Ш, було розроблено автоматизовану систему ультразвукової дефектоскопії підвищеної вірогідності. Провідною ідеєю стартапу є автоматизована система ультразвукової дефектоскопії з використанням нового методу обробки сигналів під час проведення контролю, більш детальну інформацію можна знайти у табл. 5.1. У порівнянні з найближчими конкурентами дана розробка може запропонувати підвищену вірогідність виявлення корисної складової сигналів та забезпечити високу точність контролю. Впровадження такої системи контролю виробів та деталей можливе фактично на будь-якому підприємстві, проте її основний орієнтир – зварні з'єднання гідроциліндрів. В цьому розділі, заповнюючи таблиці, буде проведено аналіз стартапу та оцінено його конкурентоспроможність.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигода для користувача</i>
Автоматизована система ультразвукової дефектоскопії підвищеної вірогідності з використанням новітнього методу обробки сигналів	Контроль зварних з'єднань гідроциліндрів	Висока вірогідність виявлення дефектів в об'єктах контролю
	Контроль різних виробів та деталей	Можливість контролю за низького співвідношення сигнал/шум

З таблиці 5.1. можна підсумувати, що розроблювана система дає змогу забезпечити більш точний контроль та виявляти всі наявні дефекти з меншою похибкою, особливо при контролі матеріалів із значним загасанням

ультразвуку, де співвідношення С/Ш досить низьке. Система є універсальною, тож може застосовуватись до широкого спектра виробів та деталей практично на будь-яких підприємствах.

Далі визначимо коло можливих конкурентів та проведемо порівняння техніко-економічних переваг з ними:

Спочатку визначимо техніко-економічні властивості та характеристики розроблюваного проекту, потім знайдемо імовірну вибірку конкурентів чи товарів-замінників, після чого виконаємо порівняльний аналіз характеристик стартапу відносно конкурентів.

Конкуренти:

Конкурент 1 — система автоматизованого контролю Olympus PipeWIZARD кільцевих

Конкурент 2 — система автоматизованого контролю TVP128

Конкурент 3 — система автоматизованого контролю УКШ-55

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п / п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	Товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конку- рент1	Конку- рент2	Конку- рент 3			
1	Вартість, грн	24000	55000	19000	38000			+
2	Портатив- ність	+	-	+	-		+	
3	Застосування до різних видів ОК	+	-	-	-			+
4	Ефектив- ність контролю за низького співвідно- шення С/Ш	+	-	-	-			+

У таблиці 5.2. було визначено основні техніко-економічні властивості та характеристики розроблюваного проекту, коло імовірних конкурентів та проведено аналіз сильних, нейтральних та слабких сторін розробки. В результаті аналізу, можна зробити висновок про високу ефективність розроблюваної системи при нижчій ціні в порівнянні з конкурентами. Особливо це проявляється при контролі за низького співвідношення С/Ш.

#### 4.2. Технологічний аудит проекту

У межах цього підрозділу, заповнивши таблицю 5.3. відповідними складовими, проводимо аудит технології, що необхідна для реалізації стартап-проекту.

Щоб реалізувати даний стартап-проект, нам необхідно розглянути такі технології реалізації:

- 1) Розробка ПЗ для опрацювання сигналів
- 2) Виготовлення компонентів системи на замовлення на підприємстві
- 3) Виготовлення компонентів системи на 3D-принтері та ЧПК-станку

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Автоматизована система ультразвукової дефектоскопії підвищеної вірогідності з використанням новітнього методу обробки сигналів	Розробка ПЗ для опрацювання сигналів	Наявна	Доступна
2		Виготовлення компонентів системи на замовлення на підприємстві	Наявна	Недоступна
3		Виготовлення компонентів системи на 3D-принтері та ЧПК-станку	Наявна	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: щоб реалізувати даний стартап-проект було обрано виготовлення компонентів системи на 3D-принтері та ЧПК-станку, розробку ПЗ для точного опрацювання сигналів та збільшення точності контролю ОК.

Після проведеного аналізу наявних технологій та їх доступності для авторів проекту, можна зробити висновок, що всі необхідні технології для реалізації проекту наявні на ринку, також був обраний доступний варіант виготовлення компонентів системи — на 3D-принтері та ЧПК-станку.

### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У рамках цього підрозділу визначаються ринкові можливості, які можуть бути використаними для ринкового впровадження, а також буде визначено ринкові загрози, що можуть перешкоджати реалізації стартап-проекту.

Це дозволить побудувати чіткий план для розвитку стартапу, враховуючі стан ринкового середовища, потреби майбутніх клієнтів та пропозицій від конкурентів.

Для цього виконаємо аналіз попиту через який буде визначено динаміку розвитку ринку, власне наявність попиту та обсяг (табл. 5.4).

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн	~13000000 грн.
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Без обмежень
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують, система повинна пройти перевірку на стандартних зразках

6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	90%
---	---------------------------------------------------------	-----

Оцінювання за допомогою даних у табл. 5.4. дало уяву про потенційний ринок стартап-проекту. Динаміка ринку зростає, наявний високий попит на запропоновану нами розробку. Звідси можна зробити висновок, що ринок привабливий для входження, незважаючи на присутність конкурентів, так як розроблюваний стартап-проект пропонує новітню та високоефективну технологію опрацювання сигналів, що і робить його конкурентоспроможним.

Далі сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару та його характеристик, спираючись на цільову аудиторію та відмінності у їх поведінці (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. 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>
1	Система ультразвукової дефектоскопії для контролю широкого спектру виробів та деталей з найвищою вірогідністю контролю	Малі та середні підприємства	Спостерігається тенденція на універсальні автоматизовані системи ультразвукового неруйнівного контролю за розумну ціну	- до продукції: висока вірогідність контролю, універсальність, чудове співвідношення ціна/якість - до компанії-постачальника: надійний сервіс

Проаналізувавши цю таблицю, можна зробити висновок, що основною цільовою аудиторією є малі та середні підприємства, які в пошуках універсальних автоматизованих систем ультразвукового неруйнівного

контролю за розумну ціну, що має високу вірогідність контролю, а отже, розроблювана система цілком задовольняє їх вимоги.

При впровадженні нової розробки, постачанні та експлуатації нової технології мають місце певні фактори загроз, що можуть виникати внаслідок різних факторів (табл. 5.6).

Таблиця 5.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Брак	Несправність елементів системи	Дослідження проблеми; заміна постачальника чи окремих елементів системи на якісніші; гарантійний обмін продукту
2	Високий рівень інфляції	Ослаблення національної валюти	Своєчасні зміни в цінову політику компанії; продаж у валюті з нижчим рівнем інфляції
3	Наявність електронних компонентів для системи	Затримки у постачанні певних компонентів системи у зв'язку з пандемією	Пошук нових каналів постачання; заміна компонентів подібними до них
4	Вступний інструктаж	Системи ультразвукової дефектоскопії достатньо складні для середньостатистичного користувача та мають громіздку інструкцію користування	Наявність сертифікованих дефектоскопістів в компанії, які можуть провести вступний інструктаж для співробітників підприємства клієнта
5	Сертифікація	Всі системи неруйнівного контролю в обов'язковому порядку повинні мати сертифікацію для старту продажів	Своєчасна сертифікація системи

Таблиця 5.6 дає уявлення про можливі фактори загроз, що можуть перешкоджати ринковому впровадженню та можливу реакцію на них, Отже, для їх уникнення необхідно використовувати якісні компоненти системи, працювати з такими системами повинні лише сертифіковані спеціалісти або

відповідальні добре проінструктовані робітники. Також потрібно слідкувати певними економіко-політичними факторами, своєчасно проходити сертифікацію та слідкувати за наявністю необхідних компонентів у постачальників.

Проте, крім факторів загроз існують також фактори можливостей (табл. 5.7), які дають змогу більш впевнено вийти на ринок та зайняти якомога сильнішу позицію на ринку.

