

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»  
УДК 621.317:621.391

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ А.Г. Протасов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
на тему: «Автоматизована система вихрострумовеого контролю трубок  
теплообмінників АЕС»**

Виконала:

студентка VI курсу, групи ПК-71мп  
Воловоденко Марія Сергіївна

\_\_\_\_\_

Керівник:

д.т.н., професор  
Куц Ю.В.

\_\_\_\_\_

Консультант з розділу «Розроблення стартап-проекту»:

к.е.н., доц.  
Бояринова К.О.

\_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

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

**Приладобудівний факультет**

**Прилади і системи неруйнівного контролю**

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

Спеціальність (спеціалізація) – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» («Комп'ютерно інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Протасов А.Г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Воловоденко Марії Сергіївні**

1. Тема дисертації «Автоматизована система вихрострумове контролю трубок теплообмінників АЕС», науковий керівник дисертації Куц Юрій Васильович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4078-с
2. Термін подання студентом дисертації 14 грудня 2018р.
3. Об'єкт дослідження – процес автоматизованого неруйнівного вихрострумове контролю трубок парогенератора АЕС під час планових зупинок.
4. Вихідні дані: матеріал трубок теплообмінників – аустенітна сталь марки 08X18H10T, внутрішній діаметр трубок –16 мм, товщина стінок трубок – 1,5 мм, середня довжина – 11,3 м, контрольовані параметри – товщина стінки труби та наявність поздовжніх тріщин на внутрішній поверхні трубки не менше 0.2 мм.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: аналіз трубок парогенератора як об'єкта НК, обґрунтування способу опрацювання сигналів ВСНК, розрахунок системи «ВСП-ОК», розроблення функціональної схеми системи, аналіз вірогідності контролю
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: чотири плакати.

7. Орієнтовний перелік публікацій: три статті.

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Бояринова К. О., к.е.н., доц.		

9. Дата видачі завдання: 03 вересня 2018р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз обраного напрямку, дослідження існуючих публікацій.	30.11.2017	
2	Аналітичний огляд публікацій, визначення можливої теми.	30.12.2017	
3	Виявлення можливих актуальних напрямів роботи згідно обраної теми.	30.01.2018	
4	Проведення аналітичного огляду згідно обраної теми і ОК на предмет його особливостей та виникаючих дефектів.	30.02.2018	
5	Визначення загальних засад роботи майбутнього приладу на основі існуючих та визначення новизни що буде впроваджуватись.	30.03.2018	
6	Визначення методів отримання корисних сигналів в системі.	30.04.2018	
7	Проведення моделювання сигналів ВСП.	30.05.2018	
8	Формування загальних вимог до системи контролю.	15.09.2018	
9	Наведення рекомендацій по розрахунку перетворювача для системи контролю.	05.10.2018	
10	Розроблення алгоритму роботи .	14.10.2018	
11	Розроблення принципових схем окремих вузлів системи.	25.10.2018	
12	Аналіз підходящих теоретичних засад для розрахунку вірогідності контролю.	1.11.2018	
13	Розробка креслення датчика.	20.11.2018	
14	Розробка креслення алгоритму та функціональної схеми.	1.12.2018	
15	Оформлення роботи та плакатів.	09.12.2018	

Студент

Воловоденко М.С.

Науковий керівник дисертації

Куц Ю.В.

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

## Реферат

Магістерська дисертація містить 82 листа, 27 рисунків, 27 таблиць, 18 джерел за переліком посилань.

Ключові слова: вихрострумний контроль, теплообмінні трубки, АЕС, амплітудний та фазовий методи обробки.

У дисертації розглянуто питання контролю теплообмінних трубок парогенераторів АЕС. Внутрішній діаметр теплообмінних трубок всього лиш 16 мм, контроль експлуатаційний, що зумовлює необхідність мініатюрності датчика та можливість доступу до ОК тільки з середини. Запропоновано функціональну схему та алгоритм роботи згідно вимог до системи. Новизною роботи є запропонована ідея комбінувати амплітудний і фазовий методи обробки сигналів від вихрострумного датчика з метою підвищення вірогідності виявлення сигналів дефектів .

Також в проекті запропоновано датчик для здійснення контролю представлено збиральне креслення. Проведено відповідні моделювання для підтвердження актуальності запропонованого методу обробки, зокрема для підвищення точності для методу з використанням фазової обробки, де пропонується використовувати R-статистику.

**Об'єктом дослідження** є процес вихрострумного контролю теплообмінних трубок парогенератора АЕС.

**Предметом дослідження** є методи та засоби двопараметрового вихрострумного контролю сталевих тонкостінних теплообмінних труб парогенератора АЕС.

**Метою дослідження** є розроблення проекту автоматизованої системи вихрострумного контролю теплообмінних труб ПГ АЕС. Забезпечення контролю сприяє досягненню максимальної безпеки та збільшення тривалості безаварійної роботи АЕС.

**Науковою новизною** є запропонована методика комбінації амплітудного і фазового методу обробки з метою підвищення вірогідності виявлення сигналів дефектів.

## Abstract

The master's dissertation contains 82 pages, 27 figures, 27 tables, 18 sources according to the list of references.

Keywords: eddy current testing, heat exchange tubes, nuclear power plants, amplitude and phase processing methods.

The dissertation deals with the issues of control of heat exchangers of steam generators in nuclear power plants. The internal diameter of the heat exchanger tubes is only 16 mm, which necessitates the miniaturization of the sensor and access to the testing object only from inside of tube. The functional scheme and algorithm of work according to system requirements are proposed. The novelty of the work is combining the amplitude and phase methods of signal processing from the eddy current sensor in order to increase the probability of detecting defect signals.

Also, the project proposed a sensor for control – presented a harvesting drawing. Appropriate simulations have been carried out to confirm the relevance of the proposed processing method, in particular to improve the accuracy of the method using phase processing, which suggests the use of R-statistics.

**The object** of the study is the process of eddy current control of heat exchangers of a steam generator of the nuclear power plants.

**The subject** of the study is the methods and means of two-parameter eddy current control of steel thin-walled heat exchangers of nuclear power plants steam generator.

The purpose of the study is to develop a project for the automated system of eddy current control of heat exchangers nuclear power plants gas. The provision of testing helps to achieve maximum safety and increase the duration of trouble-free operation of the nuclear power plants.

**The scientific novelty** is the proposed method of combining the amplitude and phase method of processing in order to increase the probability of detecting defect signals.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТРУБОК ПАРОГЕНЕРАТОРА ЯК ОБ'ЄКТА НК.....	7
1.1. Місце парогенератора в системі АЕС .....	7
1.2. Аналіз трубок парогенератора , як об'єкту ВСК .....	8
1.2.1. Місце теплообмінних трубок у конструкції парогенератора.....	8
1.2.2. Фізико-механічні властивості матеріалу трубок .....	10
1.2.3. Експлуатаційні умови теплообмінних трубок парогенератора .....	10
1.3. Дефекти трубок парогенератора.....	12
1.3.1. Аналіз виробничих дефектів.....	12
1.3.2. Аналіз експлуатаційних дефектів.....	12
1.3.3. Види неруйнівного контролю трубок .....	13
1.4 Висновки .....	14
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ.....	16
2.1 Формування сигналів вихрострумowego контролю в системі «прохідний ВСП- трубка парогенератора».....	16
2.2. Методи отримання корисної інформації з сигналів ВСП .....	20
2.3 Методологія визначення характеристик сигналів ВСП на основі дискретного перетворення Гільберта.....	24
2.4 Моделювання процесу опрацювання сигналів ВСП .....	29
2.5 Формування загальних вимог до системи контролю .....	33
2.6 Висновки .....	34
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	36
3.1. Обґрунтування вибору конструкції та типу датчику.....	36

3.2	Рекомендації до розрахунку системи «ВСП-ОК».....	39
3.2.1	Приклад розрахунку накладного диференціального ВСП для дефектоскопії.....	39
3.2.1	Теоретичні основи для проведення розрахунку накладного перетворювача для контролю товщини стінок ОК .....	42
3.4	Розроблення функціональної схеми системи.....	44
3.5	Розроблення алгоритму роботи системи.....	46
3.6	Висновки .....	49
РОЗДІЛ 4.	РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ СИСТЕМИ.....	50
4.1	Обґрунтування елементної бази для реалізації генераторного блоку.....	50
4.2	Обґрунтування елементної бази системи попереднього опрацювання сигналу.....	51
4.2.1.	Обґрунтування елементної бази для реалізації перетворення напруга-струм.....	51
4.2.2	Обґрунтування елементної бази для реалізації вимірювального підсилення.....	52
4.3	Обґрунтування вибору АЦП.....	54
4.4	Висновки .....	55
РОЗДІЛ 5.	АНАЛІЗ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЮ ТЕПЛООБМІННИХ ТРУБОК.....	56
5.1	Теоретичні засади розрахунку вірогідності контролю.....	56
5.2	Приклад розрахунку вірогідності контролю трубок ПГ на наявність дефектів типу тріщина .....	58
5.2	Висновки .....	60
РОЗДІЛ 6.	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВИХРЬ-Т».....	61
6.1	Опис ідеї проекту.....	61
6.2.	Технологічний аудит ідеї проекту.....	63

6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	64
6.2 Висновки .....	77
ВИСНОВКИ .....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЕС – атомна електростанція;

ПГ парогенератор;

ОК- об'єкт контролю;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ВВЕР – водно-водяний енергетичний реактор;

ОК – об'єкт контролю;

ВСП – вихрострумний перетворювач;

ОТ – обертальний трансформатор;

ДПГ – дискретне перетворення Гільберта;

ВВОТ – вторинний вимірювальний обертальний трансформатор;

РО – регулятор обертів;

ВШ – вимірювач шляху;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЦІ – цифровий інтерфейс;

ВСП- вихрострумний перетворювач;

ФХС – вазова характеристика сигналу;

АХС – амплітудна характеристика сигналу;

ВСНК – вихрострумова система неруйнівного контролю

ХХ холостий хід

АЦП – аналого цифровий перетворювач.

## ВСТУП

**Актуальність.** Атомні електростанції (АЕС) є важливим ресурсом забезпечення країни електроенергією. Одним з найбільш відповідальних вузлів АЕС є парогенератор (ПГ).

Основним елементом ПГ є система трубок (теплообмінний пучок труб) розташованих в шаховому порядку і закріплених перемичками. Надійність і безпека станції значною мірою залежить від стану трубок, адже їх пошкодження призводить не тільки до функціонального порушення роботи АЕС, але й до радіоактивного забруднення робочої зони і, як наслідок, до можливості забруднення навколишнього середовища. Тож якісний експлуатаційний неруйнівний контроль (НК) теплообмінних труб ПГ під час планових зупинок АЕС є важливою складовою системи заходів із забезпечення надійної та безаварійної експлуатації АЕС.

**Об'єктом дослідження** є процес вихрострумове контролю теплообмінних трубок парогенератора АЕС.

**Предметом дослідження** є методи та засоби двопараметрового вихрострумове контролю сталевих тонкостінних теплообмінних труб ПГ АЕС.

**Метою дослідження** є розроблення проекту автоматизованої системи вихрострумове контролю теплообмінних труб ПГ АЕС. Забезпечення контролю сприяє досягненню максимальної безпеки та збільшенню тривалості безаварійної роботи АЕС.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати об'єкт контролю, його можливі дефекти та придатність до контролю засобами вихрострумової дефектоскопії;
2. Обґрунтувати загальні вимоги до системи вихрострумове контролю;
3. Провести розрахунки системи «вихрострумівий перетворювач – ОК» та моделювання процесу формування та опрацювання сигналів вихрострумове перетворювача;
4. Обґрунтувати функціональну схему системи контролю;
5. Розробити принципову схему основних елементів системи;

6. Розробити алгоритм налаштування і роботи вихрострумового дефектоскопу;
7. Проаналізувати вірогідність контролю;
8. Сформулювати висновки по виконаній роботі.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТРУБОК ПАРОГЕНЕРАТОРА ЯК ОБ'ЄКТА НК

#### 1.1. Місце парогенератора в системі АЕС

Одним з найважливіших елементів АЕС з реакторами з водою під тиском є парогенератори (ПГ), що видають пар на турбогенератор для вироблення енергії.

Парогенератор – це теплообмінний апарат для виробництва водяної пари з тиском вище атмосферного за рахунок теплоти первинного теплоносія, що надходить з ядерного реактора. Парогенератори, поряд з конденсаторами турбіни і проміжними теплообмінниками (у випадку триконтурної схеми), є основними теплообмінниками АЕС, від характеристик яких істотно залежать коефіцієнт корисної дії (ККД) і економічні характеристики станції.

На більшості атомних електростанцій використовується типова схема перетворення атомної енергії в електрику: ядерні реакції гріють теплоносії (найчастіше воду). Гаряча вода з реактора прокачується насосами через парогенератор, де віддає частину тепла, і знову повертається в реактор. Оскільки ця вода знаходиться під великим тиском, вона залишається в рідкому стані (в сучасних реакторах типу ВВЕР – близько 160 атмосфер при температурі  $\sim 330$  °С [1]). У парогенераторі це тепло передається воді другого контуру, яка знаходиться під набагато меншим тиском (зазвичай половина тиску першого контуру і менш), тому закипає. Пара, що утворилася надходить на парову турбіну, що обертає електрогенератор, а потім в конденсатор, де пар охолоджують, конденсується і знову надходить в парогенератор. Конденсатор охолоджують водою з зовнішнього відкритого джерела води (наприклад, ставка-охолоджувача). І перший і другий контури замкнуті, що знижує ймовірність витоку радіації назовні. Розміри конструкцій першого контуру мінімізовані, що також знижує радіаційні ризики. Парова турбіна і конденсатор не взаємодіють з водою першого контуру, що полегшує ремонт і зменшує кількість радіоактивних відходів під час демонтажу станції.[1]

Типовий парогенератор складається з тисяч трубок, по яких прокачується теплоносії першого контуру. Трубки занурені в теплоносії другого контуру. Зрозуміло, що за час тривалої (десятки років) експлуатації станції в трубках можуть розвинути дефекти. Це може привести до витoku теплоносія першого контуру в другий. Тому під час планових зупинок реактора стан теплообмінних трубок контролюють і перекривають (заглушують) дефектні трубки. У рідких випадках доводиться міняти парогенератор цілком, але зазвичай термін роботи парогенератора дорівнює терміну роботи реактора в цілому.[1]

## 1.2. Аналіз трубок парогенератора, як об'єкту ВСК

### 1.2.1. Місце теплообмінних трубок у конструкції парогенератора

В даний час на АЕС з ВВЕР застосовуються ПГ типу ПГВ-440 і ПГВ-1000(горизонтальний тип). На рис.1.1 представлено конструкцію парогенератора ПГВ-440 на якому позначено: 1 – паровий колектор, 2 – люк-лаз; 3, 4 – штуцери продувки; 5 – штуцер дренажу; 6, 7 – «гарячий» і «холодний» колектори; 8 – теплообмінні труби; 9 – корпус парогенератора; 10 – опори пучка теплообмінних труб; 11 – захисна вигорodka; 12 – сепараційні жалюзі; 13 – труба підведення живильної води; 14 – роздавальний колектор живильної води.

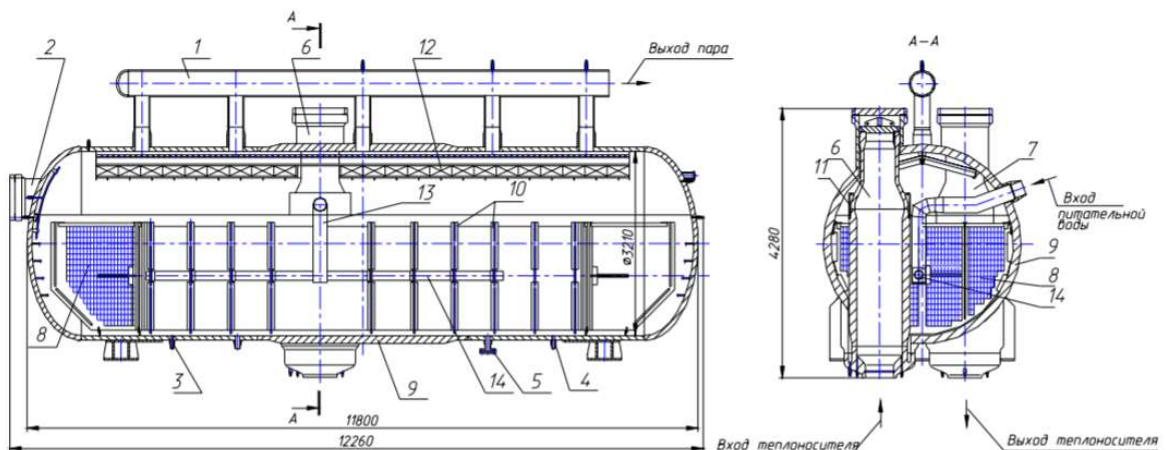


Рис.1.1. Конструкція парогенератора ПГВ-440

Парогенератори АЕС, пов'язуючи між собою контури теплоносія і робочої речовини, в рівній мірі належать кожному з них. Теплоприймаючим

середовищем в парогенераторі є робоча речовина (вода, пара). Парогенератори АЕС типу ПГВ-1000 з реакторами, охолоджуваними водою під тиском, виробляють суху насичену пару. Вимога підтримки високої чистоти теплоносія обумовлює виконання поверхонь теплообміну таких парогенераторів з аустенітної нержавіючої сталі з електрополірованими поверхнями.

Конструктивно парогенератор типу ПГВ-1000 для АЕС з ВВЕР – однокорпусний двоконтурний теплообмінний апарат горизонтального розташування з зануреним трубним пучком (рис. 1.2).

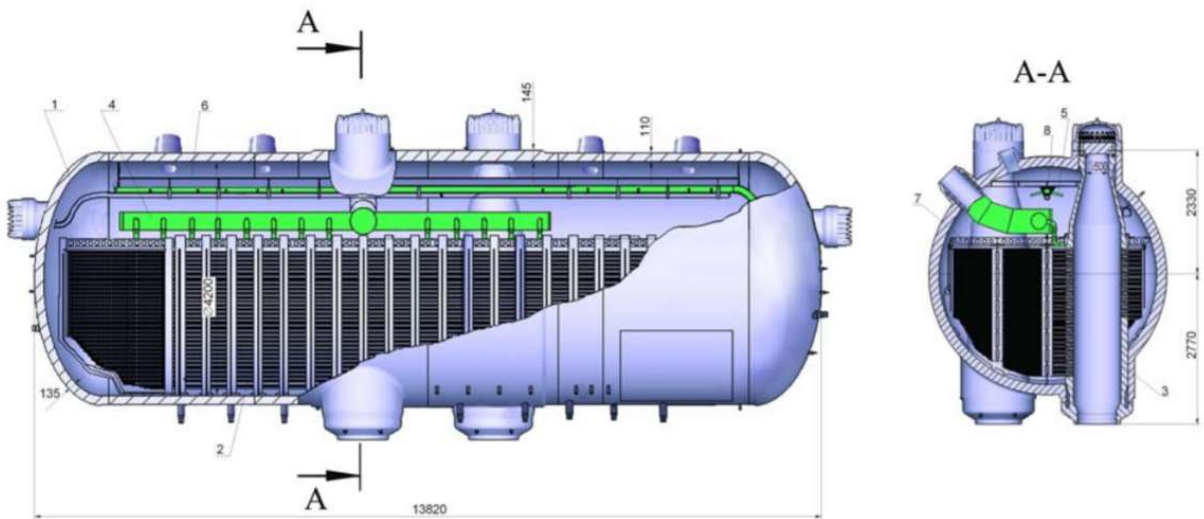


Рис. 1.2 Загальний вид парогенератора

Парогенератор складається з корпусу, вхідного та вихідного колекторів, U-подібного трубного пучка поверхні теплообміну, колектору, що роздає живильну воду, вбудованого сепараційного пристрою, паровідвідних системи, системи продувок і дренажу. Циліндрична частина розділена на три обичайки, середня з яких має збільшену товщину, так як вона ослаблена проходженням через неї циліндричними вертикальними колекторами.[2]

Колектори служать для підведення і відведення теплоносія першого контуру АЕС. Поверхня теплообміну складається з двох симетричних частин (лівої і правої), кожна з яких включає в себе половину роздавального і збирального колекторів, пов'язаних U-подібними трубами. Кількість труб в

кожній частині дорівнює половині загальної кількості труб. Площа для кріплення труб в кожному пів-колекторі дорівнює 0,25 частини кола [2].

