

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту  
ступінь вищої освіти магістр

галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

на тему Дослідження та принципи побудови магнітних систем  
вимірвальних пристроїв електромагнітної дефектоскопії

Виконав: студент групи МВТ-22дм  
Давиденко О.І.  
(прізвище, та ініціали)

  
(підпис)

Керівник доц. Романченко Ю.А.  
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри доц. Руднев Є. С.  
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Рецензент доц. Шумакова Т.О.  
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Київ 2023 р.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерії

Кафедра Електричної інженерії

Ступінь вищої освіти магістр

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

(шифр і назва)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕІ**

доц. Руднев Є. С.

“   ”     2023 року

## **З А В Д А Н Н Я**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Давиденку Олексію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Дослідження та принципи побудови магнітних систем вимірювальних пристроїв електромагнітної дефектоскопії

керівник проекту доц. Романченко Ю.А.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 23.10.2023 року № 564/15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 08.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту Основне технічне устаткування. Загальні технічні вимоги розробки радіоелектронної апаратури. Характер розташування вимірюваних дефектів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів. Основні види неруйнівних методів контролю. Проблеми виявлення дефектів та характеристика методів неруйнівного контролю. Огляд пристроїв електромагнітної дефектоскопії. Класифікація пристроїв електромагнітної дефектоскопії. Характеристика вимірів електромагнітним (вихрострумовим) дефектоскопом.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Зовнішній вигляд розглянутих дефектоскопів. Годограф для накладного вихрострумового перетворювача. Різновиди ВС перетворювачів.

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1-4	доц. Романченко Ю.А.		

7. Дата видачі завдання 16.10.2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	20.10.23	
2	Загальна характеристика електромагнітного метода та пристроїв електромагнітної дефектоскопії	28.10.23	
3	Інформативні параметри вихрострумовеого контролю	03.11.23	
4	Принципи побудови та класифікація пристроїв електромагнітної дефектоскопії	10.11.23	
5	Особливості метрології при електромагнітній дефектоскопії	17.11.23	
6	Формування висновків за роботою	24.11.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	01.12.23	
8	Оформлення графічного матеріалу	08.12.23	

Студент


  
( підпис )

 Давиденко О.І.  
 (прізвище та ініціали)

Керівник проекту

( підпис )

 Романченко Ю.А.  
 (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 86 стор., 13 рис., 4 табл., 15 бібл. найм.

У магістерській роботі розглядаються прилади та системи електромагнітного неруйнівного контролю; принципи побудови та конструкції перетворювачів; особливості їх застосування та контрольованих параметрів (дефектів).

Проект включає наступні розділи: введення, проблеми виявлення дефектів та характеристики методів неруйнівного контролю, технічні характеристики електромагнітних дефектоскопів, огляд пристроїв електромагнітної дефектоскопії, класифікація пристроїв електромагнітної дефектоскопії, принципи побудови та класифікація конструкцій електромагнітних систем пристроїв дефектоскопії, принципи побудови структури пристроїв електромагнітної дефектоскопії.

**Ключові слова:** електромагнітний дефектоскоп, вихрострумний перетворювач, дефект, схема структурна, інформаційний сигнал, магнітне поле, індукція, напруженість, модуляція, котушка індуктивності, струм і напруга збудження, амплітуда та фаза сигналу, узагальнені параметри.

## ABSTRACT

The explanatory note contains 86 pages, 13 figures, 4 table, 15 bibliography hiring.

The master's thesis examines devices and systems for electromagnetic non-destructive testing; principles of construction and design of converters; features of their application and controlled parameters (defects).

The project includes the following sections: introduction, problems of identifying defects and characteristics of non-destructive testing methods, technical characteristics of electromagnetic flaw detectors, review of electromagnetic flaw detection devices, classification of electromagnetic flaw detection devices, principles of construction and classification of designs of electromagnetic systems of flaw detection devices, principles of constructing the structure of eddy current devices, assessment of the technical level electromagnetic flaw detection devices.

**Keywords:** electromagnetic flaw detector, eddy current transducer, defect, structural diagram, information signal, magnetic field, induction, strength, modulation, inductor, excitation current and voltage, signal amplitude and phase, generalized parameters.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МЕТОДА ТА ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ .....	12
1.1 Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів .....	12
1.2 Основні види неруйнівних методів контролю (НМК).....	14
1.3 Проблеми виявлення дефектів та характеристика методів неруйнівного контролю.....	20
1.4 Технічні характеристики електромагнітних дефектоскопів.....	35
1.5 Огляд пристроїв електромагнітної дефектоскопії.....	37
2 ІНФОРМАТИВНІ ПАРАМЕТРИ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ .....	48
2.1 Параметри контролю .....	48
2.2 Методи виділення корисної інформації.....	50
2.3 Годографи на комплексній площині.....	51
3 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ .....	55
3.1 Класифікація пристроїв електромагнітної дефектоскопії .....	55
3.2 Принципи побудови пристроїв електромагнітної дефектоскопії ...	64
4 ОСОБЛИВОСТІ МЕТРОЛОГІЇ ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ .....	72

4.1	Загальна класифікація вимірів.....	72
4.2	Характеристика вимірів електромагнітним (вихрострумовим) дефектоскопом .....	77
	ВИСНОВКИ.....	84
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85

## ВСТУП

Розвиток технологій та засобів виробництва, тобто поліпшення таких їх техніко-експлуатаційних показників як точність, швидкість, надійність, економічність, довговічність, безпека та інших, а також використання сировинних та матеріальних ресурсів з вищими якісними показниками, в даний час не може відбуватися без участі такої галузі наукових знань як неруйнівний контроль, і відповідно без використання наявних технічних засобів неруйнівного контролю. Включений у ланцюг виробничого циклу випуску продукції, неруйнівний контроль перебуває у розвитку та зміні, за активної та ефективної взаємодії з іншими учасниками процесу. Таким чином, дотримуючись принципу "більше та краще" як у промисловості та в народному господарстві, так і в різних інших сферах, необхідним завданням є вдосконалення та розробка методів неруйнівного контролю, проектування, випуск та використання нових технічних засобів і систем неруйнівного контролю.

До цього часу відомі і використовуються безліч різних методів неруйнівного контролю, що базуються на різних фізичних процесах, наприклад, іонізуючі випромінювання, електричні і магнітні поля, світлові і теплові випромінювання, акустичні коливання тощо. Для кожного з методів неруйнівного контролю характерні і завдання, що вирішуються при його використанні. Іноді вони перетинаються, тобто вирішення однієї задачі можливе за допомогою двох або більше методів. Для методу крім принципу і явища характерні також об'єкт контролю та контрольовані параметри.

### **Актуальність роботи.**

За останні роки створено та успішно експлуатується велика кількість різноманітних приладів та систем неруйнівного вихрострумовеого контролю. Області використання вихрострумовеого контролю дуже великі. Так,



електромагнітний метод дозволяє вирішувати завдання дефектоскопії та структуроскопії матеріалів та об'єктів, товщинометрії, вимірювання лінійних та кутових переміщень, вимірювання та реєстрації вібрацій об'єктів. Наявність різних областей застосування та різних контрольованих параметрів обумовлено, перш за все, багатопараметровістю методу, однак основні принципи взаємодії перетворювача з об'єктом контролю, способи отримання інформації про параметри об'єкта є загальними або однаковими. Тому первинні перетворювачі, що реалізуються в них, мають схожі конструкції, способи побудови і функціонування, але при цьому існують свої особливості кожної з областей застосування, які вимагають самостійного вивчення. Наявність різноманітних сфер застосування електромагнітного методу, велика кількість різноманітних об'єктів контролю, а також те, що область електромагнітного неруйнівного контролю продовжує розвиватися, доводить, що цей вид контролю є дуже перспективною областю та має потенційні можливості вдосконалення, поглиблення.

Однією з галузей електромагнітного неруйнівного контролю є електромагнітна дефектоскопія. Цій галузі контролю буде присвячена основна частина магістерської роботи. На цій підставі також визначаються цілі та завдання роботи і на цьому слід детальніше зупинитися.

*Дефектоскопія* – це комплекс фізичних методів, засобів і сукупність заходів щодо виявлення дефектів у матеріалі, заготовках, напівфабрикатах та деталях, а також у зварних швах, клепанних з'єднаннях тощо. призводить до наступних показових моментів: забезпечення та задоволення стандартно-нормативних показників та вимог технологічного характеру до вироблених товарів та продукції, забезпечення безпеки та надійності об'єктів та персоналу, більш ефективного використання техніки та засобів виробництва, зростання економічних показників тощо.

Впровадження дефектоскопії в народне господарство, промислове виробництво, науково-дослідну сферу поряд з широкими можливостями контролю за допомогою електромагнітного методу призвело до наявності

великого розмаїття технічних засобів дефектоскопії, що відрізняються один від одного типами вихрострумівих перетворювачів, що створюють електромагнітні поля заданої конфігурації, а також схемами аналогової та цифрової обробки сигналів. Все це обумовлює необхідність аналізу існуючих структур вихрострумівих приладів та їх основних блоків, проведення класифікації засобів контролю та виділення класифікаційних ознак, розгляду основних технічних характеристик засобів та методів проведення контролю, визначення сфери застосування засобів контролю залежно від умов експлуатації, передбачуваних дефектів або порушень, особливостей об'єктів контролю. При цьому зростає необхідність багатопараметрового контролю об'єктів складної форми та структури, автоматизації роботи приладів, покращення їх метрологічних характеристик. Тому збереження принципу – новий прилад для нового об'єкта контролю – економічно не вигідно. З іншого боку, усе це ускладнює теоретичне визначення математичних залежностей, загальних всім типів перетворювачів. Тому актуальними є дослідження щодо систематизації та узагальнення засобів електромагнітного контролю. Видається доцільним створення уніфікованих приладів з високими функціональними та метрологічними характеристиками.

### **Цілі та завдання роботи.**

Метою даної роботи є систематизація та узагальнення пристроїв електромагнітної дефектоскопії, проведення класифікації вихрострумівих перетворювачів, визначення базової структури приладу вихрострумівого контролю дефектів. Для досягнення поставленої мети у магістерській роботі вирішуються такі основні завдання:

1. Огляд пристроїв електромагнітної дефектоскопії, в тому числі конструктивних особливостей та областей застосування цих пристроїв.
2. Аналіз принципів побудови приладів вихрострумівого контролю, у тому числі їх первинних перетворювачів.

3. Розробка методики оцінки технічного рівня пристроїв дефектоскопії виявлення кращих технічних рішень.