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Низька насиченість ринку	Є великі можливості у збільшенні товарообігу та відсутність гострої конкурентної боротьби в найближчий час	Нарощення потужностей виробництва та можливість зайняття великого відсотку ринку збуту
2	Впровадження інновацій	Новий метод опрацювання сигналів підвищує вірогідність контролю	Виділення такої значущої переваги для потенційних клієнтів
3	Власне ПЗ	Розроблено якісне власне ПЗ для опрацювання сигналів та виділення корисної інформації	Самостійність проекту, акцентування уваги клієнтів, що у них немає необхідності в додаткових витратах на стороннє ПЗ
4	Універсальність	Застосування до великого різноманіття виробів та деталей на різних підприємствах	Акцентування уваги цільової аудиторії на можливості використання системи та швидку адаптацію фактично для будь-яких ОК
5	Презентація на виставках та сайтах з цільовою аудиторією	Можливість представити проект широкому колу зацікавлених клієнтів	Створення маркетинг-кіту для презентацій та написання оглядів для сайтів



Таблиця 5.7. демонструє те, що при правильно підібраній реакції компанії на наявні фактори можливостей, ринкова ситуація цілком сприяє введенню товару на ринок та його високій конкурентоспроможності.

Щоб визначити загальні риси конкуренції на ринку необхідно провести аналіз особливостей конкурентного середовища та можливий вплив ні діяльність підприємства. Це дасть змогу скласти стратегію стартап-проекту.

Таблиця 5.8. 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. Тип конкуренції: чиста	На ринку велика кількість фірм, продукція продається по вільним цінам	Організація та проведення рекламної кампанії, спрямованої на підкреслення інноваційності розробки
2. За рівнем конкурентної боротьби: локальний	Конкуренція наявна між компаніями всередині країни	Введення на ринок інноваційного продукту
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Конкуренція присутня в межах однієї галузі	Формування ринкової ціни товару, впровадження індивідуальних функцій за замовленням клієнта
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного методу контролю	Проведення рекламної кампанії, впровадження індивідуальних функцій за замовленням клієнта
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Конкуренція базується на покращенні якісних характеристики, зокрема таких критеріїв (в межах галузі), як достовірність контролю, вірогідність виявлення дефектів та якість ПЗ	Покращення товару за рахунок впровадження новітнього методу опрацювання сигналів, додавання нових функцій, удосконалення ПЗ

б. За інтенсивністю: не марочна	Роль бренду не є важливою, більш важливими є його характеристики	Удосконалення системи за рахунок покращення характеристик, впровадження нової функціональності
---------------------------------	------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------

В таблиці 5.8 було проаналізовано ринок збуту розробленої системи та визначено його загальні риси. Можна зробити висновок, що наразі на ринку панує вільна конкуренція з локальним рівнем конкурентної боротьби в межах однієї галузі, тож фактори, які б обмежували входження в ринок розроблюваної системи відсутні.

Більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі можна провести за М. Портером (табл. 5.9).

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
Складові аналізу	ТОВ НВФ, «Ультракон», ТОВ «ІНТРОН-СЕТ», ТОВ НВФ «Діагностичні прилади», ПП «ДП-Тест»	Конкурентами можуть стати компанії, що зможуть запровадити аналогічну або ще більш досконалішу технологію	Значення розміру поставок для постачальників, наявність товарів-замінників, концентрація постачальників	Рівень чутливості до зміни цін, контроль якості	Факторів загроз з боку товарі-замінників немає

Висновки:	Низька конкуренція	Є всі можливості для входу в ринок, потенційні конкуренти не зможуть забезпечити подібну вірогідність контролю на протязі ще досить тривалого часу	Постачальники лише впливають на ціну компонентів, але значного впливу на ринок не роблять	Для клієнтів важливий великий набір функцій, висока якість та розумна ціна	Незважаючи на відсутність факторів загроз з боку товарів-замінників, потрібно підтримувати конкурентну перевагу
-----------	--------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

З таблиці 5.9 можна зробити висновок, що наразі конкуренція в галузі досить низька, а аналоги від конкурентів не можуть забезпечити подібну вірогідність контролю в найближчій перспективі. Отже, розроблена система в рамках стартап-проекту є досить конкурентоспроможною та має чималий потенціал у займанні лідируючих позицій на ринку.