### **1.2.2. Фізико-механічні властивості матеріалу трубок**

Поверхня теплообміну парогенератора типу ПГВ -1000 включає в себе 11000 труб горизонтального пучка. Внутрішній діаметр труб дорівнює 16 мм, товщина стінок труб становить 1,5 мм, середня довжина дорівнює 11,3 м. Труби пучка спираються на дистанціонуючі решітки.

Корпус парогенератора ПГВ-1000 і колектори теплоносія першого контуру АЕС виконані зі сталі марки 10ГН2МФА. Колектори розташовані симетрично щодо вертикальної осі парогенератора. Труби теплообміну парогенератора ПГВ - 1000 виконані з аустенітної сталі марки 08X18H10T.

08X18H10T – це марка сплаву стійкого до корозії, жаростійкого, не магнітного, з питомою електропровідністю  $\gamma=1,388 \cdot 10^6$  См/м. Ця марка сталі схильна до пришвидшеного старіння за високих температур, під час тривалої роботи можлива сенсibiлізація труб (випададіння кристалів металу ) [2].

Розташування труб в теплообмінному пучку цього парогенератора – шахове, але існують різні сучасні модифікації конструкції горизонтального парогенератора типу ПГВ-1000: ПГВ-1000М; ПГВ-1000М (В); ПГВ-1000мк. У конструкціях цих парогенераторів реалізовано велику кількість нових технічних рішень в порівнянні з базовою конструкцією парогенератора ПГВ-1000, спрямованих на підвищення рівня надійності їх роботи і збільшення терміну експлуатації, але матеріал та особливості роботи трубок лишилися незмінними [3].

### **1.2.3. Експлуатаційні умови теплообмінних трубок парогенератора**

У верхній частині міжтрубних каналів на «гарячій» стороні пучка труб відбувається підйомний рух середовища, викликаний виходом в канал і впливанням бульбашок пара. По мірі наближення до «холодної» сторони труб зона підйомного руху зменшується, опускний рух переважає по всій висоті

трубного пакету, а локальна кратність циркуляції збільшується через поліпшення умов опускання і зниження локальної паропроодуктивності [4]. Частина циркулюючої через пучок живильної води проходить через отвори зануреного дірчастого листа і потім потрапляє в опускні канали. Інша частина води циркулює через канали між трубними пакетами, які вільні від підйомного руху середовища. Циркуляція також відбувається і в поздовжньому напрямку. Вода, що надходить разом з парою на занурений дірчастий лист, через його отвори і міжтрубний канал у «гарячому» колекторі розтікається в напрямку торців парогенератора [5].

Дірчастий занурений лист з коефіцієнтом перфорації 8% призначений для вирівнювання швидкості виходу пари з дзеркала випаровування. Для стоку води між листом і корпусом парогенератора існує зазор шириною 150 мм. Передбачено також зазор між дірчастим листом і днищем парогенератора, що забезпечує доступ до нижньої частини пучка для огляду. У базовій конструкції парогенератора ПГВ-1000 по всьому периметру до дірчастого листа приварені закраїни, що перешкоджають виходу пара, минаючи дірчастий лист, і забезпечують необхідну висоту парової подушки під дірчастим листом. Рівень води в парогенераторі у випадку його заповнення встановлюється на 100 мм вище дірчастого листа.

У паровому просторі парогенератора ПГВ-1000 встановлено жалюзійний сепаратор, який підвищує ступінь осушення пару [6].

У базовій конструкції парогенератора типу ПГВ-1000 для збільшення площі сепарації жалюзійні пакети встановлені під кутом  $60^\circ$  до горизонту. Відсепарована в жалюзі вода поступає у зливні ємності, виконані з швелера, і по зливним трубам відводиться під рівень води між трубним пучком і стінкою корпусу парогенератора. Сухий насичений пар по десяти патрубкам діаметром 219 мм надходить в колектор пару і з нього в паропровід свіжої пари енергоблоку. У модифікаціях парогенераторів ПГВ-1000М (В) і ПГВ-1000мк застосовується аналогічна схема, що використовує принцип гравітаційної сепарації, в якій для вирівнювання парового навантаження дзеркала випаровування використовується



занурений дірчастий лист, але замість жалюзійного сепаратора встановлений плоский пароприймальний дірчастий лист [7].

Тож безпосередньо теплообмінні трубки ПГ контактують з водою з середини (з водою першого контуру) та ззовні (з водою другого контуру). Вода в середині знаходиться під тиском близько 160 атмосфер, температура становить 330°C, ззовні – під тиском близько 80 атмосфер і дещо нижчою температурою [7].

### **1.3. Дефекти трубок парогенератора**

#### **1.3.1. Аналіз виробничих дефектів**

При виготовленні труб для подальшого монтажу в ПГ вимагають найвищої якості, що спричинено тим що після запуску АЕС, якщо у трубці з'являється дефект, її можна заглушити тільки під час планових зупинок або виникнення проектних аварій (аварійні ситуації, що вимагають дотримання строго плану дій з усунення небажаних наслідків аварії), або повністю замінити ПГ [8].

Трубки перед монтажем перевіряють на відповідність формі, відхилення від заданого значення зовнішнього та внутрішнього діаметрів, відповідність необхідній товщині стінки.

Важливо також перевірити чи немає ще на початкових етапах експлуатації в трубках дефектів таких як тріщина, пора, оскільки в подальшому вони працюватимуть за умови підвищеного внутрішнього тиску.

Дефекти типу втомна тріщина можуть з'явитись під час надання трубкам необхідної для укладки в ПГ форми [8].

#### **1.3.2. Аналіз експлуатаційних дефектів**

Однією з важливих причин виникнення дефектів є кислотність середовища, також попри те що при запуску реактору намагаються забезпечити максимальну чистоту води, з часом роботи АЕС, як в першому так і в другому контурі з'являються мул, осад, що буде переносити радіаційне забруднення і сприяти прискоренню процесу появи дефектів, зокрема сприяти корозії [9].

Концентрація розчиненого у воді кисню істотно впливає на кінетику росту втомної тріщини при температурі вище 200 °С. При вмісті кисню менше 15 мг/кг відчутного впливу водного середовища на характеристики росту втомної тріщини за 295°С не спостерігалось; відзначено, що руйнування оксидної плівки за таких умов не повинно відбуватись. Тож зниження концентрації розчиненого у воді кисню до менш ніж 15 мг/кг не впливає на залежність кінетики росту втомної тріщини від температури води, але цю умову – зменшення кількості кисню і постійний контроль його концентрації у воді, не завжди легко реалізувати [10].

Корозійний вплив істотно посилюється з ростом пластичної деформації і зниженням рН. Низьколеговані сталі не схильні до розтріскування під дією середовища при певних умовах в чистій воді. Але в воді з високим вмістом кисню або з низьким рН, а також при повільній деформації або постійному навантаженні низьколеговані сталі чутливі до пошкодження. Процес пошкодження в загальному випадку прискорюється присутністю включень MnS. Для зниження або виключення настання міжкристалічного розтріскування при субкритичному зростанні тріщини за механізмом розтріскування під дією середовища, необхідно підтримувати дуже низький рівень мікро-сегрегуючих елементів, наприклад, фосфору.

Також на трубки впливають зміни температурних режимів, що спричиняються різними режимами роботи ПГ, тому при зміні режиму намагаються зробити такий перехід максимально плавним [11].

### **1.3.3. Види неруйнівного контролю трубок**

Розрізняють такі види НК теплообмінних трубок – передексплуатаційний та експлуатаційний. Передексплуатаційний контроль проводиться в обсязі 100%. Цей вид НК забезпечується вихрострумовим методом контролю.

Експлуатаційний контроль проводиться здебільшого під час зупинок АЕС . Контроль трубок проводиться не тільки котушками бобінного типу але й котушками, що обертаються електроприводом. Відповідно до країни де працює АЕС є свої вимоги до контролю, орієнтовно щороку контроль трубок проводиться

у обсязі від 12,5% до 50% всіх трубок (зупинка АЕС і її контроль проводиться кожного року) [12]. Обсяги і критерії ремонту трубок ПГ для різних країн [13] наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Обсяги і критерії ремонту трубок ПГ для різних країн

Країна	Об'єм	Критерії ремонту
Болгарія	20-50%	Стоншення стінки труби >40%, непрохідність трубки
Росія	25%	Залежить від випадку
Україна	12,5%	Стоншення стінки труби >40%

Під час дослідження трубок ПГ важлива обережність і детальний контроль, так як сильне пошкодження (двосторонній перпендикулярний розрив [14]) однієї трубки ПГ вже є проектною аварією, що вимагає негайної зупинки всієї АЕС, оскільки вода першого контуру потрапляє у воду другого контуру, що різко знижує рівень безпеки АЕС для навколишнього середовища та працівників АЕС, що згідно конструкції станції знаходяться безпосередньо близько до місць циркуляції води другого контуру [15].

#### 1.4 Висновки

1) Невеликі розміри об'єкту контролю, матеріал з якого він виготовлений (аустенітна сталь, що швидко старіє за високих температур), умови роботи (високий тиск, високі температури, постійний контакт з водою) та його відповідальна функція в структурі всієї АЕС вимагають особливо ретельного контролю. Додаткові складнощі обумовлені великою протяжністю ОК, наявністю вигнутих ділянок та складнодоступністю.

2) На етапі виробництва трубок ПГ необхідно перевіряти об'єкт контролю на відповідність формі, відхилення від заданого значення зовнішнього та внутрішнього діаметрів, відповідність необхідній товщині стінок, перевіряти на відсутність дефектів типу тріщина, пора, втомна тріщина [9]. Під час

експлуатації з'являються такі дефекти як: корозія, втомні тріщини, міжкристалічне розтріскування (що вподальшому сприяє зростанню тріщин), сенсibilізація (випадання кристалів металу).

3) Викладене вище обумовлює актуальність питання розроблення систем вихрострумowego контролю для реалізації дефектоскопії трубок ПГ та формування обґрунтованих рішень щодо необхідності заглушування окремих труб ПГ.

## РОЗДІЛ 2.

### МЕТОДИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

#### 2.1 Формування сигналів вихрострумового контролю в системі «прохідний ВСП- трубка парогенератора»

Процес формування сигналів ВСП значною мірою визначається їх типом та конструкцією. В даний час розроблено значну кількість різновидів ВСП [1, 3, 19], загальна класифікація яких наведена на рис. 2.1.).

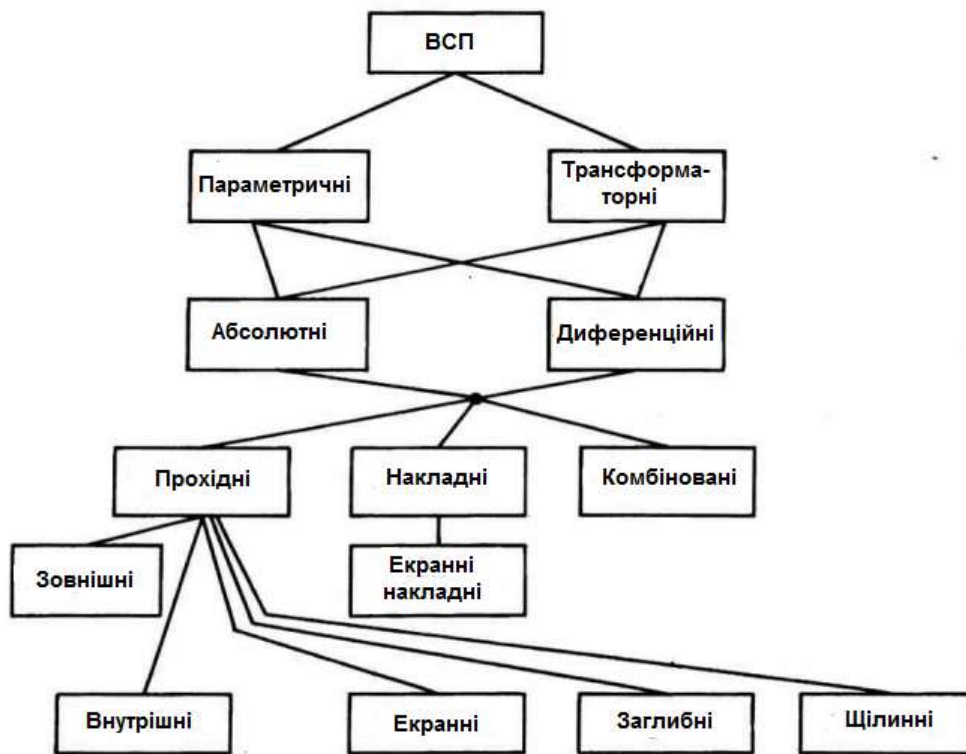


Рис. 2.1. Класифікація ВСП

ВСП класифікуються за такими ознаками. Насамперед, за типом перетворення параметрів ОК у вихідний сигнал ВСП поділяються на параметричні і трансформаторні. Перші мають лише одну котушку, параметри якої (активний та індуктивний опір, тобто комплексний опір  $z$ ) і є сигналом ВСП

$$\dot{z}(\bar{p}) = \dot{z}_0 + \dot{z}_{вн}(\bar{p}) + \dot{z}_\partial(\bar{p}, \bar{p}_\partial), \quad (2.1)$$

де  $\dot{z}_0$  – комплексний опір в режимі холостого ходу (тобто без ОК);

$\dot{z}_{вн}$  – внесений комплексний опір, що обумовлений дією наведених в ОК вихрових струмів;

$\dot{z}_\partial$  – складова комплексного опору, обумовлена спотворення контурів вихрових струмів в ОК за присутності в ньому дефектів;

$\bar{p}_\partial$  – вектор параметрів дефекту.

$\bar{p}$  – вектор параметрів системи ВСП – ОК.

Значення  $\dot{z}(\bar{p})$  залежать не тільки від параметрів ОК, але й суттєво – від температури навколишнього середовища і відстані між ВСП та ОК.

Трансформаторний ВСП крім збуджувальної має ще одну (чи декілька) вимірювальну котушку, в якій наводиться комплексна ЕРС  $U(\bar{p})$ , яка залежить від параметрів ОК і в меншій степені – від температури середовища

$$\dot{i}(\bar{p}) = \dot{i}_0 + \dot{i}_{вн}(\bar{p}) + \dot{i}(\bar{p}_\partial, \bar{p}), \quad (2.2)$$

де  $\dot{i}_0$  – значення ЕРС в режимі холостого ходу (тобто без ОК),

$\dot{i}_{вн}$  – внесена ЕРС, що обумовлена дією наведених в ОК вихрових струмів,

$\dot{i}_\partial$  – складова  $\dot{i}_0$ , обумовлена спотворенням контурів вихрових струмів в ОК за присутності в ньому дефектів.

За способом електричного з'єднання котушок ВСП поділяють на абсолютні і диференціальні. Вихідний сигнал перших функціонально пов'язаний з абсолютним значенням параметрів ОК у зоні контролю. Вихідний сигнал диференціальних ВСП визначається різницею значень параметрів ОК в зоні розташування вимірювальних котушок. Такі ВСП доцільно застосовувати для цілей дефектоскопії.

В залежності від геометрії ОК та його розташування відносно ВСП розрізняють прохідні, накладні та комбіновані перетворювачі. Прокідні у свою чергу поділяються на зовнішні, внутрішні, заглибні і щілинні.

Конструкції ВСП визначаються їх призначенням, умовами застосування, діапазоном частот струму збудження та іншими факторами. Розміри котушок ВСП коливаються від декількох міліметрів до 300 ... 500 мм в діаметрі, а маса

ВСП – від десятків грамів до десятків кілограмів. Зазвичай, кожен прилад комплектується набором ВСП, які поставляються за замовленням споживача.

Конструкція ВСП зазвичай містить: одну або декілька котушок; корпус для розміщення котушок, елементів електронного тракту та візуальної індикації; засоби позиціонування ВСП відносно ОК; сполучні роз'єми і кабелі. Часто ВСП конструкційно виконують разом з механічними або електромеханічними засобами сканування поверхні ОК, наприклад, засобами обертання ВСП, поступального руху і руху по гвинтовій лінії всередині труб і отворів в деталях тощо. Котушка ВСП зазвичай конструктивно складається з каркаса і обмоток, вона може містити феромагнітні осердя різних типів для збільшення чутливості та локальності контролю. Корпус захищає котушки ВСП від впливів зовнішнього середовища (атмосфери, рідини), зовнішніх електромагнітних полів і механічних пошкоджень. Металеві корпуси виконують роль екранів, що захищають від зовнішніх електромагнітних полів. У ВСП, застосовуваних для контролю гарячих ОК, металевий корпус зазвичай виконують подвійним, пропускаючи охолоджуючу воду між його стінками.

З метою зменшення розсіювання і концентрації магнітного поля котушки ВСП та підвищення відношення сигнал/завада в конструкції ВСП застосовують екрани та феритові осердя. Оскільки ферит – це феромагнетик, то породжений котушкою магнітний потік проходить через осердя, яке концентрує магнітне поле в центрі ВСП. Як наслідок цього вихрові струми концентруються в центрі контрольованої ділянки. ВСП з феритовими осердями більш чутливі і дозволяють виявляти дрібніші дефекти.

Екранування дозволяє зменшити крайовий ефект, вплив кривизни поверхні, уступів або кутів конструкції ОК, зменшити вплив інших деталей з електропровідних або магнітних матеріалів в області контролю. Для екранування ВСП найчастіше використовуються магнітні та електромагнітні екрани. Магнітний екран являє собою порожнистий циліндр з фериту або іншого матеріалу з високою магнітною проникністю і низькою електропровідністю. Ферит має низький магнітний опір, завдяки чому магнітне поле ВСП

концентрується всередині екрану. Для електромагнітного екранування використовують немагнітні метали, які мають високу електропровідність (зазвичай мідь або її сплави). Частина магнітного поля котушки ВСП збуджує вихрові струми не в контрольованій ділянці ОК, а в матеріалі екрану. Чим вище частота струму збудження ВСП, тим більше проявляється поверхневий ефект в екрані і тим ефективніше екранування.

З іншого боку, неекрановані ВСП дозволяють працювати з сильним імпульсним збудженням з огляду на відсутність впливу магнітних характеристик і насичення матеріалу екрану або сердечника. Вони також менш чутливі до коливань зазору. Неекрановані ВСП рекомендуються для контролю поверхневих тріщин в ОК з феромагнітних матеріалів, вони дозволяють проводити контроль з більшою швидкістю.