4. Розробка базової структури приладу вихрострумowego контролю.

#### **Методи досліджень.**

Методологічною основою цієї роботи є:

– методи логічного аналізу та структурної декомпозиції (при дослідженні принципів побудови та розробки класифікації вихрострумowych перетворювачів);

– методи системного підходу та метод експертних оцінок (при розробці переліку основних технічних показників пристроїв електромагнітної дефектоскопії та виборі кращого технічного рішення).

#### **Новизна та апробація роботи.**

Наукова новизна роботи та результатів дослідження полягає у розробці класифікації та методики оцінки технічного рівня пристроїв та конструкцій перетворювачів електромагнітних систем дефектоскопії.

Результати роботи були використані як основа для підготовки до наукової студентської конференції. На конференції було викладено ключові матеріали та питання роботи та подано результати, отримані в ході проведених досліджень.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МЕТОДА ТА ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

#### 1.1 Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів

Всі види технічного контролю небезпечних виробничих об'єктів поділяються на 3 групи: руйнівний контроль, пошкоджуючий контроль і неруйнівний контроль.

*Руйнівний контроль* – це сукупність таких видів контролю, які вимагають відбору проб або вирізки зразків безпосередньо з матеріалу об'єкта. При цьому об'єкт залишається непридатним до відновлення місць відбору проб (зразків).

До руйнуючих видів контролю відносяться:

- лабораторний хімічний аналіз матеріалу об'єкта (вимагає насверловки певного обсягу стружки);
- металографія (дослідження структури металу об'єкта; вимагає вирізки шліфів);
- лабораторні механічні випробування матеріалу об'єкта на розтягнення, стиснення, вигин, ударну в'язкість (вимагає вирізки спеціальних зразків – темплетів).

*Пошкоджуючий контроль* – це сукупність таких видів контролю, які проводяться безпосередньо на об'єкті, при цьому об'єкт зберігає придатність, але в місцях контролю лишаються непереборні сліди, які не перешкоджають експлуатації.

До пошкоджуючих видів контролю, зокрема, відносяться:

– вимірювання твердості (твердометрія) втискуванням спеціальних інденторів (бабітові кульки, алмазні наконечники; на поверхні об'єкта залишається вм'ятина);

– стилоскопіювання (оцінка марки сталі за складом оптичного спектру вольтової дуги, створюваної між електродом спеціального приладу - стилоскопу і поверхнею об'єкта, на якій залишається прип'ік).

*Неруйнівні методи контролю (НМК), або дефектоскопія, – це узагальнююча назва методів контролю матеріалів (виробів), що використовуються для виявлення порушення суцільності або однорідності макроструктури, відхилень хімічного складу, товщини покриттів та інших цілей, що не вимагають руйнування зразків матеріалу та / або виробу в цілому.*

Розрізняють поняття «неруйнівний контроль» і «неруйнівний фізичний контроль».

*Неруйнівний фізичний контроль – це сукупність таких видів неруйнівного контролю, які вимагають застосування спеціальних речовин, складних приладів і досить наукомістких технологій.*

З усіх видів неруйнівного контролю, використовуваних на небезпечних виробничих об'єктах, лише один не відноситься до категорії фізичних – це візуальний і вимірювальний контроль (ВВК).

Основні вимоги, що висуваються до неруйнівних методів контролю, або дефектоскопії:

– можливість здійснення контролю на всіх стадіях виготовлення, при експлуатації і при ремонті виробів;

– можливість контролю якості продукції за більшістю заданих параметрів;

– узгодженість часу, що витрачається на контроль, з часом роботи іншого технологічного обладнання;

– висока достовірність результатів контролю; - можливість механізації і автоматизації контролю технологічних процесів, а також управління ними з використанням сигналів, що видються засобами контролю;

– висока надійність дефектоскопічної апаратури і можливість використання її в різних умовах;

– простота методик контролю, технічна доступність засобів контролю в умовах виробництва, ремонту і експлуатації.

Основними областями застосування НМК є:

1. Дефектоскопія особливо відповідальних деталей і пристроїв (атомні реактори, літальні апарати, підводні та надводні плаваючі засоби, космічні кораблі і т.п.).

2. Дефектоскопія деталей і пристроїв тривалої експлуатації (портові споруди, мости, крани, атомні електростанції, котли, штучні супутники Землі).

3. Безперервна дефектоскопія особливо відповідальних агрегатів і пристроїв (котли атомних, тепло- і електростанцій), контроль підземних виробок.

4. Проведення досліджень структури матеріалів і дефектів у виробках з метою вдосконалення технології.

## **1.2. Основні види неруйнівних методів контролю (НМК)**

Класифікація неруйнівних методів контролю здійснюється за різними ознаками.

За ступенем проникнення в матеріал всі види неруйнівного фізичного контролю умовно поділяють на дві категорії: поверхневі та об'ємні.

*Поверхневі види* (методи) неруйнівного контролю – це такі, які дозволяють виявляти тільки дефекти, що мають вихід на доступну для контролю поверхню матеріалу об'єкта.

*Об'ємні види* (методи) неруйнівного контролю – це такі, які дають можливість виявляти переважно внутрішні дефекти матеріалу, а поверхневі дефекти виявляються, тільки якщо вони достатньо великі.

Залежно від принципу роботи все НМК діляться на акустичні (ультразвукові); капілярні; магнітні (або магнітопорошкові); оптичні (візуально оптичні); радіаційні; радіохвильові; теплові; контроль течопошуком; електричні; електромагнітні, або струмових рові (методи вихрових струмів).

*Акустичні методи* засновані на реєстрації коливань, які збуджуються або виникають у контрольованому об'єкті. Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури, міжкристалітної корозії, дефектів склеювання, пайки, зварювання тощо) в деталях і виробках, виготовлених з різних матеріалів. Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без їх руйнування. У даний час розроблені й успішно застосовуються тіньовий, резонансний, ехоімпульсний, емісійний, велосиметричний, імпедансний і метод вільних коливань. Ці методи називають також *ультразвуковими*.

*Капілярні методи* засновані на капілярному проникненні крапель індикаторних рідин в порожнини поверхневих дефектів. При контролі цими методами на очищену поверхню деталі наносять проникаючу рідину, яка заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а решту, що залишилася в порожнинах дефектів, виявляють за допомогою проявника, який утворює індикаторний малюнок. Капілярні методи використовуються в польових, цехових і лабораторних умовах, в широкому діапазоні додатніх і від'ємних температур. Вони дозволяють виявляти термічні та шліфовочні тріщини, волосовини, закати тощо. Капілярні методи можуть бути застосовані для виявлення дефектів в деталях з металів і неметалів простої і складної форми.

*Магнітні методи* контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів.

Ці методи дозволяють виявити дефекти типу несучільності матеріалу (тріщини, волосовини, закати), а також визначити механічні характеристики феромагнітних сталей і чавунів щодо зміни їх магнітних характеристик.

*Візуально-оптичні методи* контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом (КО). За характером взаємодії розрізняють методи пройденого, відбитого, розсіяного і індукованого випромінювань (під останнім мається на увазі оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішнього впливу, наприклад люмінесценцію).

Інформативними параметрами цих методів є амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія заломлення або відбиття випромінювання. Оптичні методи широко застосовують через велике розмаїття способів отримання первинної інформації про наявність зовнішніх дефектів незалежно від матеріалу контрольованого виробу.

*Радіаційні методи* контролю засновані на реєстрації та аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання. Використовується рентгенівське, гамма-випромінювання, потоки нейтріно і т.д. Проходячи через товщу виробу, проникаючі випромінювання по-різному послаблюються в дефектному і бездефектному перерізах і несуть інформацію про внутрішню будову речовини і наявність дефектів всередині виробу. Ці методи використовуються для контролю зварних та паяних швів, відливок, прокату тощо.

*Радіохвильові методи* засновані на реєстрації параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, взаємодіючих з КО. Зазвичай використовуються хвилі надвисокочастотного (НВЧ) діапазону довжиною 1100 мм для контролю виробів з матеріалів, де радіохвилі загасають не надто



сильно: діелектрики (пластмаса, кераміка, скловолокно), магнітодіелектрики (ферити), напівпровідники, тонкостінні металеві об'єкти. Так само, як оптичні та акустичні, розрізняють методи пройденого, відбитого, розсіяного випромінювання і резонансний метод.

*Теплові методи* засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів КО. Вони застосовні до будь-яких матеріалів.

Розрізняють *пасивний* (на об'єкти не впливають зовнішнім джерелом тепла) і *активний* (об'єкт нагрівають або охолоджують) методи. Вимірюваним інформативним параметром є температура або тепловий потік.

При *пасивному методі* вимірюють температурне поле працюючого об'єкта. Дефект визначається появою місць підвищеної (пониженої) температури. Таким методом визначають місця витoku теплоти в будівлях; тріщини в двигунах і т.д.

При контролі *активним методом* об'єкт нагрівають контактним або безконтактним методом і вимірюють температуру з тієї чи іншої сторони об'єкта. Це дозволяє виявляти несутільності (тріщини, пористість, сторонні включення) в об'єктах, зміни в структурі фізико-механічних властивостей матеріалу за зміною теплопровідності, теплоємності, коефіцієнту теплопередачі. Вимірювання температури або теплових потоків виконують контактним або безконтактним способом. Найбільш ефективний засіб безконтактного спостереження – скануючий тепловізор. Його використовують для визначення дефектів пайки багат шарових виробів з металів і неметалів, клейових з'єднань тощо.

*Методи контролю течопошуком* засновані на реєстрації індикаторних рідин і газів, які проникають в наскрізні дефекти КО. Їх застосовують для контролю герметичності працюючих під тиском зварних посудин, балонів, трубопроводів, паливної та гідроапаратури, масляних систем силових установок і т.п.

До методів течопошуку відносять гідравлічне опресовування, аміачно-індикаторний метод, контроль за допомогою гелієвого і галоїдного

течошукачів тощо. Проводять течопошук і за допомогою радіоактивних речовин, що значно підвищує чутливість методу.

*Електричні методи* засновані на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з КО (власне електричний метод), або поля, що виникає в КО в результаті зовнішнього впливу (термоелектричний або трибоелектричний методи).

Первинними інформативними параметрами є електрична ємність або потенціал.

*Ємнісний метод* використовується для контролю діелектричних або напівпровідникових матеріалів. За зміною провідності, зокрема її реактивної частини, контролюють хімічний склад пластмас, напівпровідників, наявність в них несутцільностей; вологість сипучих матеріалів та інші властивості.