Після проведених аналізів конкуренції на ринку та в рамках галузі можна скласти та обґрунтувати перелік факторів конкурентоспроможності. При складенні переліку до уваги також беруться характеристики розроблюваної системи та вимоги цільової групи.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Висока вірогідність контролю	Система дає змогу досить точно виявляти дефекти в ОК навіть при низькому відношенні С/Ш
2	Інноваційність	Система побудована із застосуванням нового методу обробки сигналів та не має прямих аналогів

3	Портативність	Компактні розміри системи дають змогу застосовувати її на як на підприємстві, так і в польових умовах
4	Універсальність	Застосування до великого різноманіття виробів та деталей на різних підприємствах
5	Висока якість	Систему розроблено так, вона цілком задовольняла потреби клієнтів в довготривалій перспективі та складних умовах експлуатації за своїм призначенням
6	Ціна	Товар має розумну ціну, яка є досить лояльною до клієнта та конкурентноспроможною на ринку, завдяки впровадженню нових технологій

В таблиці 5.10, що побудована на аналізі конкуренції з попередніх підрозділів були наведені та обґрунтовані фактори конкурентоспроможності. Серед них можна відмітити найбільш значущі – висока вірогідність контролю та інноваційність, яка обумовлена використанням в системі нового методу опрацювання сигналів та на разі не має аналогів.

Використовуючи дані з таблиці 5.10, проведемо порівняльний аналіз сильних та слабких сторін розроблюваної системи (табл. 5.11).

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1- 20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні зі стартап-проектом, що розробляється						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Висока вірогідність контролю	18	+						
2	Інноваційність	20		+					
3	Портативність	16				+			
4	Універсальність	15			+				

5	Висока якість	17				+			
6	Ціна	16			+				

З таблиці 5.11, яка базується на аналізі сильних та слабких сторін стартап-проекту за факторами конкурентоспроможності, видно, що розроблена система переважає товари конкурентів за більшістю показників. Тож можна зробити висновок, що стартап буде конкурентоспроможним на ринку. Як уже було сказано вище, розроблена система має найбільшу перевагу за високою вірогідністю контролю та інноваційністю розробленого методу опрацювання сигналів.

Тепер перейдемо до SWOT-аналізу (табл. 5.12). Виділимо сильні (Strength) та слабкі (Weak) сторони, а також загрози (Troubles) та можливості (Opportunities) розробленої системи. SWOT-аналіз базується на даних із відповідних попередніх таблиць.

Таблиця 5.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вірогідність контролю</li> <li>- Провідна технологія</li> <li>- Портативність системи</li> <li>- Універсальність системи</li> <li>- Високі показники якості</li> <li>- Розумна ціна</li> </ul>	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Вимоги до товару</li> <li>- Система ще себе не зарекомендувала на ринку</li> <li>- необхідність інвестицій</li> </ul>
<p><i>Можливості:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Низька насиченість ринку</li> <li>- Презентація на сайтах та виставках з цільовою аудиторією</li> <li>- Збільшення продажів</li> <li>- Розширення функціоналу ПЗ за рахунок випуску нових версій</li> <li>- Модернізація системи</li> </ul>	<p><i>Загрози:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Високий рівень інфляції</li> <li>- Затримки в поставках систем через відсутність необхідних компонентів на ринку</li> <li>- Брак</li> <li>- Несвоєчасна сертифікація системи</li> </ul>

На основі створеного в таблиці 5.12 SWOT-аналізу розробляємо альтернативи виведення розробленого проекту на ринок та визначаємо орієнтовні строки їх реалізації з оглядом на можливе виведення потенційних

проектів конкурентів на ринок. Спираючись на строки та імовірність отримання ресурсів, визначаємо та аналізуємо альтернативи.

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Розробка ПЗ для систем неруйнівного контролю	Висока	1-2 місяці
2	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами проекту	Висока	1 рік

Зі сформованого списку альтернатив обираємо розробку ПЗ для систем неруйнівного контролю, так як вона має найбільшу ймовірність отримання ресурсів та найкоротший строк реалізації.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

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

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів прийняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Підприємства	Висока	Високий	Низька	Висока
2	Науковці	Висока	Середній	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: Проаналізувавши цільові групи потенційних споживачів, було вирішено, що стартап-проект буде орієнтуватись на підприємства.					