Перед тим, як розглянути загальну модель сигналів ВСП більш детально зупинимось на схемах підключення ВСП і власне формування вихідних електричних сигналів ВСП [7]. Основними варіантами схем включення параметричних ВТП є автогенераторна і мостова схеми. В автогенераторному варіанті (рис. 2.2) котушка ВСП є елементом коливального контуру генератора  $G$ , тому зміна повного опору котушки перетворюється в інформативний параметр сигналу ВСП – його частоту  $f$ .

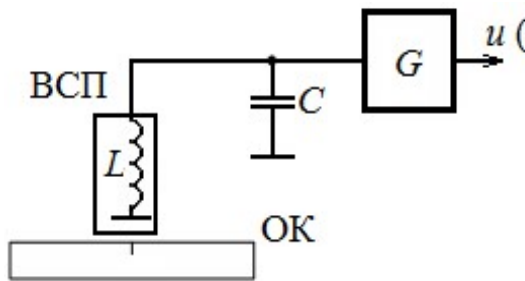


Рис. 2.2. Автогенераторна схема включення ВСП

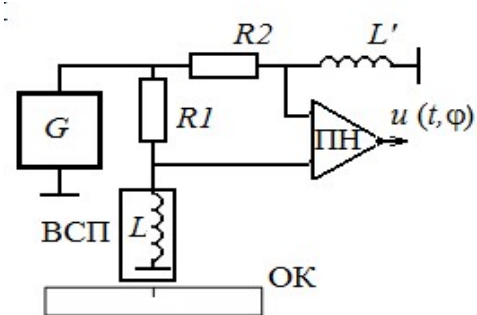


Рис. 2.3. Мостова схема включення ВСП с балансною котушкою  $L$

В мостовий схемі включення параметричного ВСП (рис. 2.3.) корисним сигналом є напруга розбалансу  $u(t, \varphi)$  на виході підсилювача некомпенсації ПН,



амплітуда і фаза  $\varphi \in [0, \dots, 2\pi)$  якої залежать від параметрів ОК. В цій схемі  $L'$  – це балансна котушка індуктивності. Прилади, що реалізують автогенераторну і мостову схеми можуть використовувати один і той же ВСП.

Більш ефективними для ВСНК є включені в мостову схему диференціальні ВСП (рис. 2.4). Такі перетворювачі мають ідентичні котушки  $L1$  та  $L2$ . Така схема реагує на зміни імпедансу, викликані дефектами або іншими неоднорідностями матеріалу ОК. В такому варіанті можуть працювати більшість вихорострумівих дефектоскопів.

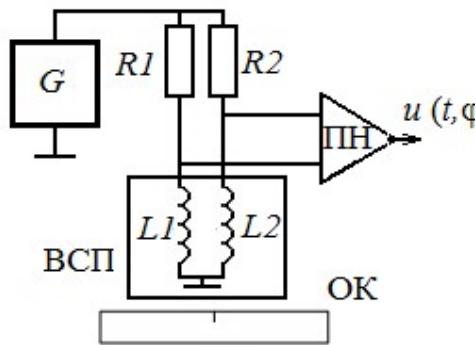


Рис. 2.4. Мостова схема вмикання диференціального параметричного ВСП

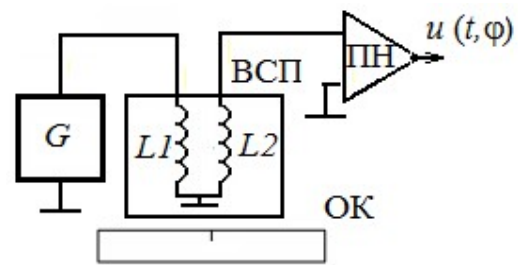


Рис. 2.5. Схема вмикання трансформаторного ВСП

Представлена на рис. 2.5 схема вмикання трансформаторних перетворювачів відома ще як ВСП типу «передавання-приймання». Вихрові струми створюються збуджувальною котушкою, яка підключена до генератора. Приймальна котушка з'єднана зі схемою ПН. Інформативними параметрами є амплітуда і фаза сигналу ВСП. Така схема дуже популярна оскільки забезпечує регулювання амплітуди струму збудження у великому частотному діапазоні без зміни елементів ВСП.

## 2.2. Методи отримання корисної інформації з сигналів ВСП

Важливими етапами реалізації ВСНК є не тільки отримання інформаційних сигналів ВСП, але й опрацювання цих сигналів та оцінювання їх параметрів. В залежності від числа контрольованих параметрів ОК розрізняють

однопараметровий, двопараметровий та багатопараметровий контроль [1, 3]. Найпростішим є однопараметровий. Його, як правило, застосовують тоді, коли вплив контрольованого параметра на вихідний сигнал значно більший, аніж вплив інших параметрів. У цьому випадку умови контролю обираються таким чином, щоби чутливість до контрольованого параметру була максимальною, а чутливість до інших – мінімальною.

Двопараметровий контроль використовується за необхідності одночасного контролю двох параметрів ОК. Теоретично такий контроль можна виконати на одній робочій частоті, якщо вдається розділити вплив кожного параметра ОК окремо на амплітуду і фазу гармонічного сигналу ВСП.

Багатопараметровий контроль використовується у тих випадках, коли число контрольованих параметрів ОК, що беруться до уваги, більше ніж два. Багатопараметровий контроль вимагає проведення вимірювань на декількох робочих частотах з наступним сумісним опрацюванням експериментальних даних.

Двопараметрові способи виділення інформації набули найбільшого поширення у практиці ВСНК і застосовуються переважно у випадках, коли сильний вплив на сигнали ВСП окрім контрольованого, чинить ще один параметр – заважаючий. Тому головним завданням двопараметрового контролю є зниження чутливості до заважаючого фактору, що необхідно для збільшення відношення сигнал/завада.

Носієм корисної інформації у двопараметровому контролі можуть бути: амплітуда, фаза, проекція вектору приросту напруги на обраний у площині представлення сигналу напрямок та ін. При двопараметровому контролі, що здійснюється, як правило, на одній частоті, один параметр ОК є контрольованим ( $p_k$ ), другий – пригнічуваним ( $p_n$ ).

Для наочного уявлення впливу різних параметрів ОК на сигнал ВСП використовують відображення останнього у виді годографів на комплексній площині. Така можливість ґрунтується на представленні гармонічний сигналу двома квадратурними складовими :

$$u_0(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t - \varphi_0) = U_c \cos(2\pi f_0 t) + U_s \sin(2\pi f_0 t), t \in (-\infty, \infty), \quad (2.3)$$

де  $U_c \cos(2\pi f_0 t)$ ,  $U_s \sin(2\pi f_0 t)$  – амплітуди квадратурних компонент сигналу;

$$U_0 = \sqrt{U_c^2 + U_s^2}.$$

Оскільки сигнал (2.1) представляється двома квадратурними складовими – косинусною і синусною, основою графічного зображення такого сигналу природно обирати дві ортогональні осі декартової прямокутної системи координат, які символізують два згаданих гармонічних коливання (наприклад, вісь  $x$  – синусне коливання, а вісь  $y$  – косинусне). По осі  $x$  відкладають  $U_s$ , а по осі  $y$  –  $U_c$ . Таке представлення узгоджене і з експоненціальною формою представлення сигналу

$$U_0 e^{i(2\pi f t - \varphi_0)} = (U_c + i U_s) \cdot e^{i(2\pi f t)} \quad (2.4)$$

де  $i = \sqrt{-1}$  – комплексна одиниця.

Одночасне послаблення впливу декількох заважаючих факторів у двопараметровому контролі, можливе тільки у випадках, коли характер їх впливу на параметри сигналу ВСП співпадає. До найбільш поширених двопараметрових способів виділення інформації ВСНК належать амплітудний, фазовий та амплітудно-фазовий, що базується відповідно на використанні амплітуди та фази сигналу ВСП або проекції вектора вимірюваної напруги ВСП на заданий напрям. Загальним для них є те, що в результаті компенсації частини сигналу ВСП, початкова робоча точка встановлюється у визначеному місці комплексної площини внесених напруг ВСП, що змінює функцію впливу параметрів ОК на сигнал ВСП.

Як приклад, наведемо сутність амплітудного двопараметрового способу ВСНК [1]. Розглянемо частину годографа (рис. 2.6) внесених напруг  $i_{вн} = \text{Re} i_{вн} + i \text{Im} i_{вн}$ , обумовлених змінами контрольованого  $p_k$  і пригнічуваного  $p_n$  параметрів.

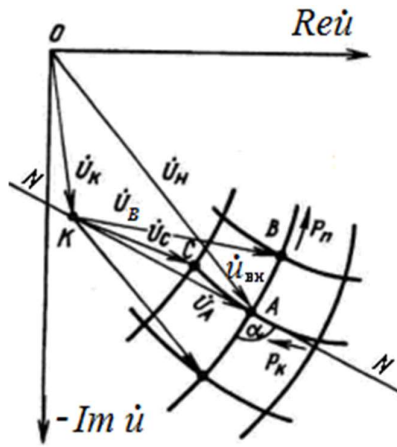


Рис. 2.6 Векторна діаграма, що пояснює сутність амплітудного способу виділення інформації

Амплітуда напруги ВСП (модуль комплексної напруги) буде лише у невеликій степені залежати від зміни пригнічуваного параметру, якщо робоча точка з початку координат переміститься в точку  $K$ , розташовану на нормалі  $NN'$  до годографа  $\dot{u}_{вн}(p_n)$ , яка побудована для точки  $A$  годографа, що відповідає номінальним значенням параметрів ОК  $\{p_{k0}, p_{n0}\}$ . Такого ефекту можна досягти додаванням компенсуючої напруги  $\dot{U}_k$  з напруги вимірювальної обмотки ВСП:

$$\dot{U}_A = \dot{u}_{вн} + \dot{U}_k \quad (2.9)$$

Якщо зміна пригнічуваного фактору  $p_n$  викликає зміщення кінця вектору  $\dot{u}_{вн}$  з точки  $A$  в точку  $B$ , то різниця модулів вектору  $\dot{U}_A$  і  $\dot{U}_B$  складає:

$$\Delta U = |U_A| - |U_B| \approx 0 \quad (2.10)$$

В той же час при зміні контрольованого параметру  $p_k$  (точка  $C$ ):

$$\Delta U = |\dot{U}_A| - |\dot{U}_B| \approx S_k \Delta p_k \sin \alpha \quad (2.11)$$

де  $S_k$  – модуль чутливості ВСП до контрольованого параметру  $p_k$ ,

$\alpha$  – кут у точці  $A$  між напрямками ліній впливу параметрів  $p_k$  і  $p_n$ .

Амплітудний метод двопараметрового контролю доцільно застосовувати у випадку, коли годографи  $\dot{u}_{вн}(p_n)$  близькі за формою до дуг концентричних кіл, а кут  $\alpha$  між дотичними до них годографів  $\dot{u}_{вн}(p_k)$  значний

$\left(0,25 < \alpha < 0,5\pi, \frac{\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{2}\right)$ . В інших випадках амплітудний спосіб призводить до появи похибок контролю тим більших, чим сильніше відрізняється  $i_{вн}(p_n)$  від кола, а  $i_{вн}(p_k)$  від прямої лінії.

В основі інших методів двопараметрового контролю покладено той самий принцип: додавання певної напруги компенсації, що мінімізує чутливість відповідного інформативного параметра сигналу ВСП до пригнічуваного параметра ОК і максимізує чутливість до контрольованого параметра ОК.

Одним з важливих ресурсів підвищення вірогідності контролю є підвищення точності вимірювання параметрів та характеристик інформаційних сигналів. За досягнутими метрологічними характеристиками відомі методи оброблення інформаційних сигналів НК, які здебільшого ґрунтуються на використанні амплітудних чи фазових детекторів, практично вичерпали свої ресурси і не дозволяють отримати суттєвого покращення технології контролю, необхідного для роботизованих комплексів ВСНК.

В той же час незаперечним є той факт, що за своєю фізичною природою сингали ВСНК мають циклічний характер. Більш повне використання інформативних можливостей таких сигналів потребує застосування нарівні з амплітудними і прецизійних фазових методів їх аналізу. Саме це положення визначає подальший напрям досліджень, метою якого є розробка нового покоління технічних систем ВСНК.

### **2.3 Методологія визначення характеристик сигналів ВСП на основі дискретного перетворення Гільберта**

Цифрові засоби ВСК широко використовуються у неруйнівному контролі виробів з електропровідних матеріалів. Проте використані в цих засобах методи опрацювання сигналів ВСК та оцінювання їх інформативних параметрів – амплітуди, фазового зсуву та частоти реалізовані на дещо застарілих програмно-алгоритмічних засадах. Звичайно всі особливості алгоритмів опрацювання сигналів ВСП в повному обсязі розробники не висвітлюють у відкритих

публікаціях. Але опосередковано такий висновок можна зробити з аналізу структур сучасних приладів ВСК. Це дає підстави вважати, що інформаційний ресурс ВСК ще до кінця не вичерпаний і існує можливість покращення метрологічних характеристик засобів НК за рахунок використання прогресивних методів опрацювання експериментальних даних. До кола таких методів належить і дискретне перетворення Гільберта (ДПГ) [13].

В цілому сфера використання ДПГ як надійного та ефективного методу дослідження інформаційних сигналів постійно розширюється. Він знайшов застосування у акустиці та гідроакустиці, радіолокації та радіонавігації, зв'язку та інших предметних областях, проте в задачах аналізу сигналів НК ще не набув належного поширення. Переваги ДПГ для ВСК полягають не тільки в тому, що це перетворення дозволяє однозначно визначати амплітудну і фазову характеристики сигналів ВСП, відслідковувати їх зміну в часі (навіть зміни у межах одного періоду несучого коливання), але й формувати вибірки цих параметрів значних обсягів для їх подальшого статистичного опрацювання.

У ВСК інформаційні сигнали спостерігаються на фоні шумів. За такої умови досягнути високу точність оцінювання параметрів і характеристик сигналів можна лише за умови їх статистичного опрацювання. Якщо методи статистичного аналізу амплітудних характеристик сигналів добре відомі [13] і мають багато технічних застосувань, то методи статистичного опрацювання фазових характеристик сигналів [13] ще не набули належного поширення в засобах ВСК. І цей факт має своє пояснення. У багатьох практичних завданнях застосування лінійної теорії похибок до кутових величин (до яких належить і фазовий зсув сигналів) виправдано з декількох причин. По-перше, методи математичної статистики для аналізу розподілених на прямій випадкових величин добре відомі в теорії і практиці вимірювань. По-друге, отримувані за їх допомогою оцінки та апаратурна реалізація досить прості. Але пряме перенесення положень лінійної теорії на задачі аналізу фазових вимірювань має певні межі. Це пов'язано з тим, що випадкові фазові зсуви сигналів розподілені на колі і мають природну періодичність з періодом  $2\pi$ . Використання лінійного наближення можливе лише

за умови, коли результати вимірювань мають малу дисперсію і розміщені у центральній частині інтервалу  $[0, 2\pi)$ , або  $[-\pi, \pi)$ .

Таким чином, опрацювання даних фазових вимірювань у засобах ВСК за методами, які не враховують циклічну природу фазових зсувів сигналів, некоректна і може призвести до невідновлюваних втрат інформації або спотворенню її істинного змісту. Підвищення вимог до точності вимірювань у разі значних дисперсій фазових зсувів потребує врахування циклічної природи кутових величин під час опрацювання й обґрунтування результатів вимірювань. Тому основну увагу буде приділено саме особливостям статистичного опрацювання фазових характеристики сигналів та обчислення вибіркового кругових характеристик.

Визначення дискретних характеристик сигналів ВСП в загальній постановці формулюється наступним чином [13]. Нехай на інтервалі  $T_a$  часу спостереження сигналу ВСП задано ґратку

$$S = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_N\}, \quad (2.12)$$

множину елементів якої впорядковано і для яких виконується нерівність  $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_j < \dots < t_N \leq T_a$ . Елементи ґратки  $S$  розміщені рівномірно і утворюють арифметичну прогресію  $t_j = t_1 + (j-1)T_d$ ,  $j \in [1, N]$ ,  $n < \infty$ , де  $T_d$  – крок ґратки.

На ґратці  $S$  задано послідовність значень,

$$u[j, \bar{p}_g, r_g] = U[j, \bar{p}_g, r_g] \cdot \cos[2\pi f_0 j - \varphi[j, \bar{p}_g, r_g]] + n[j], \quad (2.13)$$

$$g \in [1, G], \quad j \in \left[1, \frac{T_a}{T_d}\right], \quad \varphi[j, \bar{p}_g, r_g] \in [0, 2\pi),$$

яка є зображенням сигналу виду ВСП з дискретним аргументом. На інтервалі аналізу укладається не менше  $[T_a f_0]^+ \gg 1$  періодів сигналу, де  $[x]^+$  – операція виділення цілої частини числа  $x$ .

Множина  $S$  є областю визначення функцій (2.13), а множина значень функцій  $\{u[j, \bar{p}_g, r_g], j = \overline{1, N}\}$  – їх областю значень. Для послідовності

$\{u[j, \bar{p}_g, r_g], j = \overline{1, N}\}$  існує дискретне перетворення Гільберта.

Необхідно за результатами спостереження  $u[j, \bar{p}_g, r_g], j = \overline{1, N}$  визначити дискретні фазову і амплітудну характеристики сигналу, визначити поняття різниці дискретних фазових характеристик для цифрових сигналів та дискретної частотної характеристики цифрових сигналів.

Методологію визначення дискретних характеристик сигналів ВСП розглянемо на прикладі дослідження дискретної комплекснозначної послідовності (далі для спрощення аналітичних викладок у позначенні дискретних сигналів ВСП залишимо тільки змінну  $j$ ) [13].

1. Задаємо дискретну комплекснозначну послідовність у вигляді :

$$\dot{z}[j] = u[j] + i\hat{u}[j], \quad j = \overline{1, N}, \quad (2.14)$$

отже  $\text{Re}\dot{z}[j] = u[j]$ ;  $\text{Im}\dot{z}[j] = \hat{u}[j]$ . Послідовність (2.14) уявляє собою дискретну аналітичну послідовність [13].

У послідовності (2.14) вимірними є лише значення дійсної послідовності  $u[j]$ , яку визначають за результатами спостережень неперервного сигналу ВСП.

Дискретна дійсна послідовність  $\hat{u}[j]$  обчислюється як дискретний Гільберт-образ дискретної послідовності  $u[j]$ .

Для  $\dot{z}[j]$  дотримується умова ортогональності:

$$\sum_{j=1}^n u[j]\hat{u}[j] = 0. \quad (2.15)$$

2. Визначимо дійсну послідовність  $\hat{u}[j]$ . Можливі два варіанта розв'язання цього завдання – у часовій і частотній областях . Спектральний метод обчислення послідовності  $\dot{z}[j]$ , заданої на скінченній множині для  $j = \overline{1, N}$ , ґрунтується на співвідношенні спектрів і передбачає такі етапи:

2.1. Розрахунок  $N$ -точкового дискретного перетворення Фур'є  $S_u(m)$  послідовності  $u[j]$



$$S_u(m) = \sum_{j=1}^N u[j] \exp\left(-i \frac{2\pi}{n} jm\right). \quad (2.16)$$

Значення  $S_u(m)$  розраховуються для дискретних частот  $f_m = \frac{m}{N\Delta t}$ ,  $0 \leq m \leq N-1$ .