Для контролю провідників застосовують метод *електричного потенціалу*. Товщину провідного шару, наявність несутцільностей поблизу поверхонь провідника контролюють, вимірюючи падіння потенціалу на деякій ділянці. Електричний струм огинає поверхневий дефект, за збільшенням падіння потенціалу на ділянці з дефектом визначають глибину несутцільності з похибкою в декілька відсотків.

*Термоелектричний метод* застосовують для контролю хімічного складу матеріалу. Наприклад, нагрітий до постійної температури мідний електрод притискають до поверхні виробу і за виникаючою різницею потенціалів визначають марку сталі, титану, алюмінію або іншого матеріалу.

Різновидом електричного методу є метод електронної емісії, тобто вимірювання емісії іонів з поверхні виробу під впливом внутрішніх напружень. Цей метод використовується для визначення розтріскувань в емалевих покриттях, для сортування деталей, вимірювання товщини плівкових покриттів і визначення ступеня загартування виробу.

*Електромагнітний метод (метод вихрових струмів)* заснований на реєстрації змін взаємодії електромагнітного поля котушки з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цією котушкою в

КО. Його застосовують для виявлення поверхневих дефектів в магнітних і немагнітних деталях і напівфабрикатах, а також для контролю товщини покриттів. Метод дозволяє виявляти порушення суцільності (в основному тріщини) на різних за конфігурацією деталях.

В першу чергу завжди проводиться візуальний вимірювальний контроль (ВВК). Це обумовлюється тим, що за наявності очевидних непереборних неприпустимих пошкоджень об'єкта інші більш трудомісткі і дорогі процедури не мають сенсу.

В тому випадку, якщо за результатами всіх попередніх процедур об'єкт не бракується, в ряді випадків призначають дослідження його матеріалу руйнівними методами (хімічний аналіз, металографія, механічні випробування). Якщо програмою діагностування це передбачено і результати випробувань руйнівними методами позитивні, то подальшому неруйнівному контролю повинні бути обов'язково піддані не тільки нормативно регламентовані зони і елементи, але і відновлені місця відбору проб (зразків). Тому неруйнівний фізичний контроль завжди проводять в останню чергу.

В процедуру неруйнівного контролю, як правило, включені як мінімум 2 методи: один поверхневий і один об'ємний.

Поверхневі методи більш прості у виконанні, тому їх використовують перш ніж об'ємні, а об'ємні виконують за відсутності показань на неприпустимі дефекти за результатами поверхневих.

Тільки у разі відсутності протипоказань за результатами всіх процедур діагностування складається позитивний висновок, який містить в собі окремі висновки по кожному виду (методу) контролю.

Процедури контролю на небезпечних виробничих об'єктах можуть виконувати фахівці, навчені і атестовані відповідно до вимог «Правил атестації персоналу в галузі неруйнівного контролю», причому надавати висновки можуть особи з кваліфікацією не нижче II рівня за цим методом для даного виду об'єктів. Лабораторії, що виконують діагностування, повинні

бути атестовані у відповідності з вимогами «Правил атестації лабораторій неруйнівного контролю».

### **1.3 Проблеми виявлення дефектів та характеристика методів неруйнівного контролю**

В неруйнівному контролі виділяють кілька видів контролю. У свою чергу, кожен вид контролю утворений декількома методами контролю. Основною відмінністю видів контролю, тобто тим, завдяки чому можливе виділення контролю у самостійний вигляд, є фізичний принцип здійснення контролю, взаємодія з об'єктом контролю. Це іонізуючі випромінювання, електричне та магнітне поля, світлові та теплові випромінювання, акустичні коливання, електромагнітні поля різних частотних діапазонів.

Кожен із видів контролю (або сукупність включених до нього методів) охоплює велику область різних об'єктів та контрольованих параметрів. При цьому кожен метод має властиві йому переваги та недоліки, наприклад, чутливість ферозондового методу вище, ніж індукційного або швидкість здійснення контролю при одному методі може бути меншою, ніж при іншому методі тощо. Окрім параметрів, що безпосередньо характеризують метод контролю, виділяють характеристику по об'єктах контролю, які можна контролювати за допомогою даного методу. Тому в цьому розділі зупинимося на характеристиках різних методів та видів неруйнівного контролю, що використовуються при дефектоскопії матеріалів та виробів [2, 3, 4, 6]. Це дозволить виділити особливості, переваги та недоліки електромагнітного методу. Для цього детальніше зупинимося на фізичних основах його здійснення, а також об'єктах і параметрах, що контролюються за його допомогою.

До контрольованих параметрів електромагнітної дефектоскопії відносяться дефекти або порушення суцільності матеріалів і виробів. Оскільки електромагнітний контроль ґрунтується на взаємодії полів

вихрових струмів із перетворювачем, то об'єкт контролю є провідником електричного струму, як правило, це об'єкт із металу. Тому і дефекти, що виявляються, є дефектами металів. Перш ніж розглядатимемо самі методи дефектоскопії, зупинимось на головному контрольованому параметрі – дефектах металів [1]. Якими вони бувають, що являють собою і чим їх можна охарактеризувати.

*Дефект продукції* – кожна окрема невідповідність продукції до встановлених вимог. Існує кілька способів класифікації дефектів. Дефекти класифікують за їх місцезнаходженням, розмірами дефектів, їх походженням. Існує така класифікація дефектів:

1. Дефекти типу порушень суцільності (тріщини, пори, раковини, розшарування).

2. Дефекти, пов'язані з відхиленнями розмірів від заданих, зокрема довжина, ширина, висота, діаметр, товщина стінки, товщина покриття, глибина поверхневого шару.

3. Дефекти, пов'язані з відхиленням від заданих фізико-хімічних властивостей (питома електропровідність, щільність, твердість, вологість, хімічний склад, межа міцності та плинності)

4. Розвиток у часі тріщин, збільшення проміжків, зменшення стінки.

Розглянемо технологічну класифікацію дефектів. Тут виділяють такі різновиди та групи дефектів:

1. *Дефекти, що виникають у процесі плавки та лиття.*

Усадкова раковина – це порожнина, що утворилася внаслідок зменшення об'єму рідкого металу при його затвердінні. У усадковій раковині накопичуються неметалеві включення, що впливають з рідкого металу на його поверхню. Зона металу, прилегла до порожнини усадкової раковини, збагачена також вуглецем і ліквіруючими домішками (сіркою, фосфором).

Гаряча тріщина – звивистий окислений розрив металу, ширший у поверхні і звужується вглиб, що утворюється внаслідок розтягуючих напруг, що перевищують міцність зовнішніх шарів злитка.

Ліквация є неоднорідністю сталі і сплавів за складом, що утворюється при їх затвердінні. Ліквациєю називають також процес створення такої неоднорідності.

Забруднення, шлакові включення – дефект, що є скупчення неметалевих включень, які потрапляють у метал із зовнішніх джерел (шлак, вогнетриви, феросплави, лігатури та ін.) чи які утворюються у металі внаслідок реакцій розкислювачів і десульфаторів з киснем, сіркою, азотом і зависсю включень.

Газова пористість та неспаї.

## *2. Дефекти, що утворюються в процесі пластичної деформації*

Флокени являють собою тонкі розриви металу округлої або овальної форми, що утворюються внаслідок структурної напруги в сталі, насиченої воднем і розташовані в середній зоні злитків, прокату, поковок або прутків.

Волосовини – ниткоподібні дефекти, що утворюються в деформованому металі при витягуванні забруднень вздовж напрямків деформації, при цьому їх довжина залежить від ступеня деформації та від розміру забруднення і може бути різною при незначній глибині.

Рванини і прокатні полони є розкриті розриви, розташовані перпендикулярно або під кутом до напрямку найбільшої витяжки металу, що утворюються при гарячій деформації металу через знижену пластичність металу. Наступна деформація зазвичай призводить до розширення рванин, у результаті поверхні утворюються групові дефекти, звані прокатними пленами.

Закати – складки на поверхні металу.

Розшарування, газові пори.

## *3. Дефекти, що виникають у процесі термічної та хіміко-термічної обробки*

Міжкристалітні тріщини являють собою тонкі порушення суцільності, що утворюються по межах кристалів при низькій міцності цих меж,

внаслідок усадкових, термічних і структурних напруг, що часто пов'язано з присутністю на них прошарків неметалічної фази та лікватів.

Бульбашки являють собою порожнини, що мають округлу, овальну або довгасту форму, що утворюються в результаті виділення газів при кристалізації. Утворення бульбашок можливе при взаємодії різних газів, а саме оксиду вуглецю, азоту, водню, монооксиду кремнію, а також легкоплавких металів.

Точкова неоднорідність є локальними скупченнями сульфідів, нітридів, оксидів і карбідів, що утворюються при кристалізації сталі внаслідок дендритної і зональної ліквідації домішок.

Тріщини напруги – дефект, що є спрямованою в глиб металу, часто під прямим кутом до поверхні, тріщину, що утворюється внаслідок об'ємних змін, пов'язаних зі структурними перетвореннями, з нагріванням і охолодженням металу.

*4. Дефекти механічної обробки і які виникають у процесі правки та монтажу*

Шліфувальні тріщини є сіткою павутиноподібних або окремих довільно спрямованих поверхневих розривів, що утворилися при шліфуванні металу, маючого високу твердість, крихкість і малу теплопровідність. Мають невелику глибину, але видаляти їх шліфуванням зазвичай не вдається, так як при шліфуванні виникають нові тріщини.

Надріз, підріз являє собою поздовжнє поглиблення по всій довжині прутка або на окремих ділянках поверхні, що утворилося через неправильне налаштування волкової арматури або одностороннього перекриття калібру.

Подряпина – дефект, що є канавкою неправильної форми і довільного напрямку, що утворилася в результаті механічних пошкоджень, у тому числі при складуванні і транспортуванні металу.

Риски, надири.

*5. Дефекти, що виникають у процесі зварювання: зварувальні тріщини, пори, шлакові включення.*

*б. Дефекти, що виникають у процесі виробництва та експлуатації*

Корозія – це комплекс процесів, що викликають потоншення металевої стінки та появу на її поверхні поганопровідного шару.

Втомні тріщини, місцевий наклеп.