За результатом аналізу потенційних груп споживачів (табл. 5.14) обрані цільові групи, для яких буде запропонована автоматизована система ультразвукової дефектоскопії підвищеної вірогідності. Також на цьому етапі було обрано стратегію охоплення ринку: диференційованого маркетингу, так як ми працюємо з конкретним сегментом, розробляючи для нього програму ринкового впливу.

Для роботи в обраному сегменті необхідно сформуванати базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1	Розробка ПЗ для систем неруйнівного контролю	Стратегія спеціалізації	Краща точність контролю та вірогідність виявлення дефектів за рахунок реалізації нової технології опрацювання сигналів	Стратегія диференціації

У якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять систему відмінною від конкурентів. Ґрунтується на альтернативі розвитку проекту – розробці ПЗ для систем неруйнівного контролю, що дає змогу значно підвищити вірогідність виявлення дефектів, а отже, зробити кінцеву систему контролю досить точною та суттєво зменшити похибку.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Ні	Компанія буде забирати існуючих у конкурентів	Компанія не буде копіювати основні характеристики товару конкурента	Стратегія виклику лідера

Розроблена система має суттєву перевагу над конкурентами у вірогідності контролю, це дає змогу досить точно визначати дефекти з мінімальною похибкою, що дуже важливо цільовій аудиторії. Ця особливість може допомогти зайняти лідируючі позиції на ринку. Отже, проаналізувавши базові стратегії, було обрано стратегію виклику лідера. Компанія буде шукати та забирати існуючих клієнтів у конкурентів, формування основних характеристик самостійне та не копіюється у конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника 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.



Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспро- можні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Розумна ціна, висока точність контролю та вірогідність виявлення дефектів, висока якість та довговічність системи	Стратегія диференціації	Найбільша вірогідність виявлення дефектів при конкурентоспроможній ціні, власне ПЗ з «user-friendly» інтерфейсом, висока якість	Точність, універсальність, якість

В результаті виконаного аналізу в даному підрозділі було сформовано систему рішень щодо ринкової поведінки компанії. Цільовими групами було обрано підприємства та науковців. В якості базової стратегії розвитку обрано стратегію диференціації, а стратегію спеціалізації було обрано для охоплення ринку.

#### **4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту**

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач.

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Висока вірогідність виявлення дефектів	Точність та вірогідність контролю значно вища за рахунок новітнього методу опрацювання сигналів	Розроблена технологія забезпечує найкращу вірогідність контролю на фоні конкурентів, особливо це стосується контролю за низького відношення С/Ш
2	Портативність	Концепція системи пропонує легке перенесення з місця на місце для швидкого контролю	Компактна система, що має невеликі габарити та вагу
3	Універсальність	Можливість застосування до широкого спектру виробів та деталей	Завдяки змозі контролювати практично будь-які вироби та деталі, система дає змогу заощадити час та гроші клієнтів
4	Розумна ціна	Оптимальне відношення ціна/якість	Система забезпечує більш ширший функціонал та точність контролю при схожій ціні на фоні конкурентів

Маючи перелік ключових переваг продукту та стратегію диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей за подібною до конкурентів ціною і буде розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Розробимо трьохрівневу маркетингову модель товару: уточняється ідея продукту, його фізичні основи та спосіб його пакування (табл. 5.19).

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Автоматизована система ультразвукової дефектоскопії підвищеної вірогідності		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Висока вірогідність контролю	Нм	Тх
	2. Виявлення сигналів невідомої частоти	Нм	Тх
	3. Універсальність	Нм	Тл
	4. Довговічність	Нм	Вр
	5. Портативність	Нм	Тл
Якість: відповідає нормам ДСТУ EN 1714:2005			
Пакування: картонна коробка із назвою продукту та технічними характеристиками			
Марка: відсутня			
III. Товар із підкріпленням	Рекламна кампанія		
	Додавання нових функцій за замовленням клієнта, гарантійне обслуговування		

При описі трьох рівнів моделі товару у таблиці 5.19 було визначено рівні товару такі як: товар за задумом, товар у реальному виконанні та товар з підкріпленням. Також в рамках цієї таблиці було розглянуто його властивості та характеристики, відповідність нормам ДСТУ EN 1714:2005 та спосіб його пакування.