2.2. Розрахунок  $N$ -точкового дискретного перетворення Фур'є  $S_z(m)$  послідовності  $z[j]$  шляхом трансформації спектру (2.16):

$$S_z(m) = \begin{cases} S_u[0] & \text{для } m = 0; \\ 2S_u[m] & \text{для } 1 \leq m < N/2 - 1; \\ S_u[m] & \text{для } m = N/2; \\ 0 & \text{для } N/2 + 1 \leq m \leq N - 1. \end{cases} \quad (2.17)$$

2.3. Розрахунок  $z[j]$  за значеннями  $S_z(m)$  за допомогою оберненого дискретного перетворення Фур'є

$$z[j] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} S_z[m] \exp\left(i \frac{2\pi}{N} jm\right). \quad (2.18)$$

Описана методика реалізована в середовищі Matlab як функція hilbert [24].

2.5. Визначення  $z[j]$  послідовності:  $\hat{u}[j] = \text{Im } z[j]$ .

3. Власне визначення дискретних характеристик послідовності  $u[j]$ .

Використання ДПГ дозволяє визначити послідовність  $\hat{u}[j]$  і на цій основі отримати дискретні характеристики сигналу ВСП, які уявляють собою зображення відповідних характеристики сигналу з дискретним аргументом.

Отже дискретні характеристики послідовності (2.13) визначаються наступним чином:

1) дискретна амплітудна характеристика сигналу:

$$A[j] = \sqrt{u^2[j] + \hat{u}^2[j]}; \quad (2.19)$$

2) дискретна фазова характеристика сигналу:

$$\Phi[j] = \arg z[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign } \hat{u}[j](1 + \text{sign } u[j])\} + 2\pi \mathbf{K}[u[j], \hat{u}[j]]; \dots (2.20)$$

де  $\mathbf{K}[u[j], \hat{u}[j]]$  – оператор розгортання фазової характеристики за межі інтервалу  $[0, 2\pi)$ .

3) дискретна частотна характеристика сигналу:

$$\Phi[j] = \frac{\Phi[j] - \Phi[j-1]}{2\pi T_d} \quad (2.21)$$

4) різниця дискретних фазових характеристик двох заданих дискретних сигналів  $u_1[j]$  і  $u_2[j]$ :

$$\varphi[j] = \Phi_2[j] - \Phi_1[j] \quad (2.22)$$

## 2.4 Моделювання процесу опрацювання сигналів ВСП

Використання дискретної аналітичної послідовності дає можливість виконати числове моделювання сигналів складної форми та визначити їх характеристик. В якості несучого сигналу використовується високочастотне гармонічне коливання, що обумовлюється простотою демодуляції і відносно вузьким спектром результуючого модульованого сигналу. В загальному випадку сигнали ВСП, які утворюються під час сканування ОК, уявляють собою вузькосмугові сигнали з локально зосередженою амплітудною і фазовою модуляцією, викликаною зміною параметрів і характеристик ОК на його різних ділянках. Для аналізу і візуалізації процесу отримання дискретних аналітичних послідовностей та кількісних оцінок їх характеристик (амплітудної, фазової, частотної) виконаємо числове моделювання сигналів зі складними законами модуляції. Для цього в середовищі Matlab була складена і налагоджена програма визначення дискретних амплітудної і фазової характеристик амплітудо-фазо-модульованого сигналу ВСП.[15]

Результати моделювання відображені на рис. 2.7, на якому показано:

епюра а – графіки гармонічного та амплітудо-фазо-модульованого сигналів;

епюра б – графік сигналу фазової модуляції;

- епюра в – графік сигналу амплітудної модуляції;
- епюра г – графіки вихідного і розрахованого сигналів амплітудної модуляції;
- епюра д – графіки вихідного і розрахованого сигналів фазової модуляції.

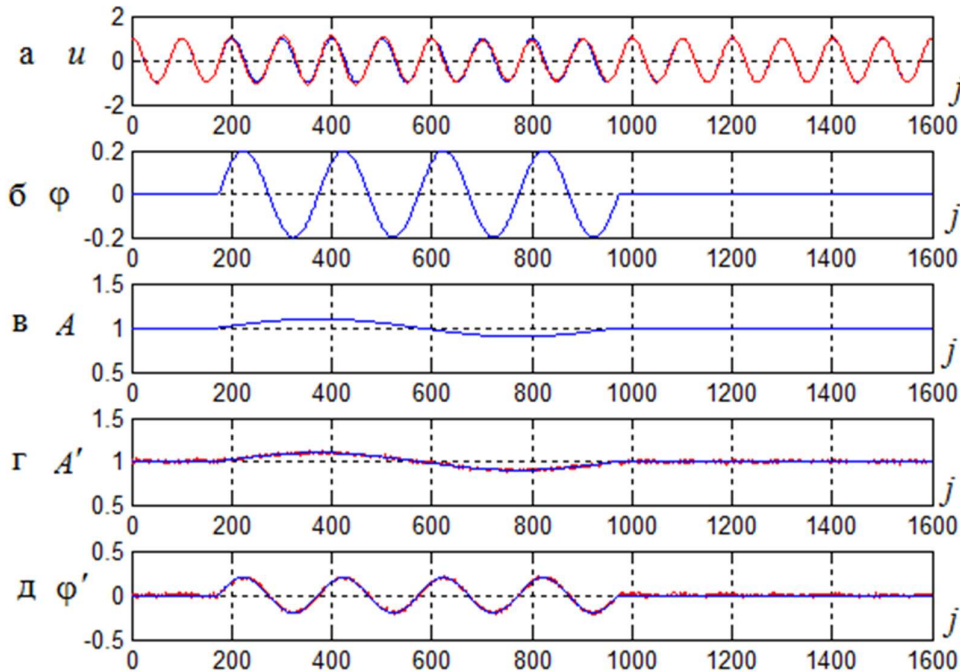


Рис.2.7. Графіки вихідної послідовності  $u[j]$  (а),  
сигналів фазової  $\phi[j]$  та амплітудної  $A[j]$  модуляції (б, в)  
і результату їх обчислення на основі ДПГ  $A'[j]$  та  $\phi'[j]$  (г,д)

Для аналізу імпульсних сигналів доцільно використовувати  $R$ -статистику, описану в [18]. Рис. 2.8(а) ілюструє гаусовий імпульс, рис.2.8(б) показує цей сигнал зачумленим, на графіку (в) – дискретна фазова характеристика, а відповідно на графіку (г) – дискретна частотна характеристика.

Отримання фазових характеристик досліджуваного сигналу і різниці ФХС як вибірки створює передумови для застосування статистичних методів аналізу. Зі всіх відомих статистичних характеристик вибіркова результуюча довжина, по-перше, є інваріантною до початкової фази сигналу, по-друге, співпадає в часі з сигналом від дефекту за умови компенсації внесеної напруги та напруги

холостого ходу (2.2). Ознакою присутності чи відсутності сигналу дефекту є зміна значень дисперсії різниці фазових характеристик сигналу ВСП і фази несучого колювання, а отже, і значень результуючої довжини вектора, що дозволяє виявити сигнали навіть на фоні значних завад.

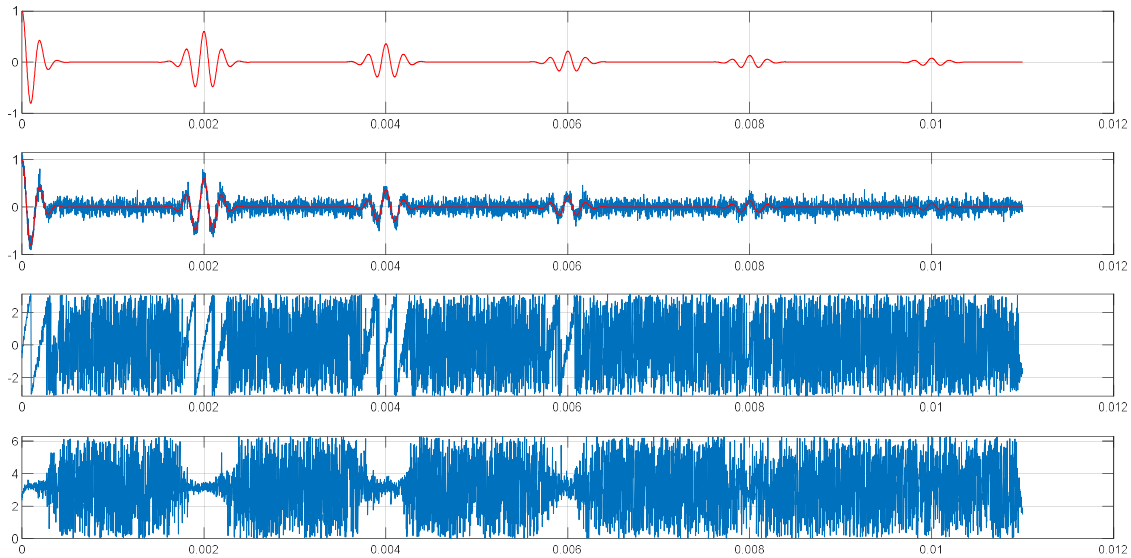


Рис. 2.8. Моделювання і опрацювання імпульсного сигналу ВСП з гармонічною несучою, породженого дефектом типу тріщина

Визначення вибіркової результуючої довжини вектора (або  $R$ -статистики) доцільно виконувати в ковзному режимі з метою оцінювання її поточних значень.

На практиці завжди аналіз сигналів обмежений інтервалом спостереження. Це означає, що фактично дослідженню піддається не весь сигнал, а його частина, яка може бути представлена як добуток сигналу на певну вагову віконну функцію, в найпростішому випадку на вікно прямокутної форми.

В цілому вікна впливають на: виявлення сигналу в суміші С/Ш, точність оцінки його параметрів і характеристик, динамічний діапазон, в якому ведеться спостереження, ймовірність виявлення сигналу, реалізацію обчислювальних операцій тощо.

Для прямокутного вікна виникають осциляції на фронтах вікна, застосування іншого вікна під час обчислення гільберт-образу сигналу приводить до зменшення методичної похибки  $\Delta x_m(t)$  [18].

Необхідно відмітити, що для того, щоб динамічний діапазон досліджуваних сигналів був максимальний, вікно повинно мати вузьку головну пелюстку і низький рівень бокових пелюсток. Даний критерій задовольняють вікна Хеммінга, Чебишева, Кайзера, Блекмана.

В разі необхідності ковзна віконна обробка виконується аналогічно, тільки додатково вводяться параметри самого вікна і руху вікна: тривалість вікна  $T_W = MT_D > T$ , де  $M$  – кількість відліків,  $i$  крок руху вікна  $sh$ ; для зменшення методичної похибки для кожного положення вікна, як найбільш точні відбирають значення  $\Delta\varphi(t)$ , обраховані для центральної частини вікна  $W(t)$  тривалістю  $st$ .

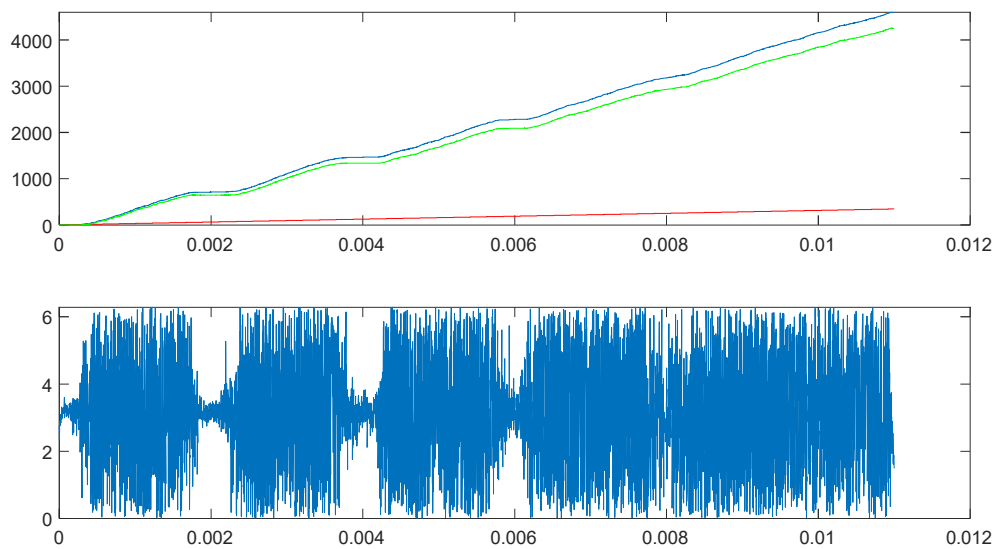


Рис.2.9. Графіки, що ілюструють процес дослідження R-статистики

На рис.2.9 (а) зеленим кольором зображено різницю дискретної фазової характеристики  $\Phi[j] - \Phi[j-1]$ , а на рис. 2.9. (б) – різниця фазових характеристик тих самих сигналів за відсутності виконання операції розгортання їх фазових характеристик.

Аналіз зашумленого сигналу за допомогою R-статистики (рис.2.10.) дає можливість краще виявляти зашумлені сигнали ВСП (рис. 2.8), наприклад порівняємо з виділення тих самих сигналів амплітудним методом (рис.2.11), де четвертий імпульс вже є практично нерозрізнюваним на фоні адативного шуму.

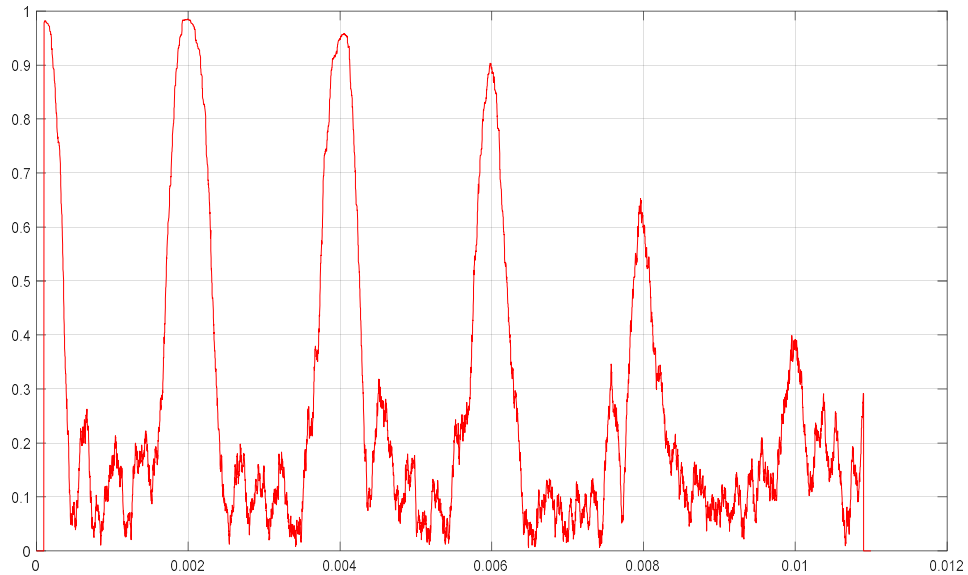


Рис 2.10. Виділення сигналів ВСП від дефектів на основі аналізу R-статистики модельованого імпульсного сигналу

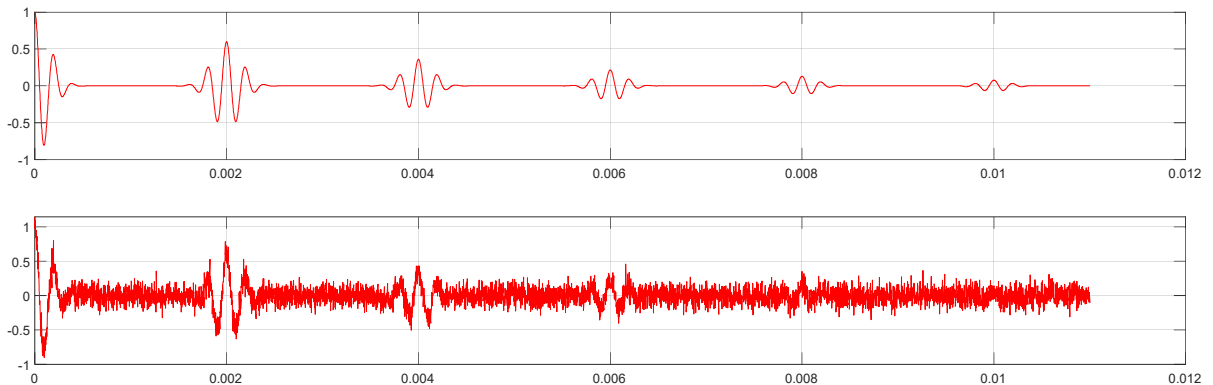


Рис 2.11. Аналіз сигналу амплітудним методом

Таким чином, виділення сигналу за допомогою R-статистики дає кращий результат – в проведеному досліді навіть 5 імпульс надійно виявляється на фоні шуму.

## 2.5 Формування загальних вимог до системи контролю

Особливості об'єкту контролю та умов його проведення :

1) Для експлуатаційного контролю ОК має бути певним чином підготовлений з метою забезпечення необхідного доступу до труби вздовж всієї її внутрішньої поверхні. З трубок та прилеглих колекторів має бути злито воду, має бути забезпечено відкритий доступ для входу в колектори;

2) Необхідно забезпечити цехові умови :

a) Температура приміщення не повинна виходити за межі діапазону +10°C...+28°C

b) Рівень вологи приміщення не повинен перевищувати 85%

c) Освітленість в приміщенні має бути достатня для того щоб розрізнити данні на екрані дефектоскопу (щоб дефектоскопіст міг спостерігати результати контролю за годографом на екрані приладу і аналізувати отримані данні ).

3) До магнітного та електричного полів вимоги загальні.

Особливості роботи з дефектоскопом :

1) Датчик типу внутрішній накладний та накладний трансформаторний, в залежності від обраного режиму.

2) Система переносна , необхідне живлення від мережі.

3) Необхідне місце для розміщення ПК, для збору інформації та для забезпечення зручності роботи при контролі;

4) Для підключення до персонального комп'ютера необхідний USB кабель.

Необхідно забезпечити можливість роботи з приладом продовж 8 годин робочого дня.

Вимоги до персоналу: персонал має бути кваліфікованим для проведення подібних робіт, необхідна сертифікація для проведення вихрострумowego контролю.

## **2.6 Висновки**

1) Вихрострумний контроль завдяки великій кількості наявних датчиків дає можливість підібрати найбільш підходящий відповідно до заданих вимог до системи контролю. Вибір методу отримання інформації з сигналу ВСП також є

важливим етапом реалізації ВСНК. Відповідно до поставлених вимог обрано двопараметровий спосіб виділення інформації.

2) Перетворення Гільберта дає змогу визначити АХС і ФХС з локально зосередженою модуляції, що спричиняється зміною характеристик ОК, в тому числі і наявністю дефектів в матеріалі трубки ПГ. При скануванні ОК за допомогою ВСП здійснюється модуляція параметрів його сигналів.

3) Проведено моделювання програми опрацювання сигналів ВСП на тестових сигналах, що підтверджує доцільність використання описаної методики обробки з використанням дискретного перетворення Гільберта сигналів ВСП.

4) Згідно описаної методики необхідно розробити функціональну схему та алгоритм роботи приладу, що на початкових етапах розробки дасть уявлення про систему контролю і необхідні для подальшої розробки вузли.



### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ СИСТЕМИ

### 3.1. Обґрунтування вибору конструкції та типу датчику

Датчик для вихрострумового контролю труб ПГ обирається в залежності від виду контролю (виробничий або експлуатаційний).

Труби малих діаметрів з аустенітних сплавів доцільно перевіряти вихрострумовими трансформаторними перетворювачами [5]. Зокрема розглянемо конструкцію обертального сканувального пристрою [17] для динамічного контролю тонкостінних труб, представлений на рис. 3.1.

Для забезпечення можливості обертання навколо труби 3 ВСП 1 розміщено на роторі 2, який встановлений у статорі 4 за допомогою двох підшипників 5 і обертається за допомогою двигуна 8 і пасової передачі 9. Статор 4 кріпиться до основи 6 пристрою двома стояками 7.

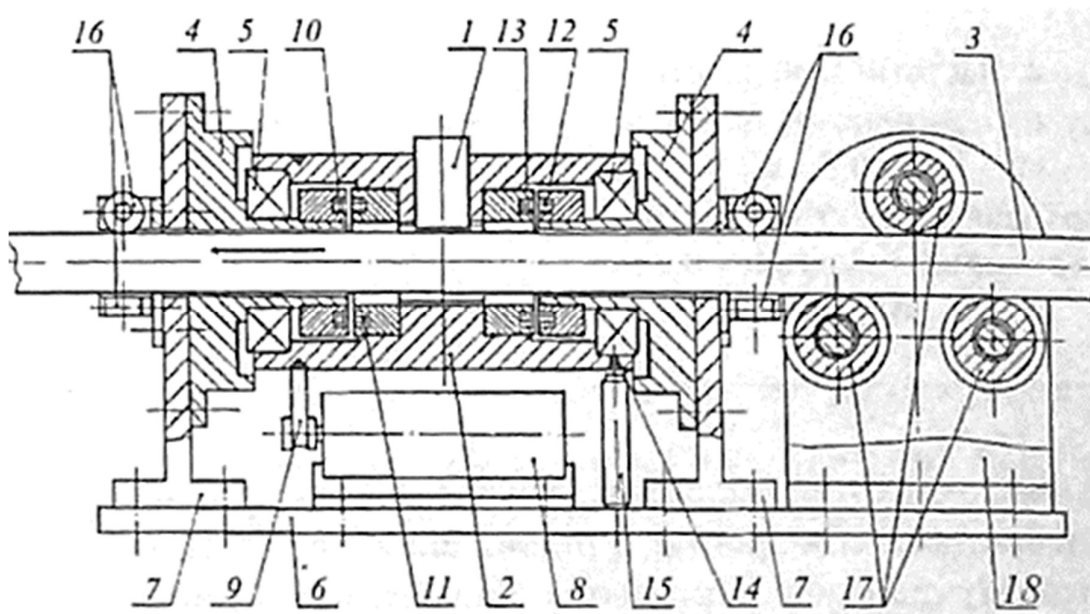


Рис 3.1. Пристрій для контролю трубок зовнішнім обертальним ВСП

Напряга збудження на генераторні обмотки ВСП 1 передається за допомогою статорної (нерухомої) 10 і роторної (обертальної) 11 обмоток

первинного (генераторного) обертового трансформатора (ОТ). Таким же способом вихідний сигнал ВСП 1 передається за допомогою роторної (обертової) 13 і статорної (нерухомої) 12 обмоток вторинного (вимірювального) ОТ. Для синхронізації розгортки індикації з обертанням ротора 2 на ньому встановлений магніт 14, який під час обертання формує імпульс синхронізації в індуктивному давачі 15. Для центрування труби на стояках встановлені вхідні і вихідні ролики центрування 16. Крім того для центрування труби під час контролю її кінців передбачено напрямні ролики 17, які встановлено на стояках 18. Аналогічні пристрої центрування розміщено на виході труби зі сканувального пристрою [10].

Розглянемо також внутрішній обертовий зонд для експлуатаційного контролю труб на рис.3.2. Основні конструкційні елементи: корпус 1, двигун 2, ротор 3, 4 - накладний вихрострумний трансформаторний перетворювач, 5,6 трансформатори для безпроводної передачі сигналу, 7,8 - механізми центрування зонду, 9 – кабель для підключення ВСП до системи контролю (не показано 17)].

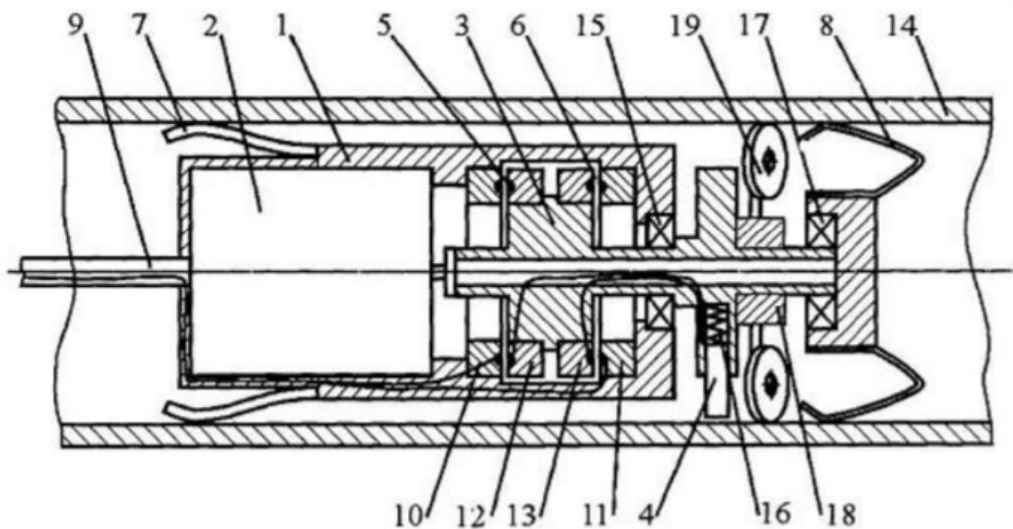


Рис. 3.2. Вихрострумний зонд для обертового сканування внутрішньої поверхні трубок за допомогою вмонтованого двигуна

Кожен з трансформаторів 5 і 6 для безпроводної передачі сигналу складається з нерухомої 10 і 11 і обертової 12 і 13 складових, які розміщено на корпусі 1 і

роторі 3 відповідно. Нерухомі і рухомі обмотки кожного трансформатора 5 і 6 закладені в концентричні пази на зовнішній поверхні. Двигун 2 і механізм центрування 7 з'єднано з корпусом 1. Вісь двигуна 2 з'єднана з ротором 3, а вісь обертання ротора, відповідно, співпадає з віссю контрольованої труби 14. Ротор 3 встановлений на підшипнику 15, нерухоме кільце якого закріплено на корпусі 1. Накладний ВСП встановлено на роторі 3, він піджимається пружиною 16 до внутрішньої поверхні ОК. Механізм центрування 8 встановлено на підшипнику 17, який закріплено на протилежному від двигуна 2 кінці ротора 3. Для полегшення проходження криволінійних ділянок можна використати плаваючий підшипник 17. На роторі 3 закріплюється пристрій забезпечення повздовжнього переміщення 18 (1-2 тягових колеса 19, осі яких встановлено непаралельно відносно осі обертання ротора). Тягові колеса 19 забезпечені пружними елементами (не показано) для притискання їх до поверхні ОК 14.

Вихрострумний зонд для дефектоскопії внутрішньої поверхні труб накладного ВСП трансформаторного типу. Під час введення зонду в трубу 14 він центрується відносно за допомогою пружних механізмів центрування 7 і 8. Після включення двигуна 2 ротор 3 починає обертатися навколо своєї осі і накладний ВСП 4 сканує поверхню труби 14 з мінімальним зазором, який забезпечується пружним механізмом 16. Зазвичай кабель 9 роблять жорстким і за його допомогою теж можна штовхати зонд, що зручно для непередбачуваних випадків. Механізм 18 за допомогою тягових колес 19 допомагає просуватись зонду вздовж труби, колеса направлено непаралельно до осі обертання ротора 3. Тому при обертанні ротора 3 тягові колеса 19 притискаються до внутрішньої поверхні труби 14 і тож дослідження поверхні ВСП 4 відбувається по гвинтовій лінії з кроком (відстань між сусідніми лініями сканування), який регулюють вибором співвідношення частоти обертання ротора до швидкості переміщення зонда вздовж труби. Використання механізму повздовжнього переміщення 18 покращує прохідні властивості зонда (крок регулюють кутом нахилу тягових колес відносно осі ротора), що особливо важливо для труб великої довжини. Сигнал збудження з генератора системи контролю (не показано) надходить через нерухому 10 і

обертальну 12 обмотки трансформатора для безпровідної передачі зв'язку 5 на обмотку збудження ВСП 4. Вихідний сигнал з вимірювальної обмотки ВСП 4 надходить через обертальну 13 і нерухому 11 обмотки обертового трансформатора 6 на вхід системи контролю (не показано) [17].

З двох розглянутих варіантів більш доцільним для контролю внутрішніх тріщин труб вбачається використання зонда для обертового сканування внутрішньої поверхні трубок за допомогою вмонтованого двигуна, що представляє собою трансформаторний накладний ВСП.

### 3.2 Рекомендації до розрахунку системи «ВСП-ОК»

#### 3.2.1 Приклад розрахунку накладного диференціального ВСП для дефектоскопії

Проведемо орієнтовний розрахунок вихрострумового накладного диференціального датчику, призначеного для контролю довгих тонких протяжних дефектів – тріщин в стінках трубки ПГ.

1) Вихідні данні по розмірам котушки :

$W_1 = 35$  – кількість витків на збуджувальній котушці, намотано в дві обмотки , 20 і 15;

$W_2 = 48$  – кількість витків на вимірювальній котушці намотано в два ряди по 25 і 23 витки;

$d_{\text{пр}} = 0,06$  мм – діаметр прутка;

$d_{\text{пр з із}} = 0,075$  мм – діаметр прутка з ізоляцією;

$h_{\text{кот}} = 2$  мм – висота намотки котушки;

$d_{\text{кот}} = 2$  мм – діаметр каркасу котушки

$h_{\text{корп}} = 0,5$  мм – товщина захисного корпусу (між котушками і трубою );

Для отримання розрахункових вихідних сигналів системи відповідно до наявності дефектів різних розмірів скористаємося амплітудним методом визначення залежності товщини зазору від напруги .

2) Розрахунок робочого струму збудження з умови відсутності перегріву котушки збудження:

$$I_{\text{еф}} = (0,85 \div 0,9) \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot [\theta]_{\text{д}} \cdot S_{\text{ох}} \cdot d_{\text{пр}}^2}{\rho \cdot d_{\text{еф}} \cdot W_1}} \quad (3.1)$$

де  $I_{\text{еф}} = (0,85 \div 0,9)I_{\text{еф.гран.}}$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопередачі, який залежить від форми та конструкції котушки, її розміщення та вентиляції  $\lambda \in (8 \div 12) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ , прийmemo  $\lambda = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$[\theta]_{\text{д}}$  – допустима температура перегріву, що є різницею між температурою середовища і температурою котушки  $[\theta]_{\text{д}} = 5^\circ\text{C}$ .

Площа охолодження котушки збудження розраховується за формулою:

$$S_{\text{ох}} = (S_{\text{верхн}} + S_{\text{нижн}}) + (S_{\text{внутр}} + S_{\text{зовн}}) \quad (3.2)$$

$$S_{\text{ох}} = 2\pi(3^2 - 2^2) + 2 \cdot 2\pi \cdot (2 + 3) = 131 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}.$$

Розрахуємо числове значення ефективного значення струму:

$$I_{\text{еф}} = 0,86 \times \sqrt{\frac{10 \cdot 5 \cdot 131 \cdot 10^{-6} \cdot 36 \cdot 10^{-10}}{1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 35}} = 116 \text{ (мА)}.$$

3) Розрахунок оптимальної робочої частоти. Виражаємо значення частоти з рівняння для узагальненого параметра [1]:

$$\beta_0 = D_{\text{екв}} \sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0} \quad (3.3.)$$

де кругова частота  $\omega = 2\pi f$ ;

$\gamma$  – питома електропровідність матеріалу,  $\gamma = 1,388 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ .

Підставляємо вираз з частотою замість кругової частоти:

$$\beta_0 = D_{\text{екв}} \sqrt{2\pi f \cdot \gamma \cdot \mu_0}$$

Виражаємо частоту з попередньої формули:

$$f = \left(\frac{\beta_0}{D_{\text{екв}}}\right)^2 \frac{1}{2\pi\gamma\mu_0}$$

В нашому випадку для забезпечення високої чутливості до дефектів обираємо [1]:  $\beta_0 = 6$ .

Проводимо розрахунок значення еквівалентного діаметра  $D_{\text{екв}}$ :

$$D_{\text{екв}} = d_{\text{зб.сер}} + 1,5h_1, \quad (3.4)$$

$$h_1 = h_{\text{заз}} + h_{\text{корп}} + \frac{d_{\text{кот}}}{2}, \quad (3.5)$$

$$h_1 = 0.25 + 0.5 + 1 = 1,75(\text{мм}),$$

$$D_{\text{екв}} = 2 + 1.5 \cdot 1,75 = 4,62(\text{мм}),$$

$$f = \left( \frac{6}{4.2 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{1}{2\pi \cdot 1.388 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}},$$

$$f = 153,9\text{кГц} \approx 154 \text{ кГц}.$$

Виходячи з розрахованих значень за робочу частоту приймемо 154кГц .

4) Встановимо залежність значення напруги на виході ВСП від товщини тріщини. Формула для визначення значення внесеної напруги:

$$\dot{U}_{\text{вн}} = \dot{U}^* \cdot U_{0\text{н}} \cdot e^{-3\xi}. \quad (3.6)$$

4.1)Напруга нульового ходу  $U_{0\text{н}}$  розраховується за формулою :

$$U_{0\text{н}} = 1.35\omega\mu_0 W_1 W_2 (m - 0.3) I \sqrt{D_1 D_2}, \quad (3.7)$$

де  $\omega = 2\pi f$ ;

$$\mu_0 - \text{магнітна стала, } 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} /$$

$$m = \frac{D_{\text{ср1}}}{D_{\text{ср2}}}, \quad (3.8)$$

$$m = \frac{2}{2} = 1.$$

Враховуючи , що  $f=154\text{кГц}$ .

$$U_{0\text{н}} = 1.35(2\pi \cdot f)(4\pi \cdot 10^{-7}) \cdot 35 \cdot 48 \cdot (1 - 0.3) 116 \cdot 10^{-3} \sqrt{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3 \cdot 2}}$$

$$U_{0\text{н}} = 0,45(\text{В}).$$

4.2)Розрахуємо  $U_{\text{вн}}$

$$U_{\text{вн}} = U_{\text{х.х.}} (\text{Re}(U_{\text{вн}}^*) + j \text{Im}(U_{\text{вн}}^*)) \cdot e^{-3 \cdot \xi}, \quad (3.9)$$

де параметр  $\xi$  розраховується за формулою :

$$\xi = \frac{2h_1}{D_{\text{екв}}}, \quad (3.10)$$

$$\xi = \frac{2 \cdot 0.88}{4.82} = 0.365$$

$$e^{-3\xi} = 0.334.$$

Для розрахунку необхідно визначити еквівалентну внесену напругу.

4.3)Щоб знайти еквівалентну внесену напругу  $\dot{U}_{\text{вн}}^*$  користуємося годографом [1], представленим на рис.3.3. Для нього використано позначення:.

$h^*$ - на годографі це глибина вузьких довгих дефектів;

$\delta^*$ -глибина залягання дефекту;

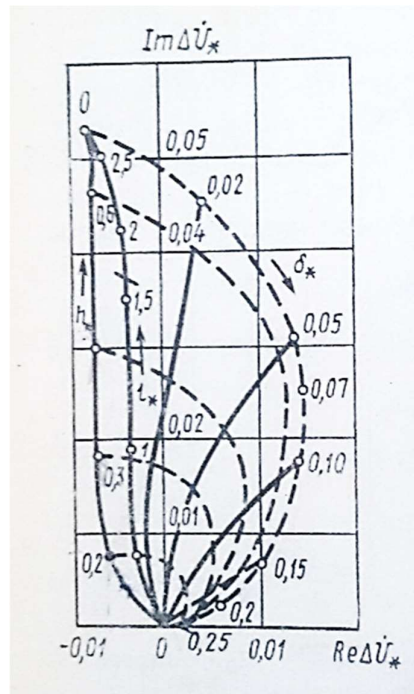


Рис. 3.3 Годографи  $\Delta\dot{U}_*$  накладного вихрострумового ВСП в залежності від глибини вузьких довгих дефектів у провідному напівпросторі[1]

Для визначення значення внесеної напруги будемо користуватись крайньою лівою кривою годографа для поверхневих дефектів ( $\delta^*=0$ ). Отримані числові дані зведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Залежність товщини тріщини від значень напруги від дефекту

$h$ , мм	$h^*$ , ум. од.	$\dot{U}_*$ , В	$\dot{U}_{\text{вн}}$ , В	$ \dot{U}_{\text{вн}} $ , мВ
0.8	0.17	$-0.006+0.008j$	$0,0026+ 0,00354j$	4.39
0.6	0.12	$-0.005+0.0035j$	$0,00221+0,00154j$	2.69

### 3.2.1 Теоретичні основи для проведення розрахунку накладного перетворювача для контролю товщини стінок ОК

На рис. 3.4 представлено годограф для немагнітного листа, що демонструє вплив товщини  $T$ , питомої електропровідності  $\sigma$  і зазору  $h$ .

Годографи зображені на цьому малюнку обмежені з одного боку штрих пунктирною кривою, що відповідає нескінченній товщині листа, а з другого боку для нескінченно тонкого об'єкту. Суцільними лініями показано годографи  $\dot{U}_{вн}$ , при зміні товщини  $T$  і фіксованому значенні питомої електропровідності  $\sigma$  (параметру  $\beta = \text{const}$ ), штриховими лініями годографи  $\dot{U}_{вн}$  – при змінній  $\sigma$  (параметру  $\beta$ ) при постійних значеннях товщини листа ( $T = \text{const}$ )

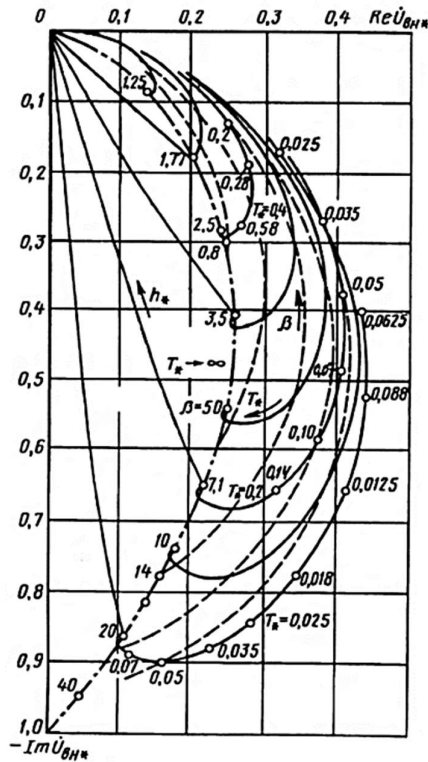


Рис. 3.4. Годограф відносної внесеної напруги накладного перетворювача

На рис. 3.5 приведені діаграми чутливості до товщини  $\tilde{S}$ , розраховані для різних значень  $T$  і  $\beta$ . Суцільними лініями на цьому малюнку зображені годографи  $\tilde{S}$ , при зміні товщини, а пунктирними лініями з'єднані точки змінного параметру  $\beta$ . Як показує аналіз наведених на рис 3.4 залежностей, максимальний сигнал при зміні товщині отримується у випадку тонкого листа, до того ж при великих  $\beta$  і у умовах  $T\beta^2 = TR\omega\mu_0\sigma \approx 3$ . При зміні відносного зазору  $h^*$  в межах 0,0625 до 1,5 значення  $T\beta^2$ , значення, що відповідають максимальному значенню сигналу зменшуються від 4,5 до 2,5.