Різні дефекти структури металу, тріщини та несучільності під впливом робочих напруг можуть призвести до руйнувань деталей та виробів та виходу їх з ладу. Основною причиною руйнування є втома, залишкові напруги та ділянки, на яких є різкі перепади цих напруг. Втомні злами мають осередок руйнування, ділянки повільного та прискореного розвитку тріщин. Причини таких руйнувань пов'язані з технологією виробництва. У експлуатації до них додаються корозія, ерозія та інші процеси. Попередження руйнувань можливе лише після виявлення порушень та дефектів, проте універсального методу, що забезпечує виявлення всіх перерахованих вище дефектів немає. Вибір методу контролю та можливості того чи іншого методу залежать від місця розташування дефектів, їх довжини, глибини залягання та їх походження. Тому розглянемо різні методи дефектоскопії, що застосовуються нині при неруйнівному контролі матеріалів та виробів; вкажемо можливості методів виявлення тих чи інших видів дефектів, а також контрольованих об'єктів.

*Методи проникаючих випромінювань (МПВ)* дозволяють виявляти такі дефекти: невеликі рихлоти, раковини, пористість, шлакові та флюсові включення, тріщини, зони ліквідації, непровари, підрізи. МПВ особливо ефективні при виявленні несучільностей (непроварів, пор, раковин, включень, тріщин) у литті та зварних конструкціях. До методів проникаючих випромінювань відносяться рентгено- і гамма-просвічування. Виявити тріщини за допомогою цих методів можна лише за умови, що площина розриву збігається з напрямком променів, що падають на рентгенівську плівку, або становить кут, що не перевищує, як правило, 10-15°. При цьому ширина тріщини повинна бути не менше ніж 0,015 мм.



Необхідною умовою цього виду контролю є можливість двостороннього підходу до контрольованого об'єкту. Чутливість і роздільна здатність залежить від розміру фокусної плями рентгенівської трубки.

Можливі чотири види реєстраторів рентгенівських та гамма-променів: фотографічна емульсія (фотометод), флуоресцентний шар (візуальний метод), напівпровідниковий електрично заряджений шар з металевою підкладкою (ксерографічний або електрографічний метод), іонізаційна камера або лічильник Гейгера–Мюллера (іонізаційний метод). У рентгенівській та гамма-дефектоскопії поширений метод реєстрації зображення об'єкта, що просвічується, на рентгенівську фотоплівку. Щільність почорніння залежить від інтенсивності рентгено- і гамма-променів і, отже, від товщини, хімічного складу або щільності матеріалу, що просвічується, часу їх дії (експозиції), довжини хвилі випромінювання, способу прояву.

Як джерело випромінювання використовують ізотопи, які за енергією випромінювання та розмірами фокусної плями дають максимальну чутливість, наприклад, ізотопи кобальту Co-60, цезію Cs-137, іридію Ir-192.

В основі *ультразвукової дефектоскопії* лежить здатність ультразвукових коливань (УЗК) поширюватися в металі на великі відстані у вигляді спрямованих пучків і відображатись на межах двох ділянок рівної щільності. В об'єкт контролю коливання вводяться в імпульсному або безперервному режимах за допомогою п'єзоелектричного шукача. Контролюють деталі і напівфабрикати порівняно простої форми з матеріалів, що прозвучують. Виявляють плоскі, об'ємні, лінійні та точкові дефекти.

*Метод звукової тіні* пов'язаний з появою області «звукової тіні» за дефектом, поперечні розміри якого перевищують довжину пружної хвилі. Цим методом контролюють вироби нескладної форми та невеликої товщини при двосторонньому підході до контрольованої ділянки. При цьому виявляються раковини, тріщини, розшарування та зони крупнозернистості, порушення зчеплення між шарами у багатошарових конструкціях. Про наявність дефекту судять або за зменшенням енергії УЗК в розташованій за

дефектом зоні, або за зміною фази або часу прийому УЗК, що обгинають дефект. Чутливість методу залежить від відстані від дефекту до задньої межі контрольованого виробу та коефіцієнта згасання. У сучасних дефектоскопах, що працюють на тіньовому методі, для виключення стоячих хвиль застосовують частотну модуляцію або використовують імпульсний режим коливань. В цьому випадку можливий так званий дзеркальний спосіб, що не вимагає двостороннього підходу до контрольованої ділянки. Більшість приладів працює із використанням поздовжніх УЗ коливань. Для контролю листового прокату і труб застосовують нормальні хвилі.

*Імпульсний луна-метод* найбільш поширений метод виявлення дефектів. Він заснований на посиленні коротких УЗ імпульсів та відображенні їх від поверхні дефекту (і зворотної стінки виробу). За допомогою цього методу можна виявити дефекти площею в  $1 \text{ мм}^2$  (раковини, шлакові включення, полони, рихлоти, розшарування та ін.), розташовані на достатньо великій глибині під поверхнею металу.

Чутливість цього методу набагато вища, ніж тіньового. Вона залежить від частоти ультразвукових коливань, потужності імпульсу, спрямованості випромінювання, акустичних характеристик матеріалу.

У луна-методі використовують всі види пружних коливань. Зсувними хвилями виявляються дефекти, що залягають неглибоко під поверхнею та орієнтовані останньою перпендикулярно. Поверхневі хвилі застосовують виявлення поверхневих дефектів у виробках порівняно простих форм. При цьому на результати впливає стан поверхні. При контролі шляхом поздовжніх хвиль при введенні коливань є «мертва зона», що становить на частотах 2-3 МГц 6-8 мм. Скорочення мертвої зони залежить від тривалості імпульсу та тривалості перехідних процесів.

*Резонансний метод* ґрунтується на виникненні в контрольованому металі поздовжніх стоячих хвиль. Стоячі хвилі виникають при збігу частоти зовнішньої сили, що обурює, з частотою власних коливань системи. Резонансним методом виявляють зони корозійного ураження, непропаї в

листових з'єднаннях, розшарування в тонких з'єднаннях, розшарування в тонких листах, вимірюють товщину листів та стінок труб. Удосконалені прилади дозволяють контролювати товщину стінок від 0,5 до 50 мм з похибкою, що не перевищує 2%.

*Імпедансний метод*, в його основу покладена залежність сили реакції складеного склеєного або спаяного виробу на контактуючий з ним (без мастила) коливальний стрижень. Якщо здійснюють поздовжні коливання стрижень стикається з ділянкою виробу, що має гарне з'єднання, то вся конструкція коливається як єдине ціле. Механічний опір (механічний імпеданс), що робиться виробом стрижня, визначається жорсткістю всієї конструкції в цілому. Якщо стрижень розташований над ділянкою з дефектним з'єднанням, то верхній лист (обшивка) коливається незалежно від шарів матеріалу. Жорсткість верхнього листа менше жорсткості всієї конструкції, і тому сила реакції на датчик зменшується. Ця сила вимірюється спеціальним п'єзоелементом, розміщеним у нижньому шарі стрижня. Метод використовують для контролю клеєних, паяних конструкцій з металевими та неметалевими обшивками та заповнювачами між ними.

*Метод вільних коливань* заснований на властивостях коливальних систем. Його здавна використовують для огляду залізничних складів та виявлення тріщин у колісних парах. Від зовнішньої збурюючої сили залежить лише початкова амплітуда коливань. Інші характеристики – частота і коефіцієнт загасання – залежать від параметрів коливальної системи: її маси, гнучкості та механічного опору. Якщо у виробі з дефектами збудити вільні коливання, то частота цих коливань та коефіцієнт загасання відрізнятимуться від тих самих характеристик цього виробу без дефектів.

#### *Люмінесцентна та кольорова дефектоскопія (капілярні методи)*

Люмінесцентний та кольоровий методи дефектоскопії засновані на явищі капілярного проникнення добре змочуючої рідини в тріщини, пори та інші поверхневі несутцільності. При цьому рідина, якою заповнені дефектні порожнини, здатна світитися в ультрафіолетових променях.

Капілярні методи контролю застосовують виявлення поверхневих тріщин як в умовах цеху в процесі виготовлення деталей, так і при профілактичному огляді виробів в процесі експлуатації. Цим методам контролю піддають головним чином вироби з немагнітних матеріалів, оскільки магнітні матеріали зручніше контролювати магнітопорошковим методом. У серійному виробництві капілярними методами контролюють відповідальні деталі нескладної конфігурації з шорсткістю поверхні Rz20 і навіть литі деталі. Чутливість до мінімального дефекту з такими розмірами: розкриття – 1 мкм, глибина – 0,01 мм, довжина – 0,1 мм.

У кольоровій дефектоскопії несучільності забарвлюються фарбою, що відрізняється за кольором від решти поверхні. Для цього на поверхню деталі зануренням або розпорошенням наносять підфарбований темно-червоним барвником розчин, що володіє високою капілярністю і поверхневим натягом. Потім цей розчин із поверхні видаляється. Для появи дефектів застосовують суспензію білого порошку. Вона утворює білий фон і має високі адсорбційні властивості, витягуючи червоний барвник на поверхню контрольованої деталі. За допомогою джерел ультрафіолетового випромінювання збуджується люмінесценція індикаторної рідини у місці дефекту.

Після промивання сліди бензину і ацетону з поверхні деталі і з порожнин дефектів видаляють прогріванням деталей протягом 1-2 год при температурі 80-400°C. Якщо не потрібно забезпечення максимальної чутливості, то допускається зниження температури прогрівання деталі (або взагалі його скасування). При цьому надійність контролю дещо знижується.

*Магнітні методи контролю* засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають довкола дефектів. Застосовують магнітопорошковий, магнітографічний, феррозондовий, індукційний ефект Холла, гальваномагнітні та інші способи індикації полів розсіювання.

*Магнітна порошкова дефектоскопія.* Цей метод застосовують для виявлення поверхневих і неглибоких тріщин, волосин, флоків та інших дефектів у сталевих намагнічених деталях або заготовках. Висока чутливість

методу дозволяє виявляти дефекти з шириною розкриття понад 1 мкм, глибиною понад 10 мкм та довжиною від 0,5 мм. Чутливість значною мірою залежить від якості порошку, спрямованості магнітного поля, конфігурації контрольованого виробу.

Метод магнітного порошку застосовують для контролю деталей, що пройшли остаточну механічну та термічну обробку. Виявляються дефекти, що виходять на поверхню, а також дефекти на глибині до 2 мм під поверхнею. Найбільш ефективно виявляються різноманітні тріщини.

У магнітопорошкській дефектоскопії використовують залізні порошки, порошки з окалини заліза, відходів сталі, магніту, феромагнітного окису заліза, з фериту, які можуть бути жовтого, червоного та світло-жовтого кольору. Дуже ефективно застосування магнітної суспензії – суспензії феромагнітних частинок у рідині, воді, мінеральних оліях, гасі. Знаходить застосування метод повітряної суспензії, особливо для деталей з покриттям з хрому.