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. 5.20).

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	~25000 грн.	30000 грн.	Високий	20000-28000 грн.

В таблиці 5.20 було проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замінники, а також визначено рівень доходів цільової групи споживачів. За отриманими даними буде встановлена верхня та нижня межа ціни на нашу систему.

Визначимо оптимальну систему збуту (табл. 5.21), в межах якої приймається рішення про функції збуту, глибину каналу збуту, оптимальну систему збуту та проводиться оцінка закупівельної поведінки цільових клієнтів.

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Продаж оптом та у роздріб	Доставка системи, проведення інструктажу, налаштування, сервісна підтримка	Канал нульового рівня	Власний канал збуту через сайт компанії

В рамках цього підpunkту було розроблено концепцію маркетингових комунікацій між споживачами та виробниками. Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів було обрано власну систему збуту за допомогою сайту компанії (інтернет-магазині). Глибину каналу збуту було обрано канал нульового рівня через те, що компанія хоче мати тісні контакти зі споживачами на обмеженому цільовому каналі.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Таблиця 5.22. 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, пошук систем з новими технологіями	Тематичні сайти, каталоги, виставки, конференції, каталоги	Вірогідність контролю, співвідношення ціна/якість, універсальність	Інформування клієнта про систему з передовим методом опрацювання сигналів, що забезпечує найвищу вірогідність контролю	Підкреслення сильних сторін системи та розумної ціни

У рамках цього розділу була розроблена концепція маркетингових комунікацій, яка включає: переваги концепції потенційного товару, трьохрівневу маркетингову модель продукту, межі встановлення ціни, сформовану систему збуту та концепцію маркетингових комунікацій. Провівши аналіз розробленої маркетингової концепції, можна зробити

висновок, що вона дає перевагу над конкурентами та підкреслює сильні сторони розробленої системи.

#### 4.6. Планування витрат на запуск стартап-проекту

Даний підрозділ дає змогу оцінити скільки необхідно залучити інвестицій на початкові витрати для реалізації автоматизованої системи ультразвукової дефектоскопії зварних з'єднань підвищеної вірогідності. Зазначені витрати у таблиці в майбутньому будуть додані до суми загальних інвестицій, які потребує стартап-проект.

Таблиця 5.23. Витрати на запуск стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Стаття витрат</i>	<i>Обсяг витрат в 0-й рік, грн.</i>
1	Робоче приміщення	15000
2	НДДКР	45000
3	Витрати на придбання компонентів системи	42000
4	Витрати, пов'язані з освоєнням та запуском виробництва	35000
5	Витрати на приймально-здавальні випробування	10000
6	Отримання сертифікації та потрібної документації	15000
7	Витрати на просування проекту	40000
8	Витрати, пов'язані з формуванням команди	43000
9	Інші витрати	28000
	Разом:	273 000

Проаналізувавши таблицю 5.23, було розраховано потенційний план початкових витрат, який необхідний для запуску стартапу, після чого потрібно

буде розширювати як персонал, так і кількість одиниць продукції, що випускається. Це призведе і до збільшення необхідних інвестицій в найближчому майбутньому, але без цього неможливо буде задовольнити наростаючий попит, зайняти більшу частину ринку та почати отримувати прибуток.

#### **4.7. Висновки до розділу**

Підсумовуючи проведене дослідження стартап-проекту, яке цілком засвідчує можливість виведення проекту на ринок, що обумовлено високим попитом на універсальні автоматизовані системи ультразвукового контролю за розумну ціну та позитивною динамікою ринку. Незважаючи на те, що на ринку вже існують основні гравці, проект виявився рентабельним по більшості параметрів.

Дослідження показали, що існуючі на ринку рішення не можуть запропонувати подібний рівень вірогідності виявлення дефектів, а отже, забезпечити таку ж якість контролюючої апаратури та мінімальну похибку при ультразвуковій дефектоскопії. Саме цей фактор має спрацювати в першу чергу і переманити клієнтів від конкурентів до розробленого стартапу. Розвиток цієї технології є досить перспективним напрямком.