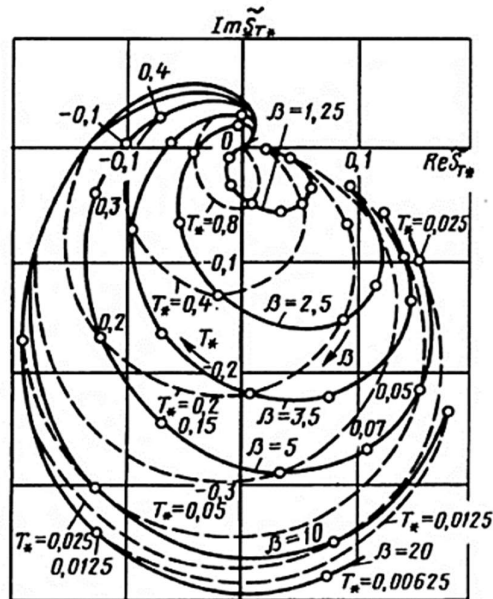


Рис. 3.5. Годограф комплексної чутливості накладного вихрострумowego перетворювача до змін товщини ОК

Якщо необхідно контролювати товщину з побудовою графіку даних в залежності від  $\sigma$ , то оптимальне значення  $T\beta$  при амплітудно-фазовому способу відбудови приблизно 1,5 при  $h^* = 0,5$ . При збільшенні зазору це значення зменшується. Проте варто зазначити, що для випадку малих товщин ( $T \ll 1$ ) роздільний контроль  $T$  та  $\sigma$  неможливо взагалі, так як внесена напруга залежить від добутку ( $T\sigma$ ) і визначити їх значення незалежно одне від одного можна використовуючи спеціальні методи, наприклад, застосувавши двухчастотний метод де друга частота настільки велика що товщина ОК практично не впливає, а питома електропровідність заміряється на тій самій частоті.

### 3.4 Розроблення функціональної схеми системи

Структура запропонованої системи вихрострумowego контролю трубок ПГ наведена на рис.3.6.

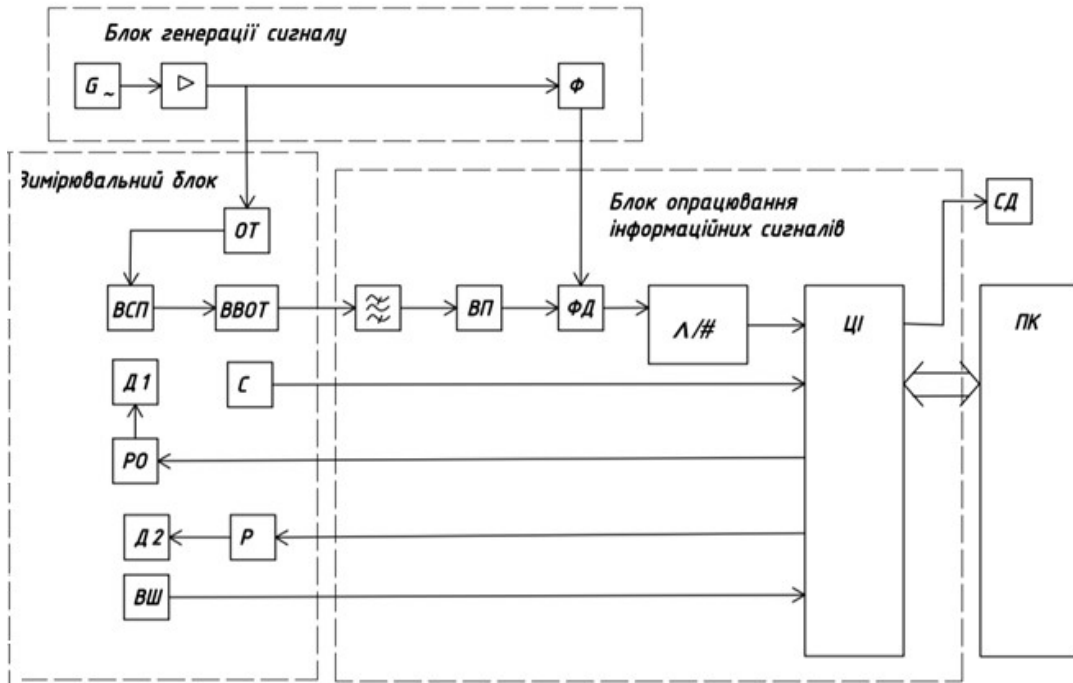


Рис. 3.6. Функціональна схема системи вихрострумowego контролю трубок ПГ

Схема системи вихрострумowego контролю містить генератор синусоїдального сигналу, вихід якого через підсилювач потужності і обертальний трансформатор (ОТ) з'єднаний окремо з вимірювальним блоком та фазообертачем. З фазообертача сигнал поступає на опорний вхід фазового детектора. Вимірювальний блок побудовано виходячи з необхідності мінімізувати кількість провідних зв'язків, для цього використано обертальний трансформатор, основна перевага якого безконтактна передача сигналу. Збуджуючі котушки диференціального ВСП знаходяться в збуджуючому полі ОТ і відповідно ВВОТ знаходиться в полі вимірювальних котушок ВСП. ВСП разом з ротором сканувального пристрою обертається за допомогою електродвигуна. У вимірювальному блоці також є синхродавач, задача якого полягає в передачі виміряної кутової інформації на цифровий інтерфейс, для подальшої обробки і управління рухом ВСП. Відповідно РО керує кроковим двигуном, що управляє кутовим рухом котушок. Відповідно вимірювач шляху, регулятор і другий двигун необхідні для керування рухом вздовж осі труби. В результаті є можливість повною мірою оцінити, де саме проходить зараз контроль, де знаходиться датчик,

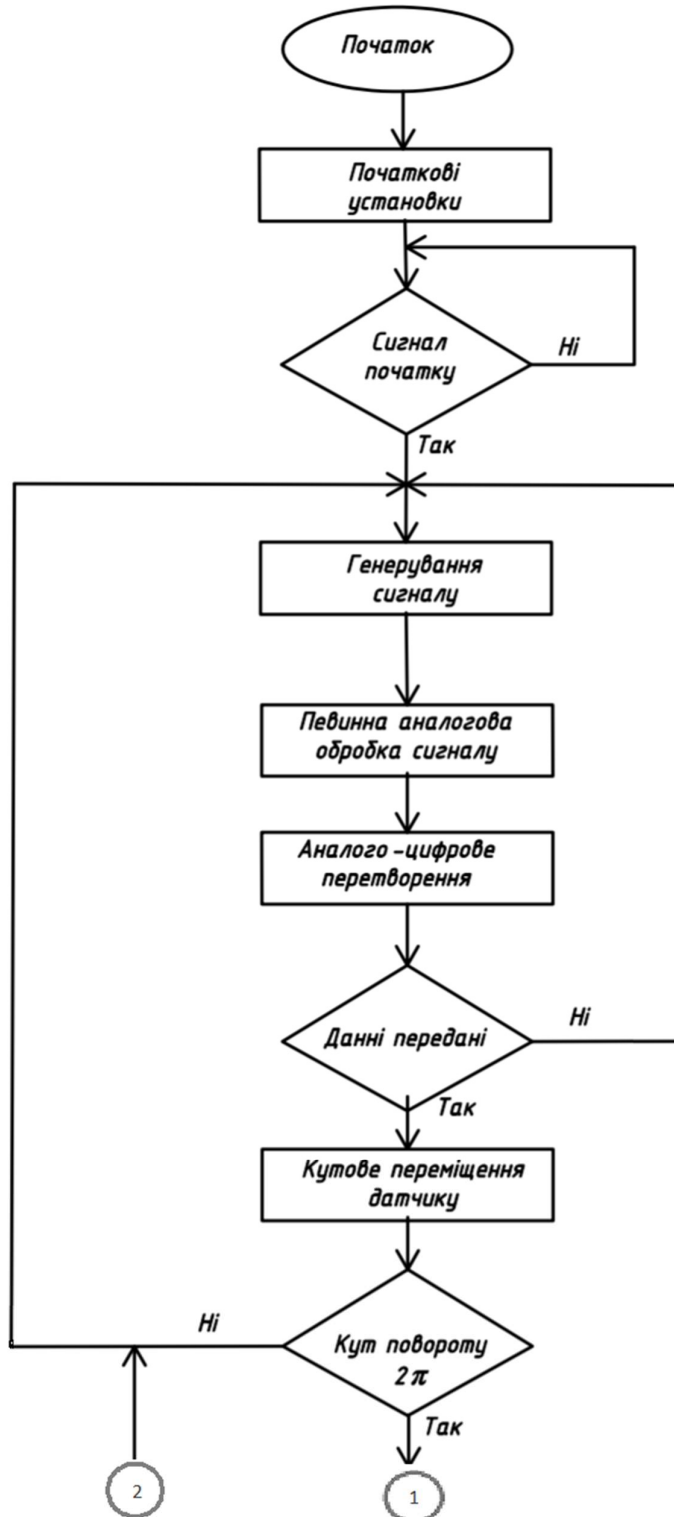
точне місце локалізації дефекту, таким чином забезпечується повнота керування рухом датчика в трубі.

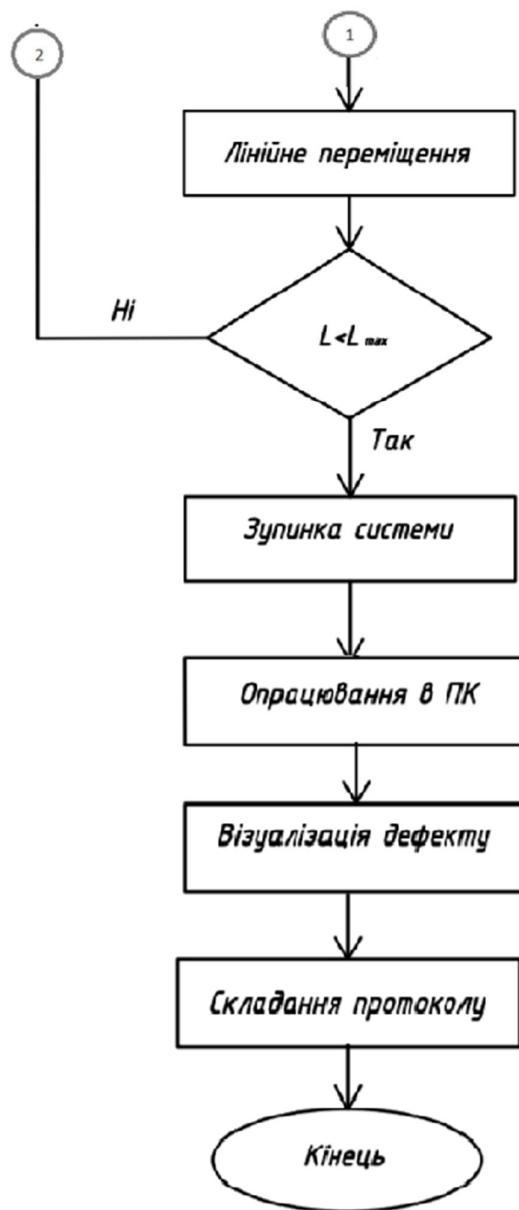
З ВВОТ сигнал фільтрується смуговим фільтром, обробляється вимірювальним перетворювачем для узгодження опорів, а відповідно і узгодження сигналів ( так забезпечується отримання на виході майже 100% вимірюваного сигналу). Далі сигнал поступає на фазовий детектор на виході якого отримуємо сигнал постійного струму пропорційний фазовому зсуву між вимірюваним і опорним сигналом. З виходу фазового детектора сигнал надходить на АЦП та на цифровий інтерфейс, також до ЦІ на вхід синхронізації розгортки надходить сигнал з синхродавача. Цифровий інтерфейс сполучає цифрову частину системи з ПК, де відбувається подальша обробка сигналу за певною методикою та вибір чутливості дефектоскопа.

### **3.5 Розроблення алгоритму роботи системи**

Згідно описаного нижче алгоритму спочатку відбуваються початкові налаштування системи та подання початкового сигналу. Після збудження котушки і отримання даних вимірювальною котушкою та передачі сигналу відбувається первинна обробка сигналу, її аналого-цифрове перетворення. Якщо дані передані, то відбувається зміщення датчику, паралельно до процесу обертання датчику відбувається поздовжній рух датчику по трубі, поки не буде проконтрольовано всю довжину трубки теплообміну.

Після проведення повного контролю трубок зупиняємо систему і проводимо повне опрацювання даних на ПК. Згідно отриманих даних відмічаємо дефектні ділянки труби, для розуміння які з трубок необхідно буде заглушити і чи може ПГ продовжувати свою роботу і виконувати повною мірою чи частково свій функціонал. Відбувається складання протоколу згідно проаналізованих даних та нормативних документів.





### 3.6 Висновки

1) Розглянуто функціональну схему, що забезпечує режим контролю з датчиками трансформаторного типу.

2) Визначено що для проведення експлуатаційного контролю доцільно використовувати внутрішній обертальний зонд, це обумовлено особливими умовами доступу до ОК (відсутність можливості демонтажу ОК, неможливість ручного доступу). За рахунок постійного тертя, що забезпечується механізмами притискання, такий тип датчику швидко зношується, але є незамінним для використання в подібних умовах та для дослідження труб з вигинами. Серед його переваг варто виділити відносно високу чутливість за рахунок зменшення завад (ВСП обертається разом з ротором накладного трансформаторного ВСП дозволяє підвищити селективність контролю), наявність механізму поздовжнього переміщення, що покращує проходження труб великої довжини.

3) Методику розрахунку датчика проілюстровано прикладами розрахунку накладного датчику для вирішення завдання 100% контролю труб парогенератора на експлуатаційному етапі його життєвого циклу.

4) Виконано функціональний розрахунок системи, сформовано алгоритм його роботи. Пропонуються до розробки генераторний блок, система попереднього опрацювання сигналів, блок перетворення напруга-струм, вимірювальний підсилювач, пропонується підібрати АЦП.

## РОЗДІЛ 4.

### РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ СИСТЕМИ

#### 4.1 Обґрунтування елементної бази для реалізації генераторного блоку

Мікросхема МАХ038 є генератором високої частоти, що дозволяє згенерувати різноманітні форми сигналу, в тому числі і необхідний нам синусоїдальний з мінімальною кількістю зовнішніх компонентів.

Вихідна частота може регулюватися в діапазоні частот від 0,1 Гц до 20 МГц за допомогою зовнішнього резистора і конденсатора.

Генератор має 4 виходи:

- безпосередній вихід з амплітудою сигналу 1V;
- вихід, що має розв'язку по постійному струму, з плавним регулюванням амплітуди до  $\pm 2V$  і з можливістю її ступеневої ослаблення в 10 разів;
- імпульсний вихід з логічними рівнями від 0V до 5V;
- імпульсний вихід з фіксованою частотою 3,2768 МГц і логічними рівнями від 0V до 5V.

МК в поєднанні з функціями вибору діапазону частоти і форми сигналу генератора використовується також як частотомір, комутований перемикачем для контролю частоти сигналу, що генерується МАХ038, або сигналу від зовнішніх джерел. Передбачені два зовнішніх входу: один - для імпульсних сигналів з логічними рівнями від 0V до 5V, інший - універсальний для сигналів змінного струму, який завдяки використанню додаткового підсилювача-формувача має чутливість порядку 0,2V.

У складі пристрою мікросхема МАХ038 працює під управлінням МК з 4 портами введення-виведення, що забезпечує автоматизоване перемикання конденсаторів частотних діапазонів, вибір форми сигналу, коефіцієнта ослаблення вихідного дільника, а також виконує функції частотоміра і виведення на РК-дисплей.

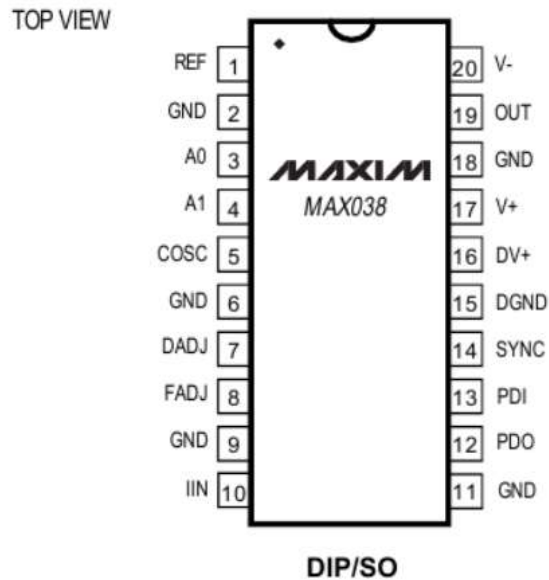


Рис. 4.1 Зовнішній вид схеми генератора в DIP-корпусі

Щодо вибору форми і виду сигналу: пристрій підтримує роздільну вибір однієї з трьох форм сигналу: синусоїдальний, трикутний і прямокутний. Вибір здійснюється відповідно до двійковим кодом, що подається на входи A1 і A0 мікросхеми MAX038. Код формується МК через відповідні висновки PA0, PB1 наступним чином:

- A1 A0 Форма
- 0 0 Прямокутний
- 0 1 Трикутний
- 1 x Синусоїдальний

## 4.2 Обґрунтування елементної бази системи попереднього опрацювання сигналу

### 4.2.1. Обґрунтування елементної бази для реалізації перетворення напруга-струм

Щоб генерувати точну величину струму в ланцюзі сигналу доцільно використовувати підсилювач, призначений для генерації струму до заданого значення. Такий підсилювач виконує функцію джерела струму і є рішенням поставленого завдання.



Для рішення даної задачі обрано AD8531. Сімейство AD853 відрізняється високою стабільністю. Може працювати в зонах підвищеної температури (від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $85^{\circ}\text{C}$ ). Для живлення необхідна напруга  $+7\text{В}$ . Диференціальна вхідна напруга  $\pm 6\text{В}$

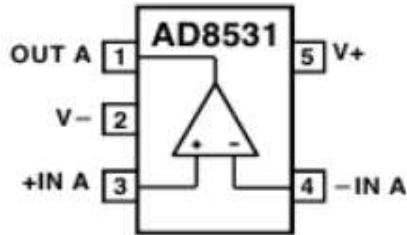


Рис. 4.2 Конфігурація пінів мікросхеми AD8531

Недоліком є те що пристрій чутливий до статичних зарядів. Електростатичні заряди такі як  $4000\text{ V}$  легко накопичуються на тілі людини і контрольно-вимірювальної апаратури. Захист необхідно забезпечити, щоб уникнути зниження продуктивності та втрати функціональності елемента.

#### 4.2.2 Обґрунтування елементної бази для реалізації вимірювального підсилення

Вимірювальний підсилювач – вимірювальний пристрій, призначений для формування на своєму виході сигналу, що функціонально зв'язаний із сигналом вимірюваної інформації на вході[3] у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та збереження.