При контролі намагнічують деталі в полі постійного або змінного струму, пропускаючи через деталь або мідний стрижень струм великої сили. Деталь намагнічується полем у площині, перпендикулярній до напрямку струму.

Найкраща виявленість дефектів отримується при перевірці деталей в магнітному полі. Контроль методом магнітного порошку проводять на магнітних дефектоскопах. Вони виробляють намагнічування деталі, автоматичне переміщення затискачів, автоматичне регулювання та вимикання струму, поливання деталі магнітною суспензією, освітлення та розмагнічування деталі після контролю.

*Метод ферозондів.* За своїм принципом дії ферозонди багато в чому нагадують магнітний підсилювач. Для керування сигналом у них використовують магнітний ланцюг у вигляді пермалоївого сердечника, що намагнічується під дією магнітного поля, створеного контрольованим об'єктом. Більшість ферозондових приладів має два невеликі ферозони.

Вторинні обмотки котушок таких диференціальних ферозондів включають послідовно або зустрічно один одному. У першому випадку вимірюють величину поля, а у другому – його градієнт. По ферозонду пропускають змінний струм. При дії на сердечник невеликим постійним магнітним полем на виході ферозонду з'являється ЕРС другої гармоніки. Амплітуда другої гармоніки і напруженість постійного поля, що підмагнічує, у відомих межах пов'язані між собою. Тому можна не тільки визначити наявність, але і виміряти величину магнітного поля або його градієнта.

При механізації контролю на добре обробленій поверхні виявляються дефекти глибиною порядку 0,1 мм, а також дефекти розміром 0,5 мм, що залягають на глибині до 10 мм.

*Індукційний метод.* В індукційному методі як індикатор потоків розсіювання в контрольованому намагніченому виробі використовують котушку індуктивності. Дуже часто така котушка живиться змінним струмом частотою, що не перевищує кілька сотень герц, і є елементом мостової схеми. У діагональ моста включають підсилювальне та індикаторне устрою. В іншому варіанті індукційного методу на контрольованому виробі встановлюють електромагніт, що живиться змінним струмом. Потік розсіювання виявляється за допомогою шуканої котушки, встановленої між полюсами електромагніту. ЕРС, збуджена потоком розсіювання від дефекту, посилюється та подається на телефон, самописець або осцилограф. За допомогою індукційних дефектоскопів виявляються тріщини та непровари в зварних з'єднаннях, дроті, прутках та канатах, що використовуються у витягах.

Дуже ефективним є застосування індукційного методу для контролю гарячекатаних труб, сталевих прутків без видалення окалини. При цьому виявляються тріщини завглибшки від 0,2 до 0,3 мм. У ряді випадків застосовують додаткове підмагнічування, що дозволяє зменшити вплив неоднорідності структури, особливо у низьколегованих сталей.

З їх допомогою виявляють полони, подряпини, рядкові неметалеві включення, окалину, розташовані вздовж прокатки. Дефекти глибиною понад 10% товщини стінки виявляють за швидкості руху 1.5 м/с.

*Магнітографічний метод.* При магнітографічному методі фіксацію полів розсіювання навколо дефектів, виробляють за допомогою магнітної стрічки в прикладеному магнітному полі. Перетворення інформації на електричний сигнал здійснюється по залишкової намагніченості стрічки.

Найбільш широко даний метод застосовують при контролі зварних швів у трубопроводах. Досвід показав, що він не менш надійний, ніж гамма-просвітлення. Процес контролю включає намагнічування зони контрольованого зварного шва, запис потоків розсіювання на прикладеної магнітографічної стрічки, а потім відтворення записаних на стрічці сигналів від дефектів. Добре виявляються протяжні дефекти (тріщини, непровари, ланцюжки та скупчення шлакових включень). У цьому висота посилення зварних швів має перевищувати 25% товщини основного металу виробу. Нерівності на поверхні також не повинні бути більше 25-30% висоти посилення.

Можливі два варіанти намагнічування: поперек зони шва і в напрямку, нормальному до поверхні листів, що зварюються. Для поперечного намагнічування використовують дискові магніти, що забезпечують індукцію в контрольованому виробі не менше  $11-12 \cdot 10^3$  Гс. Перпендикулярне намагнічування здійснюють за допомогою багатовиткового соленоїду. Більшість небезпечних дефектів розташовано вздовж зварного шва, тому при відтворенні сигналів використовують схему поперечного відтворення. При цьому виявляються тріщини та непровари глибиною 10% від товщини стінки і більше, ланцюжки газових пор та великі шлакові включення.

*Метод електричного опору (електроконтактний метод)* використовують для виявлення несучільностей у металевих деталях,

визначення глибини тріщин, зафіксованих іншими способами, виявлення пір у лакофарбових покриттях.

Невеликі ділянки металів мають малий опір. Тому найбільш поширені методи вимірювання опору за допомогою моста Уінстона для контролю металів виявляються непридатними, так як опір контактів і проводів, що підводять, у цьому випадку виявляється того ж або більш високого порядку, що і вимірюване. При вимірі малих опорів застосовують схеми, в яких ланцюг, що підводить струм, і ланцюг для визначення падіння напруги на опорі, що вимірюється, виявляються самостійними парами контактів. За цим принципом побудовано подвійний міст Томсона та мікроомметр М-246, у якому для відліку показань використовують лагометр. Як правило, контактні головки мають чотири електроди. Токові електроди закріплюють нерухомо. Потенційні електроди переміщують у вертикальній площині за допомогою пружин, що підтискують. Невеликі переміщення електродів щодо один одного викликають помилки при вимірах. На показання приладів впливають близькість краю, виступів, отворів тощо. Вплив цих факторів знижують застосування шаблонів (кондукторів).

*Електроконтактний метод* застосовують у рейкових дефектоскопах для контролю якості паяння струмопровідних з'єднань потужних електричних машин, з'єднань компенсаційної обмотки електромашин постійного струму, роторної обмотки турбогенераторів, а також для виявлення пор і тріщин у лакофарбових покриттях, нанесених на металеву основу.

*Метод інфрачервоних випромінювань* або тепловий метод використовують діапазон частот, що слідує за радіометодом, тобто хвилі довжиною 0,8 – 10 мкм.

З теплотехніки відомо, що при нагріванні тіла довжина хвилі, що відповідає максимальному випромінюванню, залежить від абсолютної температури тіла. При нагріванні тіл, які мають ділянки з неоднаковими тепловими властивостями, випромінювання їх поверхні буде неоднаковим.



Якщо нагріти тіло до температури 300 – 400°C, то довжина хвилі максимального випромінювання складе 3,7 – 4,5 мкм. Випромінювання з такою довжиною хвилі реєструють спеціальними чутливими опорами, фотодіодами, болометрами.

Інфрачервоний метод використовують для контролю якості спаїв, виявлення розшарування в теплозахисних конструкціях, а також інших порушень суцільності матеріалів, що викликають інтенсивне виділення тепла.

Електромагнітний контроль в основному придатний для виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів. Чутливість (або роздільна здатність) методу значною мірою залежить від місця розташування та походження дефекту, його протяжності, ширини розкриття, глибини, стану поверхні тощо. Виявляються лише такі дефекти, які суттєво змінюють траєкторію вихрових струмів. Це відбувається, якщо електричний контакт між стінками дефекту порушений. Найбільш ефективно електромагнітний метод застосовують для виявлення втомних і деяких інших видів тріщин на поверхні металу при контролі дроту і прутків, ручного контролю деталей і вузлів у зборі.

Характерною особливістю методу є вплив на показання приладів численних факторів, що заважають вимірюванням. Кожен із параметрів, які впливають на якість виробу, контролюють за умови, що інші чинники у процесі контролю залишаються незмінними чи мало впливають на показання приладів. Розроблено прийоми відбудови від факторів, що заважають вимірам. У більшості дефектоскопічних досліджень такими факторами можуть бути вимірювання відстані між котушкою-перетворювачем електромагнітної енергії та поверхнею металу (зазор), електропровідності та магнітної проникності (для магнітних матеріалів), товщини покриттів, діаметра дроту, прутків, труб, товщини стінки тощо. Дріт, прутки, труби, дрібні деталі контролюють за допомогою прохідних датчиків. Котушки цих датчиків складаються з кількох обмоток. Збудливі обмотки рознесені та знаходяться

далі від об'єкта, що контролюється. Таку систему зазвичай розміщують у кожусі або у спеціальних оправках. Іноді прохідні котушки розміщують усередині труби або іншого порожнього об'єкта. При контролі деталей складної форми (профілів, великогабаритних деталей, листів та ін) використовують накладні датчики, що прикладаються торцем до контрольованого об'єкта. Котушки накладних датчиків часто намотують на феродіелектричні сердечники, наприклад ферити. Таким чином, концентруючи електромагнітне поле, можна оцінювати стан контрольованої поверхні в дуже малій зоні, площею близько  $1 \text{ мм}^2$ . Для контролю якості та товщини тонкостінних деталей застосовують екранний спосіб, при якому виріб розміщується між передавальною та приймальною котушками.

Дуже важливим фактором, що визначає чутливість, глибину проникнення і роздільну здатність методу, є частота струму.

Для реєстрації показань у приладах використовують електроннопроменеві трубки, стрілочні індикатори, самописці, командні релейні пристрої. Сигнал, що надходить із котушки перетворювача, несе в собі різну інформацію, яка після обробки та перетворення виводиться на зазначені пристрої виводу або керування.

Застосування кожного з методів у кожному даному випадку характеризується ймовірністю виявлення дефектів. На ймовірність виявлення дефектів впливають чутливість методу, і навіть умови проведення процедури контролю. Для розглянутих методів дефектоскопічного контролю наведемо значення порога чутливості (мінімальні розміри дефектів, що виявляються). Ці дані представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Чутливість методів неруйнівного контролю

Метод	Мінімальні розміри виявлених дефектів, мкм		
	Ширина розкриття	Глибина	Протяжність
Візуально-оптичний	5–100	–	100
Кольоровий	1–2	10–30	100–300
Люмінісцентний	1	10–50	30
Магнітопорошковий	0,5–1	150–200	600–2000
Вихрострумовий	1–30	–	–
Ультразвуковий	100	2–3% від товщини	–
Ферозондовий	50	200	1000

#### 1.4 Технічні характеристики електромагнітних дефектоскопів

Здійснення контролю металевих об'єктів виявлення дефектів і несучільностей з допомогою методу вихрових струмів є завданням, вирішуваним з допомогою комплексу технічних засобів. Головне завдання виконується пристроями дефектоскопії (дефектоскопами). Як і інші технічні засоби, дефектоскоп можна охарактеризувати:

- функціями, які цей пристрій виконує;
- кількісними чи якісними показниками, що характеризують результати його роботи.