Наразі продукт є конкурентоспроможним, проте для того, щоб отримати більше довіри клієнтів та врешті-решт зформувати свою базу клієнтів необхідно модернізувати конструкцію приладу та технологію виробництва за допомогою ЧПК та 3D-принтеру. Крім того, необхідно підібрати досить надійних постачальників задля забезпечення безперебійних поставок систем клієнтам та уникнути затримок.

Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів і розробивши власну систему збуту через офіційний сайт компанії можна отримати чималі перспективи впровадження стартапу на ринок.

Основною цільовою групою є підприємства та науковці, яким досить важливо, щоб система контролю давала найвищу достовірність контролю.

Була універсальною та портативною для зручного застосування за будь-яких умов.

За ринкову поведінку буде прийнята стратегія виклику лідера, коли компанія є другою чи третьою на ринку, проте бажає стати лідером ринку. Компанія для цього має багато переваг у своєму арсеналі. Сюди можна віднести найвищу вірогідність виявлення дефектів за рахунок впровадження унікального методу опрацювання сигналів, розумну ціну та універсальність системи.

Альтернативним варіантом реалізації стартапу є написання ПЗ для систем неруйнівного контролю, цей варіант менш рентабельний, проте потребує менших інвестицій та набагато коротші терміни впровадження на ринок.

Зважаючи на вищесказане, можна дійти до висновку, що розроблена система ультразвукової дефектоскопії підвищеної вірогідності буде користуватись попитом і є всі підстави для її комерціалізації. В перспективі проекту може бути виведення його на міжнародний ринок для збільшення продаж та пошуку нових клієнтів, секторів використання, тощо.



## ВИСНОВКИ

У цій магістерській дисертації було проведено вдосконалення фазового методу виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії, який ґрунтується на статистичному опрацюванні фазових характеристик цих сигналів, за рахунок додаткового вагового опрацювання результатів фазових вимірювань, що дало змогу підвищити вірогідність виявлення дефектів зварних з'єднань за низького відношення С/Ш на 15%. Для досягнення такого результату у магістерській дисертації було досліджено чимало літературних джерел, що дало змогу отримати підґрунтя для написання розділів дисертаційної роботи.

В аналітичній частині були розглянуті теоретичні основи УЗК, методи прозвучування виробів та деталей, методи обробки сигналів та розглянутий ОК. В якості ОК було обрано зварне з'єднання гідроциліндру з товщиною стінки 15 мм. Враховуючи, що ОК виконаний із сталі 45, в якій загасання ультразвуку досить сильне, виникла потреба в удосконаленні фазового методу виявлення сигналів ультразвукової дефектоскопії для досить точної визначення корисної складової за низького відношення С/Ш.

У розділі з удосконалення наявного фазового методу обробки сигналу був розрахований типовий акустичний тракт ультразвукової дефектоскопії. Також було проведено аналіз фазового методу в теперішньому стані, його реалізацію за рахунок перетворення Гільберта, важливість вибіркового статистик. Виходячи з цього, було обрано шлях для удосконалення методу за рахунок вагової обробки результатів нерівноточних вимірювань.

У розділі моделювання було розроблено алгоритм, програмну реалізацію методу та виконано моделювання наявного та удосконаленого методу. Після чого за рахунок циклу було проведено 100 ітерацій із заданим пороговим рівнем відбракування та випадковим шумом для отримання підтвердження про поліпшену точність визначення корисних сигналів з адитивної суміші сигналу та шуму за рахунок удосконаленого методу. У

результаті було зафіксовано приріст вірогідності виявлення сигналів УЗ дефектоскопії за рахунок удосконаленого методу на 15%