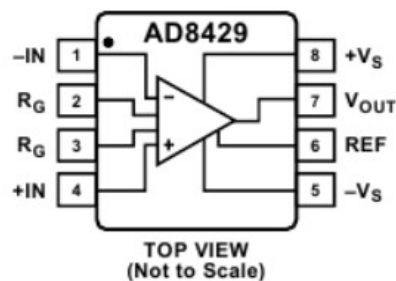


Рис. 4.3 Конфігурація розташування пінів AD8429.

Коефіцієнт підсилення встановлюється за допомогою одного резистора ( $G = 1$  до 10000) Температурний діапазон роботи від  $-40^\circ\text{C}$  до  $+125^\circ\text{C}$ .

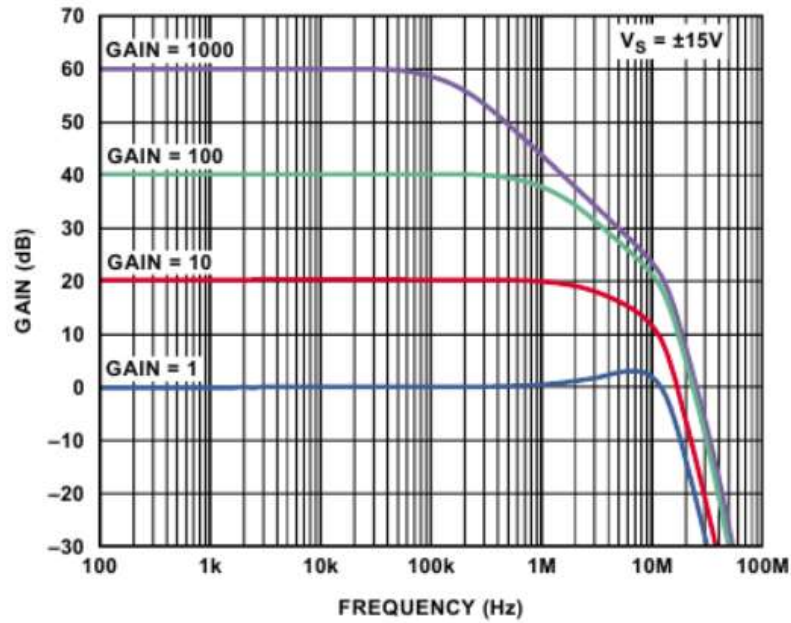


Рис. 4.4 Графік залежності коефіцієнта підсилення від частоти

Включення опору  $R_G$  між відповідними виводами задає коефіцієнт підсилення AD8429, який можна вибрати з таблиці 1 або скористатися наступною формулою:

$$R_G = \frac{6000}{G-1} \dots \dots \dots (4.1)$$

де  $G$  – коефіцієнт підсилення.

$$R_G = \frac{6000}{G-1} = \frac{6000}{500-1} = \frac{6000}{499} \approx 12 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.1 - Таблиця розрахованих опорів для забезпечення необхідного коефіцієнта підсилення

1% Standard Table Value of $R_G$	Calculated Gain
6.04 k $\Omega$	1.993
1.5 k $\Omega$	5.000
665 $\Omega$	10.02
316 $\Omega$	19.99
121 $\Omega$	50.59
60.4 $\Omega$	100.3
30.1 $\Omega$	200.3
12.1 $\Omega$	496.9
6.04 $\Omega$	994.4
3.01 $\Omega$	1994

### 4.3 Обґрунтування вибору АЦП

Для виконання аналого-цифрових перетворень використано AD7616.

Для того, щоб обрати підходящий АЦП необхідно провести розрахунки. Виходимо з умови, що систематичної складової похибки перетворення сигналів неруйнівного контролю немає, а зведена похибка перетворення дорівнює відношенню граничної значення похибки до номінального значення напруги і перераховано у відсотки:

$$\gamma_z = \frac{\delta U}{U_n} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

де  $\delta U$  – граничне значення похибки перетворення;

$U_n$  – номінальне значення напруги.

Припускаємо, що систематична складова похибки вимірювання відсутня, а випадкова складова розподілена за нормальним законом із середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$ . Тоді можна зробити висновок, що з вірогідністю 0.997 значення випадкової похибки лежить у межах інтервалу  $(-3\sigma; 3\sigma)$ . На цій основі приймемо рішення, що :

$$\delta U = \frac{\gamma_z \cdot U_n}{100} = 3\sigma, \quad (4.3)$$

Отже значення середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma = \frac{\gamma_z \cdot U_n}{300}, \quad (4.4)$$

Операція квантування, супроводжується виникненням додаткової випадкової похибки квантування із середньоквадратичним значенням, що описується прямою залежністю:

$$\sigma_k = \frac{\Delta U_k}{2\sqrt{3}}, \quad (4.5)$$

де  $\Delta U_k = \frac{U_n}{m}$  – ступінь квантування;  $m$  – число степенів квантування.

Виходячи з умови рівності середнього квадратичного значення похибки квантування та перетворення, значення кількості двійкових розрядів АЦП визначатиметься як

$$m = \left[ \log_2 \frac{50 \cdot \sqrt{3}}{\gamma_n} \right]^* = \left[ \log_2 \frac{U_n \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \delta U} \right]^*, \quad (4.6)$$

де  $\lceil \cdot \rceil^*$  – позначення операції заокруглення до найбільшого цілого числа.

Виконаємо розрахунок:

$$m = \left\lceil \log_2 \frac{50 \cdot \sqrt{3}}{\gamma_H} \right\rceil^* = \left\lceil \log_2 \frac{50 \cdot \sqrt{3}}{0.01} \right\rceil^* = \lceil \log_2(8660.254) \rceil^* = \lceil 13.08 \rceil^* \\ = 14 \text{ (двійкових розрядів)}$$

Визначивши  $m$  можна підібрати тип АЦП та визначити за довідковими даними його основні характеристики, в тому числі і максимальне значення вхідної напруги  $U_m$ .

AD7616 є 16-бітним АЦП, який підтримує одночасну вибірку з 16 каналів. AD7616 працює від однополярного 5 В джерела живлення і може оцифровувати  $\pm 10$  В,  $\pm 5$  В і  $\pm 2,5$  В істинного біполярного сигналу та має пропускну здатність до 1 MSPS на канал з 90,5 дБ SNR. Схема захисту може витримувати перепади напруги до  $\pm 21$  В.

AD7616 має 1 МОм опору аналогового вхідного імпедансу, незалежно від частоти дискретизації.

#### 4.4 Висновки

1) Запропоновано схеми основних функціональних вузлів необхідних для реалізації автоматизованої системи вихрострумовеого контролю. Представлено такі вузли: генераторний блок, система попереднього опрацювання сигналу, АЦП.

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

## РОЗДІЛ 5

### АНАЛІЗ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЮ ТЕПЛООБМІННИХ ТРУБОК

#### 5.1 Теоретичні засади розрахунку вірогідності контролю

При контролі у об'єкту може бути два і більше стани, які можна розрізнити. Контроль зазвичай виконується автоматично за допомогою засобів контролю. На дійсний стан об'єкту впливають різноманітні випадкові фактори. Тому факт знаходження ОК в одному з станів є випадковою подією і тому непередбачуваною. Подія – безпомилкове виявлення засобами контролю дійсного стану об'єкту, через неідеальність засобів контролю, теж є випадковою. Тому контроль характеризується насамперед ймовірнісними характеристиками, основною з яких є достовірність контролю.

Достовірність контролю відображає ступінь об'єктивності результатів контролю, тобто рішення і є основною характеристикою контролю. Ця характеристика відображає ступінь довіри до отриманих результатів. Достовірність контролю характеризується помилками контролю, які є випадковими подіями. Помилки контролю залежать від багатьох факторів : похибки засобів контролю, розмір допусків контролю і ряду інших.[18]

Розглянемо процедуру контролю параметра  $X$ , який представляє собою неперервну випадкову величину з густиною розподілу  $p(x)$ . Контрольований параметр  $X$  даного об'єкта може знаходитись в одному з двох станів:  $H_1$  параметр в допуску,  $H_2$  параметр поза допуском. Априорні ймовірності подій  $P_0(H_1)$  та  $P_0(H_2)$ :

$$P_0(H_1) = \int_{x_H}^{x_G} p(x) dx \quad (5.1)$$

$$P_0(H_2) = \int_{-\infty}^{x_H} p(x) dx + \int_{x_G}^{\infty} p(x) dx = 1 - P_0(H_1) \quad (5.2)$$

Похибка засобів контролю представляє собою також неперервну випадкову величину з відомою густиною  $\rho(\Delta')$ . В приладі цифрового контролю результат вимірів має похибку:

$$x_N = X + \Delta' \quad (5.3)$$

Після порівняння оцінки  $x_N$  з контрольованими числовими допусками  $x_{hN}$  та  $x_{\epsilon N}$ , які утворюють контрольне поле допуску, формується рішення «в допуску» або «поза ним». Наявність похибок є причиною появи неправильних рішень, в результаті яких частина виробів, що фактично знаходяться в допуску бракується і в той же час частина бракованих виробів визнається годними. В загальному випадку при контролі можна виявити одне з чотирьох несумісних випадкових подій:

1)  $H_1, H_1^k$  – істинне значення параметру в межах допуску  $x_{\epsilon} \dots x_h$ , вимірне значення також в межах контрольного допуску  $X_{\epsilon N} \dots X_{hN}$ , приймається правильне рішення «в допуску»

$$x_h < X < x_{\epsilon}; \quad x_{hN} < x_N < x_{\epsilon N} \quad (5.4)$$

2)  $H_1, H_2^k$  – істинне значення параметру в межах допуску, а вимірне значення – за його межами, приймається неправильне рішення «поза допуском»

$$x_h < X < x_{\epsilon}; \quad x_N < x_{hN} \text{ або } x_N > x_{\epsilon N} \quad (5.5)$$

3)  $H_2, H_1^k$  – істинне значення параметра за межами допуску, а вимірне – в межах допуску, приймається неправильне рішення «поза допуском»

$$X < x_h \text{ або } X > x_{\epsilon}; \quad x_{hN} < x_N < x_{\epsilon N} \quad (5.6)$$

4)  $H_2, H_2^k$  – істинне значення параметру за межами допуску, приймається правильне рішення «поза допуском»

$$x_h > X > x_{\epsilon}; \quad x_N < x_{hN} \text{ або } x_N > x_{\epsilon N} \quad (5.7)$$

Сумісним імовірностям перерахованих випадкових подій прийнято присвоювати такі позначення:

$\gamma = P(H_1, H^k)$  – імовірність правильності рішень «в допуску»;

$\alpha = P(H_1, H_2^k)$  – ризик виробника, імовірність неправильності рішення «поза допуском»;

$\beta = P(H_2, H_1^k)$  – ризик замовника, ймовірність неправильності рішення «в допуску»;

$\delta = P(H_2, H_2^k)$  – імовірність неправильності рішення «поза допуском».

Такий підхід до аналізу достовірності, прийнятих при контролі досліджень, було вперше запропоновано Н.А. Бородачевим.

Для розрахунку  $\alpha$  і  $\beta$  можна використовувати наближені формули. Зокрема для випадку симетричного допуску при

$$r = \frac{d}{\sigma(X)}; \quad \rho = \frac{\sigma(\Delta')}{\sigma(X)} \quad (5.8)$$

$$\alpha = \frac{0,3\rho(1+r\rho)}{1+0,6\rho(\rho-0,1)\sqrt{r}(1,9-r)} e^{-\frac{r^2}{2}} \quad (5.9)$$

$$\beta = \frac{0,3\rho(1-0,1\frac{\rho}{r})}{1+0,8r\rho} e^{-\frac{r^2}{2}} \quad (5.10)$$

Для  $r$ , рівного 1...3,5 та  $\rho$ , рівного 0,002...0,5, похибка розрахунку за цими формулами не перевищує 5%.

## 5.2 Приклад розрахунку вірогідності контролю трубок ПГ на наявність дефектів типу тріщина

Для виявлення ризику виробника(фальшивої відмови) і ризику замовника(невиявленої відмови) для симетричного допуску при відсутності систематичних похибок вимірювання необхідно використовувати монограми(рис.4.1).

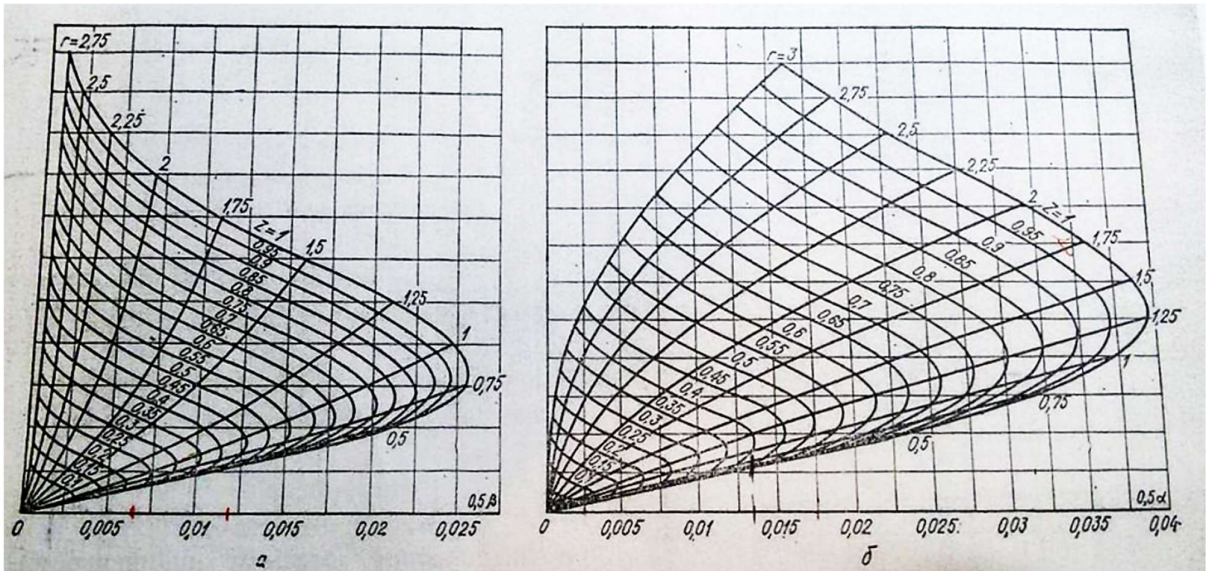


Рис. 5.1. Монограми для визначення: а – ризику замовника  $\beta$  ; б – ризику виробника  $\alpha$  при нормальному розподіленні центрованої випадкової похибки і симетричному полі допуску

Позначим поле допуску на параметр

$$2d = x_g - x_n \quad (5.11)$$

При побудові монограм використовувались нормовані величини

$$r = \frac{d}{\sigma(X)} \text{ та } z = \frac{3\sigma(\Delta')}{d} \quad (5.12)$$

Тож визначимо похибку вимірювання розміру тріщини, для якої забезпечується похибка контролю  $\alpha = \beta = 0,025$ . Тоді відповідно до формули 5.11

$$2d = 0,07 - 0,03$$

$$d = 0,02$$

Виходячи з умови  $\sigma(x) = 0,02$ , та формул 4.12:

$$r = \frac{0,02}{0,02} = 1$$

$$\sigma(\Delta') = \frac{0,02 \cdot 1}{3} = 0,01$$

При роботі необхідно підбирати об'єм вибірки для усереднення з врахуванням  $\sigma_1$  одного виміру

$$\sigma(\Delta') = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}} \quad (5.13)$$



де  $n$  – кількість вимірів.

## 5.2 Висновки

1) Контроль вірогідності є результатом дослідження ймовірнісних подій проведеної за допомогою процедури певного параметру.

2) Наведено монограми для виявлення ризику виробника(фальшивої відмови) і ризику замовника(невиявленої відмови) та відповідні формули для їх визначення.

3) Виходячи з наведених пропозицій з реалізації системи можна розробити стартап-проект, з представленням актуальності, очікуваної вартості та конкурентної спроможності системи на ринку.

## РОЗДІЛ 6.

### РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВИХРЬ-Т»

Метою даного розділу є проведення маркетингового аналізу стартап-проекту для визначення можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. [20]

Ідея проекту полягає в тому, щоб забезпечити максимально автоматизований спосіб контролю деталей із складною геометрією поверхні, при цьому точність системи відповідала вимогам, а також прискорення процесу вихрострумowego неруйнівного контролю із збереженням результатів контролю в електронному вигляді.

#### 6.1 Опис ідеї проекту

Табл. 6.1- Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Автоматизована система вихрострумowego контролю теплообмінних трубок парогенератора, де комбінується амплітудний і фазовий метод виявлення(з використанням перетворення Гільберта та аналізу за допомогою R-статистики)	1. Контроль на АЕС	1.Точність контролю
	2. Наукові досліді по якості контролю	2. Відсутність необхідності післяексплуатаційного очищення.
	3. Підприємства і організації обслуговуючі АЕС під час планового контролю	3.Можливе використання на різних пристроях (планшет, телефон, ПК)

Ця таблиця дає цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів. Основними напрямки застосування ідеї є використання у різних сферах промисловості, таких як автомобілебудування, літакобудування та ін. Основними вигодами користувача є зменшення часу на проведення неруйнівного контролю і виключення впливу людського фактору на результати контролю.

Далі проведемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів. Визначимо чим вона відрізняється від існуючих аналогів та замінників. Результати наведено у таблиці 6.2:

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

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Прилади оптичного контролю	Прилади теплового контролю)	Прилади ультразвукового контролю			
1.	Необхідність підготовки поверхні	+	+	+	+			+
2.	Швидкість отримання результатів ОК	Контроль проходить в два проходи – для визначення тріщини і товщини	Контроль проходить в один прохід	Контроль проходить в один прохід	Контроль проходить у два проходи по		+	
3.	Повнота даних необхідних для прийняття рішень	Повні дані (по товщині стінки і наявності дефектів )	Є тільки дані про поверхневі видимі дефекти	Є тільки дані про відносно великі дефекти	Повні дані (по товщині стінки і наявності дефектів)		+	
4.	Необхідність очистки поверхні після контролю	-	-	-	+			+
5.	Опрацювання результатів	Швидка , адаптивна	Швидка, неадаптивна	Швидка, неадаптивна	Швидка, неадаптивна			+
6.	Швидкість опрацювання результатів, однозначність результатів	Відносно швидка обробка	Відносно швидка обробка, неоднозначні результати	Відносно швидка обробка , неоднозначні результати	Відносно швидка обробка	+		

7.	Простота інтерпретації результатів	Легко інтерпретувати	Важко інтерпретувати	Важко інтерпретувати	Легко інтерпретувати			+
8.	Точність визначення результатів	Висока точність	Низька точність	Низька точність	Висока точність		+	
9.	Можливість роботи з ПК	+	+	+	+		+	

Висновок: у даній таблиці визначено перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї; визначено попереднє коло конкурентів, що вже існують на ринку, та визначено слабкі, нейтральні та сильні характеристики ідеї даного стартап-проекту. Однією із сильних сторін проекту є швидке адаптивне опрацювання результатів та легкість інтерпретації отриманих результатів.