Тому, розглядаючи в магістерській роботі пристрої дефектоскопії (принципи їх роботи та технічні показники), розробляючи класифікацію пристроїв електромагнітної дефектоскопії необхідно дати визначення тим параметрам та показникам, які характеризують дефектоскопи як технічні засоби. За допомогою технічних характеристик можна достовірно та наочно оцінити ефективність та можливості конкретного приладу або системи, порівняти можливості електромагнітного методу з іншими методами

дефектоскопії при виборі найбільш оптимального методу контролю, що не руйнує.

Технічні характеристики дефектоскопів можна розділити на загальні, що відносяться до дефектоскопів як продукції приладобудування (маса, потужність споживання, показники надійності, термін служби тощо) і спеціальні. До спеціальних характеристик відносять поріг чутливості, роздільну здатність і максимальну продуктивність або швидкість контролю.

Основний параметр дефектоскопу – *пори́г чу́тливості*. Це мінімальні розміри дефекту заданої форми, у яких відношення сигнал/перешкода дорівнює двом. Як стандартні дефекти часто приймають вузькі розрізи, площина яких орієнтована нормально до поверхні зразка, мають певну глибину, довжину і ширину, звану також розкриттям. Такі штучні дефекти наносять на плоскі зразки, пруток та труби різними методами. Інший тип стандартного дефекту – круглий наскрізний або глухий отвір заданих діаметра та глибини (для глухих отворів). Отвори як штучні дефекти легше виходять, але сигнали від отворів та штучних тріщин та рисок тієї ж глибини різні.

Реальний поріг чутливості дефектоскопа залежить, очевидно, як від рівня сигналу, так і від рівня перешкод. Найбільший вплив мають перешкоди, пов'язані зі зміною властивостей ОК (наприклад, параметрів  $\mu_r$  і  $\sigma$ ), розмірів, шорсткості поверхні ОК, а також зі зміною взаємного положення ВСП і ОК (зміни зазору при використанні накладних ВСП та радіальні переміщення ОК в прохідному ВСП). Тому поріг чутливості не є постійним параметром, він залежить від конкретних умов застосування дефектоскопа, що необхідно мати на увазі при його експлуатації. Поріг чутливості, який задається в технічній документації дефектоскопа, визначають, суворо обумовлюючи ці умови. Вказуються, наприклад, матеріал і марка зразка з атестованим штучним дефектом, взаємне розташування ВСП і зразка, розміри зразка, розташування штучного дефекту. Оскільки сигнал залежить від положення ВСП щодо дефекту, зазвичай при визначенні порога

чутливості мають на увазі найбільше значення сигналу, одержуваного при скануванні дефектної ділянки.

*Роздільна здатність* – мінімальна відстань між двома дефектами, при якому вони реєструються окремо. Цей параметр зазвичай визначається в межах 5...15 мм. Для дефектоскопів з прохідними ВСП він залежить від діаметра ОК (і ВСП відповідно): чим більше діаметр, тим гірша роздільна здатність для дефектів, розташованих уздовж осі ОК. Для накладних ВСП роздільна здатність тим краще, що менше зона чутливості ВСП.

*Максимальна продуктивність контролю* – важлива експлуатаційна характеристика, яка зазвичай задається для дефектоскопів, що працюють в автоматичному або напівавтоматичному режимі в технологічних виробничих лініях. При контролі лінійно протяжних об'єктів продуктивність визначається швидкістю контролю (м/с), а при контролі дрібних об'єктів – числом об'єктів в одиницю часу (шт./год). Продуктивність контролю вихрострумових дефектоскопів обмежується головним чином можливостями транспортуючих та сортуючих ОК пристроїв та пристроїв сканування. Обмеження, пов'язані з впливом швидкості руху ОК в зоні контролю на сигнали ВСП, значно менш жорсткі і зазвичай не визначають продуктивності.

Крім перерахованих вказуються якісні характеристики дефектоскопів: наявність автоматичного придушення впливу змін зазору; можливість оцінки глибини (або протяжності) дефекту та документування результатів контролю.

Загальні технічні вимоги зазвичай доповнюються такими параметрами та характеристиками, як частота струму збудження ВСП, умови застосування дефектоскопа, види та характеристики об'єктів контролю

## **1.5 Огляд пристроїв електромагнітної дефектоскопії**

*Малогабаритний вихрострумний дефектоскоп типу ЛД*, зібраний за автогенераторною схемою, з комплектом локальних ВСП призначений для виявлення та ідентифікації орієнтації поверхневих і підповерхневих

несуцільностей (мікротріщин, мікрораковин) довжиною від 0,2 мм і більше і глибиною не менше 0,25 мм в об'єктах складної форми з неферомагнітних металів та сплавів. Застосування локальних ВСП дозволяє без додаткового підстроювання дефектоскопа виявляти дефекти та визначати їх орієнтацію в об'єктах складної форми, таких як поверхня, кромки та паз замку лопатки турбіни, робоче колесо турбіни, різьбові та галтельні з'єднання тощо. Прилад має сигналізацію дефект і про порушення контакту з об'єктом, що контролюється. Індикатор стрілки дозволяє орієнтовно визначити розміри дефекту.

Живлення приладу автономне від акумуляторних батарей. Споживана потужність трохи більше 200 мВт. Габарити приладу 180x130x50 мм. Маса приладу із джерелом живлення 550 г.

*Вихрострумний модуляційний дефектоскоп ВД-20П* призначений для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів типу рисок, розшарування тощо в дроті діаметром 0,2-0,6 мм з тугоплавких або кольорових металів і сплавів. Дефектоскоп ВД-20П разом із пристроєм перемотування може використовуватися в умовах потокового виробництва. Контроль якості дроту відбувається у процесі його перемотування з однієї котушки на іншу за допомогою пристрою перемотування зі швидкістю 18 – 180 м/хв. При цьому дріт проходить крізь прохідний ВТП диференціального типу, який складається з збуджуючої котушки, що живиться змінним струмом високої частоти від генератора, і двох коротких вимірювальних обмоток, включених послідовно зустрічно. На виході ВТП напруга близько до нуля за відсутності у ньому об'єкта контролю, і навіть під час проходження крізь нього однорідної дроту (без дефектів). Якщо в дроті є дефекти, на виході ВТП виникають сигнали, амплітуда і фаза яких залежать від характеристик дефектів. Завдяки застосуванню диференціального ВТП дефектоскоп мало чутливий до змін діаметра дроту в межах допуску, варіацій його питомої електричної провідності та інших факторів, що заважають.

У той самий час відомий недолік диференціального ВТП – труднощі виявлення протяжних дефектів типу довгих тріщин і розшарування – подолано дефектоскопі завдяки застосуванню оригінального алгоритму розпізнавання сигналів. Алгоритм заснований на статистичній оцінці параметрів сигналів ВТП від протяжних дефектів типу розшарування, а саме порівняння частоти викидів максимальних значень сигналів за встановлений перший рівень із заданим значенням цього параметра. Задана частота викидів визначається з результатів статистичного аналізу варіації глибини розшарування по довжині дроту. Для розпізнавання сигналу використовується ще одна ознака: наявність викиду сигналу за другий рівень, що перевищує перший. Цей викид відповідає проходженню початку протяжного дефекту через диференціальний ВСП.

При випробуваннях феромагнітного дроту застосовується його намагнічування до насичення за допомогою спеціально сконструйованого малогабаритного блоку на постійних магнітах (дефектоскоп ВД-21ПМ). Застосування блоку перевірки працездатності дозволяє легко та швидко переконатися у правильності функціонування всіх частин системи.

Конструктивно дефектоскоп складається з двох блоків: основного (електронного) та виносного, що містить ВСП зі схемою балансування та перетворювач швидкості перемотування дроту. Електронна частина приладу виконана на інтегральних мікросхемах та напівпровідникових приладах. Розміри дефектоскопа 480x220x415 мм, маса без пристрою перемотування дроту 3,5 кг.

*Багатоканальний вихрострумний дефектоскоп ДВТ-6* призначений для автоматичного неруйнівного контролю якості біметалічних виробів. Дефектоскоп включає багатoeлементний ВСП або ВСП з кількома параметричними датчиками конструктивно об'єднаними в блок перетворювачів. Дефектоскоп типу ДВТ-6 дозволяє виявляти тріщини у феромагнітних циліндричних виробах, плакованих з двох сторін латунню, а також реєструвати порушення суцільності плакування. Конструкція

перетворювача забезпечує розташування датчиків діаметрально протилежно щодо об'єкта контролю та включення їх у коливальні контури автогенераторів, частоти яких однакові при надходженні бездефектних деталей. При проходженні під одним з ВСП ділянки поверхні з дефектом частота автогенератора, який включений цей ВСП, зміниться, що призведе до спрацьовування порогового пристрою і включення індикатора дефекту і виконавчого пристрою, керуючого роботою механізму розбракування. Введення у схему блоку затримки усуває пропуск дефектів у момент перемикання автогенераторів.

Порівняно з дефектоскопами, що використовують амплітудний, частотний та фазовий детектори, час вимірювання дефектоскопа ДВТ у 5-6 разів менший унаслідок використання у ньому цифрових методів обробки інформації. Це дає можливість значно підвищити швидкість дефектоскопа, збільшити кількість ВСП, швидкість переміщення об'єктів контролю та внаслідок цього підвищити продуктивність автоматичного контролю.

Технічні характеристики дефектоскопа такі:

поріг чутливості – тріщина завдовжки  $>2$  мм;

максимальний зазор між ВСП та об'єктом контролю – 300 мкм;

частота струму збудження – 1,3 МГц;

максимальна швидкість переміщення – 5 м/с;

продуктивність контролю – не менше 5600 год<sup>-1</sup>;

параметри ВС перетворювача:

середній діаметр ВСП – 1,35-1,5 мм;

кількість датчиків – 16 шт.

Габарити приладу 120×190×325 мм,

маса – 5,2 кг,

потужність споживання – 50 Вт.