В останній частині дисертації був розроблений стартап-проект, основною метою якого було визначення комерційного успіху проекту в залежності від наявного попиту. За рахунок новизни розробленого продукту, було визначено рівень його конкурентоспроможності, який виявився високим, так як жоден наявний аналог не може забезпечити подібну вірогідність виявлення сигналів за низького відношення С/Ш. Тож можна чітко стверджувати про високі шанси комерціалізації розробленого продукту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Leonard J. Bond, Fundamentals of Ultrasonic Inspection, Nondestructive Evaluation of Materials, Vol 17, ASM Handbook, Edited By Aquil Ahmad, Leonard J. Bond, ASM International, 2018, p. 155–168.
2. What is Welding Defect? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.theengineerspost.com/welding-defects/>
3. Дефекты сварных соединений [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ukrintech.com.ua/defektatsiya-svarnykh-shvov-i-kontrol-kachestva-svarnykh-soedinenij/131-glava-1-defekty-svarnykh-soedinenij/504-1-3-defekty-soedinenij>
4. Ultrasonic Testing [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://eis.hu.edu.jo/ACUUploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>
5. What is a hydraulic cylinder? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hydroline.fi/blog/what-is-a-hydraulic-cylinder/>
6. Time of flight diffraction [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://autsolutions.net/ndt-resources/tofd/>
7. Ультразвуковой контроль сварных соединений [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://svarkalegko.com/tehnology/ultrazvukovoi-kontrol.html>
8. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк. 1970: Пер. с англ. (в 4-х томах)/ Под общей ред. К.Н. Трофимова; Т.3. Радиолокационные устройства и системы / Под ред А.С. Виницкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.
9. Прохоров В.І. Конспект лекцій з дисципліни «Контроль якості зварювання» / В. І. Прохоров. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – 169 с.
10. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія. Наукова монографія. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 384 с.
11. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник для здобувачів ступеня бакалавра за

освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,12 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.

12. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ В.К. Цапенко, Ю.В. Куц; – Київ:НТУУ “КПІ”. – 2009. – 431 с.

13. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех Шестов Н.С. – М.: Сов.радио, 1967 г. – 347 с.

14. 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.

15. Троицкий В.А. Ультразвуковой контроль: дефектоскопи, нормативні документи, стандарти по УЗК / В.А. Троицкий – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2006. – 221 с.

16. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.А. Троицкий, В.Ю. Попов. — К.: Феникс, 2010. — 224 с.

17. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Шалимова Е.В. Методы обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. / Учебное пособие для студентов вузов – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

18. Signal-to-noise ratio [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio)

19. What is AWGN? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.noisecom.com/resource-library/articles/artmid/1867/articleid/1233/what-is-awgn>

20. Давыдов А.В. Сигналы и линейные системы: Тематические лекции. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, кафедра геоинформатики. Фонд электронных документов, 2005.

21. Alfred Mertins. Signal Analysis, Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications, John Wiley & Sons, 1999.
22. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
23. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії // Технологические системы. –2004. –№2. – С.50–55.
24. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
25. Y. Kuts, «Methodology for Measuring Phase Shifts of Signals Using Discrete Hilbert Transform», International Conference on Measurement. Conf. proc. – Smolenice, Slovakia. – 2021. – pp. 18 - 21.
26. I. Lysenko, V. Eremenko, Y. Kuts, A. Protasov, V. Uchanin, “Advanced Signal Processing Methods for Inspection of Aircraft Structural Materials”, Transactions on Aerospace Research, vol. 2 (259), pp. 27-35, 2020.
27. Ю.В. Куц, О.В. Монченко, І.М. Бистра, Ю.А. Олійник, "Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: Монографія". –К.: Інтерсервіс. – 2019. – р. 192.

## ДОДАТОК А

Програма моделювання процесу виявлення сигналів за низького відношення  
сигнал/шум та будування графіків порівняння зваженої та незваженої г-  
статистики

Код надається по запиті до авторів

## ДОДАТОК В

### Список наукових праць

Ф. № 3.3

#### СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Кібаленко В.В. (прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	Методи виявлення сигналів за низького відношення сигнал/шум в ультразвуковій дефектоскопії	XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 р., м. Київ	3 с.	

Автор

В.В. Кібаленко  
(підпис)

Вадим КІБАЛЕНКО

В.о. зав. каф. АСНК

\_\_\_\_\_ (підпис)

Юрій КИРИЧУК