## 6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

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

Таблиця 6.3.-Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Автоматизована система вихрострумового контролю теплообмінних трубок парогенератора, де комбінується амплітудний і фазовий метод виявлення(з використанням перетворення Гільберта та аналізу за допомогою R-статистики)	Друк на 3Д принтері, ручний збір	Наявна	Недоступна
		Лиття форм, ручний збір	Наявна	Доступна
2.		Друк на 3Д принтері, ручний збір		
3.		Лиття форм, ручний збір	Наявна	Недоступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: В якості оптимальної технології реалізації проекту обрано замовлення окремих компонентів та складових системи та збірка системи власноруч.				

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект необхідно збирати з готових блоків і мінімізувати шлях доставки замовлених деталей для автоматизованої системи.

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

В цьому підрозділі визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту. Цей аналіз дозволить нам спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. В таблиці 6.4. проведено аналіз попиту: наявність попиту, обсяг та динаміка розвитку ринку.

Табл. 6.4.- Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1600000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає, потребує якіснішого обладнання
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Для участі на міжнародному ринку необхідно пройти сертифікацію.
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	12%

Отже, за результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

У таблиці 6.5 визначимо потенційні групи клієнтів та їх характеристики, після чого сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної з груп клієнтів.

Табл. 6.5. - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</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.	Необхідність якісного обладнання для контролю для забезпечення безаварійної роботи АЕС	АЕС, органи забезпечуючі контролю для теплообмінників, науковці.	Однакова ціль і потреба . Різні об'єми закупок , пов'язані з різним використанням і обсягами використання в подальшому	Вимоги по якості контролю і довговічності роботи приладу, можливість безперебійної роботи – 8 годин. Можливість використання на різних пристроях (планшет, телефон, ПК)

Висновок: в даній таблиці ми визначили цільову аудиторію та її основні вимоги до товару даного виду, визначили основні характеристики системи, які формують поведінку клієнтів відносно нашої системи, та визначили основні вимоги до системи. При застосуванні даної технології існують певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також налаштування та встановлення таких систем повинні здійснювати висококваліфіковані фахівці. Також, повинно своєчасне технічне обслуговування даного продукту. Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища. Складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 6.6).

Табл. 6.6. - Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Поява конкурентів	Зниження рівню продажів, втрата клієнтів, втрата лідерства на ринку.	Поліпшення якості продукту, встановлення конкурентна спроможних цін.
2	Погіршення економічної ситуації	Зменшення купівельної спроможності	Скоротити працівників, вихід на міжнародні ринки
3	Зміна вимог по контролю АЕС	Необхідність додаткових витрат по оцінці підходящої системи вимогам і її переробці, збитковість за рахунок неможливості реалізації за запланований кошт вже зроблених приладів	Оцінити наскільки задовольняє поточним вимогам ринку і чи перекиватиме вимоги на найближчі роки
4	Більш жорсткі вимоги по сертифікації для роботи на міжнародному ринку	Зменшення продажів в результаті чого, втрата прибутку, за час поки буде пройдено ресертифікацію.	Слідкувати за появою необхідності сертифікації, щоб уникнути простою
5	Бар'єри при виході на ринок	Не вистачає людських, фінансових, технічних ресурсів	Набрати персонал; отримання фінансової підтримки від держави для виходу на ринок; забезпечення підприємства необхідним обладнанням(виграти тендер для залучення додаткових фінансових вливань)

Табл. 6.7.- Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Відсутність конкурентів	Можливість стати єдиним лідером на ринку мультимедійних електронних видань.	Встановити свої правила на ринку збуту.
2	Більш жорсткі вимоги до контролю трубок парогенераторі	Виведення з експлуатації строго обладнання та обладнання, що не може забезпечити необхідний рівень контролю	Збільшення кількості одиниць для виготовлення,
3	Вихід на міжнародні ринки	Розширення клієнтської бази, значне збільшення замовлень	Збільшення цін, технологічна модернізація, розширення підприємства.

4	Визнання цього обладнання як критично важливого для збереження екологічного стану від можливого впливу радіологічного зараження	Отримання державної підтримки, збільшення попиту.	Збільшення ціни, розширення контенту, покращення якості товару.
5	Відсутність конкурентів	Можливість стати єдиним лідером на ринку мультимедійних електронних видань.	Встановити свої правила на ринку збуту.

В таблицях 6.6 та 6.7 наведено основні фактори що загрожують та сприяють ринковому впровадженні даного проекту. В таблиці 4.8 проводиться аналіз пропозиції, тобто визначаються загальні риси конкуренції на ринку.

Табл. 6.8.- Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Чиста конкуренція	Конкуренція на ринку з багатьма продавцями та покупцями тотожного, взаємозамінного товару, коли жоден із продавців чи покупців не здатний відчутно вплинути на ціну чи обсяги продажу	Встановлення конкурентно спроможної ціни, поліпшення якості.
2. Національна конкуренція	Основними конкурентами компанії являються вітчизняні виробники	Відкриття регіональних представництв, або налагодження процесу так щоб довірена людина компанії відповідала за те щоб доставка і впровадження застосування обладнання реалізовувалося в встановлені строки
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Це боротьба між товаровиробниками, що діють в одній галузі ринку	Необхідно зосередити зусилля на пошуку конкурентних переваг, які дозволять компанії займати стійкі конкурентні позиції



		на ринку
4. Товарно - видова	Конкуренція між товарами одного виду	Поліпшення якості контролю, зручності використання, простоти, швидкості роботи (в подальшому буде менше оплачено годин роботи працівнику для проведення контролю ), встановлення конкурентноспроможної ціни
5. Не цінова	Конкуренція, здійснювана через підвищення якості товарів, їх надійності, збільшення термінів служби, підвищення продуктивності, поліпшення умов реалізації за незмінних цін	Підвищення якості, спрощення роботи з системою.
6. Не марочна	Роль торгової марки незначна	Підвищення стабільності роботи за різних ситуацій(удари і т.д.), підвищення точності отримуваних даних.

Отже, відповідно до наведеного вище аналізу головними силами, які діють на конкуренцію в галузі є постачальники та споживачі. Також в силу розвитку ринку все більшого значення набуває інтенсивність конкуренції між існуючими конкурентами та загроза зі сторони товарів-субститутів.

Після аналізу конкуренції в таблиці 6.9 проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера.

Табл. 6.9. - 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>
<i>Складові аналізу</i>	Ультракон, ДП-Тест, Меридіан	Зменшення попиту, Зменшення купівельної спроможності,	Концентрація постачальників, Змінні витрати постачальників, Постачальники мають прямий вплив на якість продукції та на можливий обсяг її виробництва;	Рівень чутливості до змін цін, Купівельна спроможність, Продуктова диференціація, Розмір закупівель	Ціна, Схильність клієнтів до купівлі товарів-замінників,
Висновки:	Основними засобами конкурентної боротьби є збільшення реклами серед зацікавленого сегменту, зниження цін, модернізація обладнання	Є можливість входу на ринок, є потенційні конкуренти, строки виходу їх на ринок приблизно 1 рік.	Постачальники можуть підняти ціни або відмовитись працювати з компанією	Клієнти мають свою купівельну спроможність, яка і визначає попит продукції на ринку.	Наявність продуктів-замінників, постійне спостереження за розвитком товарів-замінників на ринку.

Висновок: за результатами аналізу даних таблиць можна зробити висновок, що в даний момент з огляду на конкурентну ситуацію щоб вийти на ринок та бути конкурентоспроможним проект повинен не поступатись в якості витратомірам більш відомих компаній, але в той же час повинен пропонуватися за дещо нижчою ціною ніж в конкурентів.

В таблиці 6.10 наведемо фактори конкурентоспроможності, які засновані на аналізі конкуренції, який проведений в табл. 6.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 6.2), вимог споживачів до товару (табл. 6.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 6.6-6.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності.

Табл.6.10.- Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Частка ринку	Інтенсивність конкуренції між діючими конкурентами при низьких темпах зростання ринку є однією з головних сил, які діють на конкуренцію в галузі, одним з найважливіших факторів конкурентоспроможності виступає частка ринку, яку займає виробник. В таких умовах чим більша частка ринку, тим більшими ринковими можливостями володіє виробник.
2	Ціна	Споживач має високу цінову чутливість, тому ціна на товар є одним з засобів ведення конкурентної боротьби. Чим вигіднішою є ціна для споживача, тим вірогіднішим є його вибір
3	Асортимент	В умовах збільшення інтенсивності між існуючими конкурентами завоювання споживачів відбувається за рахунок нової тематики, урізноманітнення контенту.
4	Репутація виробника	Якщо компанія має бездоганну репутацію, особливо у сфері якості своєї продукції, то рівень довіри до неї зростає. Також репутація виробника важлива при виході на ринок з новими товарами, або при виході на нові сегменти, що полегшує позитивне сприйняття новинок.
5	Реклама	Здебільшого споживач приймає рішення про купівлю товару безпосередньо після того як дізнається детальну інформацію про товар або після купівлі товару цієї ж фірми. Для компаній-виробників ключовими чинниками успіху є наявність ефективної реклами, сильна дистрибуція, якісний торговий маркетинг і технічна підтримка.
6	Технологічна модернізація	Оновлення обладнання та технології виготовлення продукту дозволяє створювати більш якісне обладнання та покращувати технічну приладів, що тягне за собою збільшення кількості клієнтів та розширення частки ринку

Отже, в таблиці 6.10 ми визначили основні фактори конкурентоспроможності, за допомогою яких проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Табл. 6.11.-Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «ВИХРЬ-Т»

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ...						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Частка ринку	7			•				
2	Ціна	9				•			
3	Асортимент	9				•			
4	Репутація виробника	12					•		
5	Реклама	10					•		
6	Технологічна модернізація	6		•					
7	Інноваційний характер виробництва	16						•	

З таблиць 6.10 та 6.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності є досить хорошими. Основною перевагою та головним досягненням є виконання контролю витрат палива в трубках малого діаметру, висока якість продукту та сервісне обслуговування протягом всього терміну його використання споживачем.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що наведені в таблиці 6.12, на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін, що наведені в таблиці 6.11.

Табл. 6.12.-SWOT- аналіз стартап-проекту

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

Табл.6.13. - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Впровадження в технологію планового контролю на державному рівні	Досить мала ймовірність	1 рік
2	Продаж в інтернет-магазинах	95%	5 місяців
3	Створення потужної рекламної кампанії	70%	2 місяці
4	Підвищення кваліфікації працівників та впровадження найбільш сучасного програмного забезпечення	70%	Постійно
5	Розширення асортименту продукції.	80%	1 рік
6	Залучення інвесторів.	80 %	6 місяців

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

#### 6.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

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

Табл. 6.14.-Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	АЕС	Середня	75 %	Середня	Помірна
2	Служби обслуговування АЕС	Середня	80 %	Середня	Помірна
3	Зовнішні служби для проведення контролю	Висока	90 %	Середня	Помірна
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати із зовнішніми службами проведення контролю.					

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

Табл. 6.15. - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Удосконалення даного проекту	Диференційований маркетинг	Якість, точність виміру, ціна	Диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 6.16).

Табл. 6.16.- Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Буде шукати нових та забирати вже існуючих	Ні	Стратегія виклику лідера. Флангова атака

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

Табл. 6.17.- Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Ціна, Простота використання, Точність, Надійність	На основі специфічних відчутних характеристик	Ціна, точність виміру, якість приладу	Позиціонування «Ціна-якість» Позиціонування на високій точності приладу Сервісне обслуговування

### 6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

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

Таблиця 6.18.- Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Висока точність вимірювання	Похибка вимірювання становить тільки 0.5%	Використання кращого по якості та характеристиках вихрострумове перетворювача.
2	Низька ціна	Пропонування товару за дещо нижчою ціною ніж в конкурентів	Збільшення кількості клієнтів за рахунок ціни та якості продукції
3	Якість	Довший термін роботи приладу	Постійне якісне обслуговування приладу

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

Таблиця 6.19.- Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Автоматизована система вихрострумовеого контролю		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Довговічність (немає строку давності)	М	Тл
	2. Точність вимірювання	Нм	Тх
	3. Збереження результатів контролю	Нм	Тх
	4. Керування в інтерактивному режимі	Нм	Тх
	5. Можливість передачі даних в режимі онлайн	Нм	Тх
Якість: відповідає нормам ДСТУ2499:2017			
Пакування: спеціальний контейнер			
Марка: "ВИХРЬ-Т"			
III. Товар із підкріпленням	До продажу включається		
	Після продажу включається		

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

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

Таблиця 6.20.- Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	15000 грн.	11000 грн	35000 – 40000 грн	11000 – 15000 грн

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



Таблиця 6.21.- Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Продаж в роздріб Посилкова торгівля Продаж через інтернет сайти	Безпосередній продаж товару клієнту, оформлення та відправлення замовлення, Установка та налаштування системи	Висока	Оптовий продаж продукції

Отже, із наведеної вище таблиці можна зробити висновок, що оптимальною системою збуту є продаж та установка системи великими партіями. Основні шляхи збуту – це продаж через мережу інтернет.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 6.22).

Таблиця 6.22. - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Спостереження за новинками на ринку. Замовлення товарів онлайн.	Публікації Інтернет Виставки	Ефективність, ціна, простота використання, точність	Донести переваги даної продукції	

## 6.2 Висновки

Аналіз стартап-проекту показав можливість ринкової комерціалізації проекту. Це обумовлено високим попитом на більш точні автоматизовані системи неруйнівного контролю труб. Також в ході аналізу було підтверджено рентабельність проекту. Незважаючи на наявну конкуренцію помірного рівня, ринок надає можливості впровадження продукту в обіг з огляду наявності цільової аудиторії, яка зацікавиться даним продуктом.

Продукт здатен подолати бар'єри входження в ринок, такі як необхідність сертифікації обладнання перед випуском її в вільний продаж та набір клієнтської бази. Також треба пам'ятати, що на ринку вже присутні аналоги продукту, який розробляється. Тому для успішного виходу на ринок треба надати продукту властивостей, які будуть виділяти його серед конкурентів. На даний момент продукт є конкурентоспроможним, але для підвищення довіри споживачів і формування своєї бази клієнтів необхідно:

1. Вдосконалити конструкцію та технологію виробництва системи .
2. Провести рекламну компанію серед .
3. Працювати над покращенням продукту і прислуховуватись до потреб споживачів.
4. Розробити мережу таким чином щоб питання постачання обладнання вирішувалось швидко і мобільно (в перспективі перевагою також буде наявність реалізації сервісного ремонту).

## ВИСНОВКИ

В роботі розроблено систему вихрострумовеого контролю теплообмінних труб парогенератора АЕС горизонтального типу.

Проведено аналіз найнебезпечніших дефектів, основними з яких є тріщина на внутрішній поверхні трубки та стоншення стінки трубки. Обґрунтовано використання внутрішнього накладного трансформаторного ВСП для виявлення дефектів заданих типів.

Відмічено, що важливим параметром для оцінювання можливості подальшої експлуатації трубок є не тільки тріщина в стінці трубки, але й товщина самої стінки. Для її контролю використовується той самий датчик, контроль відбувається під час зворотного ходу датчика з трубки з незначною зміною режиму контролю. Тож адаптація до завдання контролю реалізується шляхом вибору відповідного режиму.

Через специфічність форми та важкі умови доступу до ОК запропоновано використання режиму поздовжнього і кругового переміщення ВСП відносно ОК з кроком, який регулюється вибором співвідношення частоти обертання ротора до швидкості переміщення зонда вздовж труби. Для забезпечення безконтактної передачі інформаційних сигналів з ВСП до електронного блоку опрацювання сигналів обґрунтовано використання обертальних трансформаторів.

Розроблено функціональну схему та алгоритм роботи системи, що включає такі основні модулі: блок генерування сигналів, блок первинного опрацювання сигналів, блок механічного сканування поверхні ОК, АЦП та ПК з оригінальним програмним забезпеченням. Виконано оцінювання вірогідності контролю, сформульовано загальні вимоги до точності вимірювання інформативних параметрів з умови забезпечення вірогідності контролю на рівні 0,95.

Вибір методу опрацювання (амплітудний, фазовий, метод проєкцій) сигналів ВСК реалізується програмним шляхом. Виконано моделювання окремих елементів програмного забезпечення.

Загальна структура системи вихрострумової дефектоскопії допускає можливість адаптації до різних завдань, типів ОК, та умов контролю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герасимов В. Г., Неразрушающий контроль/ В.Г.Герасимов, Покровский А.Д., Сухороков В. В.; Под редакцией Сухорукова В.В. -М.: Высш. шк., 1992.- 321с.– ISBN 5-06-002039-8.

2. Ефимов А. В., Конструкции, материалы, процессы и расчеты реакторов и парогенераторов АЭС / А. В. Ефимов, Н. Н. Пелипенко. – Х.: Підручник НТУ «ХП», 2010. – 307 с. – ISBN 978-966-2426-00-7.

3. ДСТУ 2681-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення

4. Сапожников А.Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. Томск: ТГУ, 1980-308

5. Герасимов В. Г., Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий /Герасимов В. Г., Клюев В.В, Шатерников В.Е. . М.: Энергоатомиздат, 1983.-272с.

6. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия/ Дорофеев А.Л. Казамапов Ю.Г.-М.:Машиностроение, 1980.- 232с

8. Неклюдов И. М ., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Гоженко С.В. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южноукраинской АЭС // Сб. науч. трудов СНИЯЭ и П. - 2003. - Вып. 8.- С. 55 - 63.

9. Неклюдов И.М ., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Гоженко С.В. Исследование причин образования коррозионных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов // Там же. - С. 50 - 55.

10. Неклюдов И.М ., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Гоженко С.В. Коррозионные повреждения металла во втором контуре энергоблоков реакторов ВВЭР-1000 // Сб. науч. трудов СНИЯЭ и П. - 2004. - Вып. 10. С. 72 - 79.

11. Неклюдов И. М ., Ажажа В. М., Ожигов Л. С. и др. Особенности эксплуатационных повреждений трубчатки парогенераторов ПГВ-1000 и разработка атласа дефектов // Там же. - 2005. - Вып. 15. - С. 160 - 169.

12. Федосеев А. Е., Буланова Т. М., Гончаренко Ю. Д. Исследование характера повреждения теплообменных труб 2-го блока Балаковской АЭС // Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства. - Димитровград, 1998. - С. 38- 42.

13. Дожи М., Освальд Ф., Такаш Г. Анализ поврежденных теплообменных труб парогенераторов на АЭС Пакш. - М.: ЭНИЦ ВНИИФЭС, 2001. - С. 106 - 116.

14. Паршин А. М., Тихонов А. Н. Коррозия металлов в ядерном энерго-машиностроении. - М.; СПб.: Политехника, 1994. - 96 с.

15. Богоявленский В. Л. Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 165 с.

16. Седенков А. М., Давиденко Н. М., Змий В. И. Коррозионно-электро-химическое поведение стали 06X18H10T с комбинированными силицидными покрытиями в соляно-сернокислых средах // Защита металлов. - 1989. - 25, № 1. - С. 114 - 117.

17. В. М. Учанін. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання. – Львів : СПОЛОМ, 2013. – 268 с.

18. Куц Ю. В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернопіль: Вид-во Тернопіль. технічного ун-ту імені Івана Пулюя, 2009. – 383с.

19. Куц Ю. В. Проектування засобів електромагнітного неруйнівного контролю / Ю.В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.Г. Протасов // зб. доповідей наук.-техн. конфер. з міжнар.уч. «НК в контексті асоційованого членства України в ЄС – NDT-UA 2017» / Люблін, Польща: УТ НКТД, – 2017 – №1, – С. 43-49.