*Спеціалізований вихрострумовий дефектоскоп ВД-30* призначений для виявлення порушень суцільності та дефектів у вигляді поверхневих тріщин при виготовленні, ремонті та відновленні вузлів та деталей



вантажного залізничного рухомого складу, забезпечуючи тим самим належний технічний стан та безпеку. Дефектоскоп має ручне виконання. Зовнішній вигляд приладу задовольняє сучасні вимоги, він показаний на рис.1.1.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд дефектоскопу ВД-30

Дефектоскопом забезпечується здійснення контролю за грубо обробленим плоским і криволінійним поверхням виробів з феромагнітного матеріалу, при цьому не пред'являється жорстких вимог до зовнішніх умов - контроль можна проводити як в лабораторних, так і в цехових умовах депо і ремонтних заводів.

Принцип роботи дефектоскопа заснований на вимірі зсуву фаз між двома квазісинусоїдальними сигналами, один з яких – опорний, а інший – сигнал, що знімається з вимірювальних котушок вихрострумовевого перетворювача (ВСП). Збудження вихрових струмів у поверхневих шарах контрольованого матеріалу проводиться за допомогою подачі на котушку збудження синусоїдального сигналу частотою 75 кГц. Датчик виконаний за

диференціальною схемою, вимірювальні котушки включені зустрічно, послідовно. При встановленні ВСП на поверхню контрольованого об'єкта виникає розбаланс напруги в котушках через більший вплив магнітного поля від наведених вихрових струмів на ту котушку, яка знаходиться ближче до контрольованої поверхні. Цей розбаланс виявляється у зміні повного електричного опору, тобто фази напруги вимірювальної обмотки. Фазовий зсув при встановленні ВСП на бездефектній і дефектній ділянці перетворюється електронною схемою дефектоскопа в постійну напругу, оцифровується і як умовного числа виводиться на рідкокристалічний дисплей.

Прилад забезпечений необхідними засобами налаштування та керування. Дефектоскоп забезпечує автоматичне налаштування нуля ВСП: оператор встановлює ВСП на бездефектну ділянку контрольованого виробу та прилад автоматично встановлює нуль датчика.

Установка порога спрацьовування сигналізації може здійснюватися автоматично чи вручну, величина порога індикується як грубо по лінійці, а й у оцифрованому вигляді. Ручне встановлення краще при виявленні дефектів з малими значеннями сигналів. Налаштування порогів спрацьовування сигналізації проводиться на стандартному зразку ВЗО 8727,01 та зразках зазору 0,5 мм та 3 мм, що входять до комплекту *дефектоскопа ВД-30НК*.

Для контролю матеріалів із неоднорідними магнітними властивостями передбачено автоматичний режим роботи. При цьому прилад не сприймає повільні зміни сигналу, а реагує тільки на швидкі, властиві тріщинам і межах сколів. Робота в цьому режимі проводиться скануванням ВСП по контрольованій поверхні зі швидкістю не менше 50 мм/сек, сигнал від дефекту на дисплеї не індикується, а спрацьовує лише сигналізація дефекту. Для виміру необхідно на цій ділянці перейти в ручний режим, компенсувати 0 ВТП та виміряти величину тріщини.

Необхідна інформація про робочий стан приладу відображається на РК-дисплеї, який виводить інформацію у верхньому та нижньому рядках. На

рис. 1.2. наведено приблизне зображення рідкокристалічного дисплея з інформацією, що відображається.



Рисунок 1.2 – Інформація, що відображається на рідкокристалічному дисплеї приладу ВД-30

У верхньому рядку індикатора відображаються: режим роботи приладу (автоматичний (АВТ) або ручний (РУЧ)); чутливість: глибина тріщини 0,5 мм чи 3 мм; стан розрядки акумулятора; умовна глибина тріщини. У нижньому рядку відображається лінійка умовної глибини тріщини та рівень порога спрацьовування сигналізації (▼).

*Вихрострумний дефектоскоп ДТ-4М* призначений для контролю зовнішньої поверхні обсадних труб діаметром 146-325 мм. Прилад відрізняє простота та низька вартість експлуатації за високої продуктивності та надійності. У зв'язку з особливостями експлуатації обсадних труб якості їх зовнішньої поверхні пред'являються жорсткі вимоги, зокрема, неприпустимість присутності несучільностей глибиною понад 0,5 мм. У той же час велика різноманітність дефектів прокатного характеру, а також дефектів, пов'язаних з якістю вихідного металу, не дозволяє для їх виявлення обмежитися одним методом контролю, наприклад, ультразвуковим, застосувавши його одночасно для виявлення інших дефектів, що залягають у всій товщі стінки труби, а також на її внутрішній поверхні.

В результаті розробки та випробувань була забезпечена чутливість до дефектів типу штучної тріщини глибиною 0,5 мм при довжині 50 мм. При цьому досягається цілком достатня чутливість до дефектів прокатного характеру, що входять під гострим кутом у метал (закати, полони).

Забезпечується продуктивність контролю до 1 м/с завдяки застосуванню удосконалених перетворювачів з ширшою доріжкою контролю. Розширено діапазон залежності між величиною амплітуди сигналу та глибиною тріщини (при глибині тріщини не більше 1,5 мм). Дефектоскоп ДТ-4М оснащений інтерфейсом зв'язку з ЕОМ задля забезпечення можливості обробки інформації з дефектоскопа. Для індикації наявності дефектів використовується світлова індикація. Маса електричного блоку приладу 15 кг.

*Вихрострумний дефектоскоп ВД-87НСТ* призначений для виявлення поверхневих дефектів у сталях та сплавах з питомою електричною провідністю в діапазоні від 0,3 до 54 МСм/м та підповерхневих дефектів у виробках з неферомагнітних металів та сплавів з питомою електричною провідністю від 0,3 до 32 МСм/м.

Виявлення як поверхневих, так і підповерхневих дефектів у широкому діапазоні провідності матеріалів досягається завдяки можливості зміни основних параметрів режиму контролю: частоти та струму збудження перетворювача, фази опорної напруги та коефіцієнта посилення тракту обробки сигналу, а також використання набору спеціальних вихрострумних перетворювачів.

У разі контролю плоских поверхонь або поверхонь з великим радіусом кривизни для виявлення поверхневих дефектів у виробках з різною електричною провідністю слід вибрати перетворювач ПН-10ТД2, що має високу чутливість. Для контролю виробів, що мають криволінійні поверхні чи інші складні конфігурації, рекомендуються перетворювачі ПН-15ТД4, ПН-15ТД5. Для виявлення підповерхневих дефектів у титанових і нержавіючих сплавах слід використовувати перетворювач ПН-20ТД5, а у виробках з алюмінієвих сплавів-перетворювач ПН-20ТД6. У дефектоскопі можуть бути використані інші типи та конструкції диференціальних вихрострумних перетворювачів, що працюють в діапазоні частот генератора, що перебудовується, що розширює експлуатаційні можливості

роботи дефектоскопа. Контактні поверхні осердя перетворювачів мають зносостійке покриття, виконане методом засклення.

У дефектоскопі є автоматична компенсація початкового сигналу, що дозволяє адаптуватися до об'єкта контролю, і екранний оперативний пристрій, що відображає кількісне значення режимних параметрів, а також вимірює квадратурні складові корисного сигналу.

Високі технічні характеристики дефектоскопа досягаються за рахунок наступних додаткових пристроїв та можливостей:

1. Наявність набору перетворювачів для зовнішніх та внутрішніх дефектів.
2. Наявність екранного оперативного пристрою, що дозволяє виводити на екран ЕПТ режимно-графічну інформацію.
3. Можливість оперативної перевірки працездатності дефектоскопа із використанням вбудованого пристрою автоконтролю.
4. Автоматична компенсація початкового сигналу у широкому діапазоні.
5. Оперативне встановлення основних режимних параметрів контролю.
6. Можливість функціонального використання.
7. Можливість поєднання з персональною ЕОМ.

Вихрострумний дефектоскоп ВД-87НСТ є ефективним засобом контролю і може знайти застосування в умовах ремонтних та виробничих підприємств авіаційної, машинобудівної та інших галузей промисловості, а також під час проведення науково-дослідних робіт.

На рис.1.3. представлений зовнішній вигляд дефектоскопу ВД-87НСТ.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд дефектоскопу ВД-87НСТ

Технічні характеристики дефектоскопу:

1. Поріг чутливості до поверхневих дефектів – виявлення штучного дефекту на зразку з алюмінієвого сплаву з розмірами, мм: глибина –  $0,2 \pm 0,02$ ; ширина –  $0,1 \pm 0,02$ .

2. Поріг чутливості до підповерхневих дефектів – виявлення на зразку зі сплаву протяжного дефекту шириною 0,3 мм і глибиною 30% від товщини зразка.

3. Максимальний робочий зазор між перетворювачем та контрольованою поверхнею – 0,2 мм.

4. Індикація – світлова, звукова, ЕЛТ.

5. Габаритні розміри електронного блоку –  $170 \times 270 \times 350$  мм.

6. Маса електронного блоку – 9 кг.

Усі відомі технічні показники описаних пристроїв електромагнітної дефектоскопії зведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики електромагнітних дефектоскопів

Технічні характеристики	ЛД	ВД-20П	ДВТ-6	ДТ-4М	ВД-87НСТ
Поріг чутливості, мм:	0,25	2	–	0,5	0,1
– глибина	0,2	–	2	50	2
– довжина	–	0,2	–	0,05	0,2
– ширина					
Продуктивність	–	3	5	1	0,1
Індикація	стрілочна, звукова	світлова	світлова	світлова	світлова, звукова
Габаритні розміри, мм	180×130×50	480×220×415	120×190×325	–	170×270×350
Маса, кг	0,55	3,5	5,2	15	9

## РОЗДІЛ 2

### ІНФОРМАТИВНІ ПАРАМЕТРИ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

#### 2.1 Параметри контролю

Зміна параметрів що контролюються або зміна умов проведення контролю в більшості випадків має зв'язок зі зміною сигналу вимірювальної обмотки вихрострумowego перетворювача. Іншими словами, якщо хоча б один із параметрів змінюється, ця зміна призводить до зміни сигналу вихрострумowego перетворювача.

Вихрострумові методи неруйнівного контролю відносяться до багатопараметричних методів. Це має як і свої переваги, так і недоліки. До переваг можна віднести те, що багатопараметровість виміру надає змогу вести контроль за різними параметрами контрольованого об'єкта. Недоліком який впливає з переваг є те, що кількість чинників які можуть вплинути на результат контролю збільшується і це призводить до ускладнення виділення якогось конкретного контрольованого параметра.

Фактори, які мають вплив на виміри можна розділити на дві категорії:

#### 1. Геометричні:

- зазор, що виникає між вихрострумовим перетворювачем та об'єктом контролю;
- близькість до краю об'єкту контролю;
- перехід від одних до інших геометричних розмірів, наприклад зміна товщини стінки;
- шорсткість поверхні.

#### 2. Структурні:

- контролю термообробка;
- магнітна проникність матеріалу об'єкту контролю;



- наклеп;
- зернистість;
- електрична провідність матеріалу об'єкту;
- хімічний склад.

Через існування зазначених вище чинників виникає необхідність вирішення проблеми з виділенням окремої складової сигналу вихрострумове перетворювача, що несе в собі необхідну інформацію. Для цього існує узагальнений параметр вихрострумове контролю, що є величиною яка характеризує умови вихрострумове контролю.

Це безрозмірна величина, що характеризує властивості перетворювача, об'єкта контролю, або умови контролю:

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu\mu_0\sigma},$$

де  $R$  – радіус еквівалентного витка обмотки вихрострумове перетворювача,  $\omega$  – частота струму обмотки збудження,  $\mu\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність середовища, в якому відбувається контроль,  $\sigma$  – питома електрична провідність середовища, в якому відбувається контроль.

На основі аналізу наведеної формули можна зробити висновки про те, що питома електрична провідність має значно менший вплив на вихідний сигнал вихрострумове перетворювача ніж магнітна проникність матеріалу з якого виготовлений ОК. Це можна пояснити тим, що при контролі феромагнітних матеріалів їх магнітна проникність напряму пов'язана з намагніченістю і може змінюватися в ширших межах, тоді як питома електропровідність навпаки має незначні зміни. З усього цього випливає, що істотним фактором, що створює завади при проведенні контролю параметрів ОК, що пов'язані з електропровідними властивостями і без компенсування якого проведення контролю неможливе є зміна магнітної проникності ОК.

## 2.2 Методи виділення корисної інформації

Одним з методів виділення корисної інформації є амплітудний метод, який застосовується якщо виміряти зміну фази не є доцільним рішенням або через її незначну зміну, або через велику кількість заважаючих факторів. Якщо в приладі вирішено реалізувати цей метод, то до його складу необхідно включити амплітудний детектор, який дозволить відслідковувати зміну амплітуди сигналу, що пов'язаний з контрольованим параметром. Коли контрольований параметр досягне певного критичного значення, або іншими словами порогового рівня амплітуди спрацює сигнал дефекту на дефектоскопі (рис. 2.1). Зміна фази або частоти вимірюваного сигналу на показання приладу не впливає.

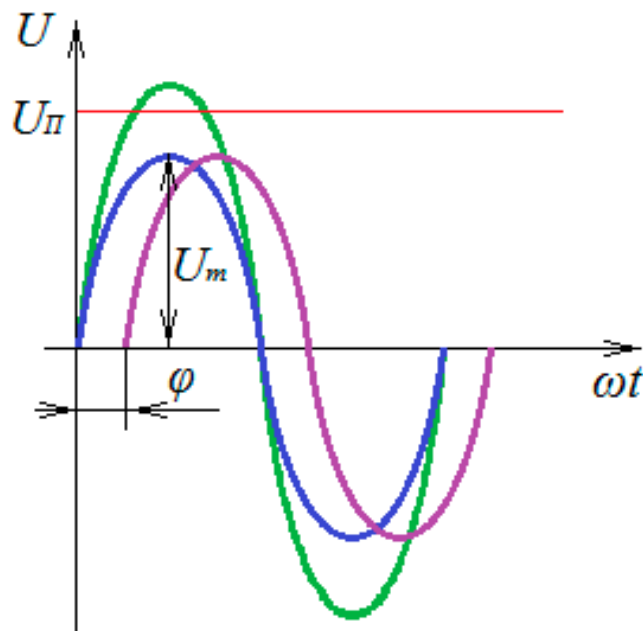


Рисунок 2.1 – Спосіб виділення інформації по амплітуді

Іншим методом виділення корисної інформації є фазовий спосіб, який застосовується, якщо виміряти зміну амплітуди не є доцільним рішенням або через її незначну зміну або через велику кількість заважаючих факторів. Якщо в приладі вирішено реалізувати цей метод, то до його складу необхідно

включити фазовий детектор, який дозволить відслідковувати зміну фази сигналу, що пов'язаний з контрольованим параметром.

Ще одним способом є частотний спосіб, для реалізації якого в схему дефектоскопа включають коливальний контур (рис. 2.2, а). В основі функціонування такого контуру лежить збільшення індуктивного опору вихрострумів перетворювача і зменшення при цьому ємнісного опору конденсаторів, включених в цей контур при зменшенні або при збільшенні частоти (рис. 2.2, б). Коли досягається резонансна частота, амплітуда сигналу вихрострумів перетворювача різко збільшується. Таким чином у випадку використання найпростішого коливального контуру ширина частоти резонансу і амплітуда струму, рис 2.2,в, можна визначити через його добротність:

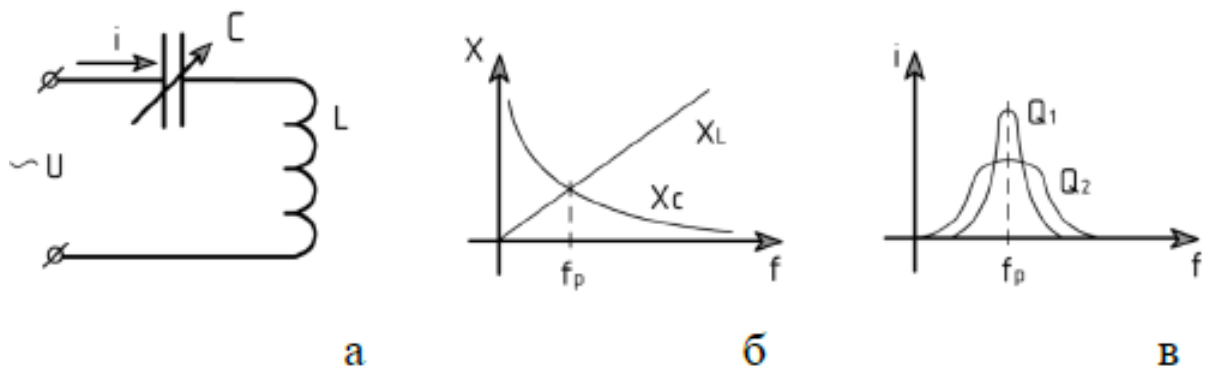


Рисунок 2.2 – Послідовний коливальний контур: електрична схема (а), визначення резонансної частоти (б), визначення ширини пропускання (в)

### 2.3 Годографи на комплексній площині

Зміна параметрів вихрострумів контролю призводить до зміни фази або амплітуди, що в свою чергу викликає зміну положення вектору на комплексній площині. Траєкторія руху кінця цього вектору на комплексній площині при цьому може бути кривою абсолютно будь-якої форми. Отже,

годограф на комплексній площині – траєкторія руху кінця вектору (рис.2.3). На приведеному рисунку зображено зміну від  $U$  до  $U''$  послідовно.

Аналіз годографів дозволяє нам відрізнити вплив контрольованого параметру від впливу різноманітних перешкод, оскільки зміни різних параметрів ОК по різному впливають на різні параметри сигналу вихрострумowego перетворювача.

Розглянемо на прикладі накладного вихрострумowego перетворювача розміщеного над феромагнітним півпростором (об'єктом значної товщини) аналіз годографа. Під час аналізу під годографом вихрострумowego перетворювача будемо розуміти геометричне місце кінця вектора напруги або ЕРС на комплексній площині яке ми отримуємо в результаті зміни різних параметрів, таких як: зміна питомої електричної провідності, зміна частоти, зміна відносної магнітної проникності, зміна геометричних розмірів об'єкта контролю, зміна інших факторів, що можуть вплинути на результати виміру.

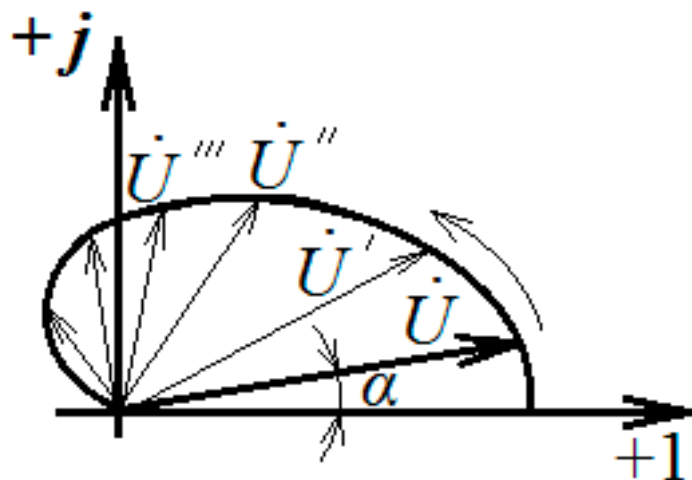


Рисунок 2.3 – Приклад годографа вектора

В четвертому квадранті комплексної площини розташований годограф, який характеризує зміну внесеної напруги для неферомагнітних матеріалів. За внесену напругу будемо приймати зріст напруги після виходу з вимірювальної котушки вихрострумowego перетворювача яке пояснюється внесенням в його електромагнітне поле ОК. Стрілкою тут показана зміна

узагальненого параметра  $\beta$  яка пов'язана зі збільшенням питомої електричної провідності ОК.

Коли відбувається зміна відносної магнітної проникності стрілка годографа прагне в перший квадрант. На рис. 2.4 зображено годограф для значень  $\mu = 2, 5, \rightarrow \infty$ . Напрямок зростання вказано стрілкою.

Слід зазначити що якщо орієнтуватися тільки на зміну амплітудного значення напруги, що виникає на вимірювальній котушці вихрострумowego перетворювача роздільний контроль електропровідності і магнітної провідності не є можливим.

Таким чином припустивши, що вихідним вектором напруги є  $a$  коли збільшується питома електрична провідність ( $\beta$  з 1.25 до 2.5) суттєво підвищується довжина вектору, в той час як фаза змінюється не дуже істотно. Коли збільшується магнітна проникність паралельно можна побачити значне підвищення амплітуди. Відповідно по зміні амплітуди можемо аналізувати яким саме фактором викликана зміна сигналу вихрострумowego перетворювача.

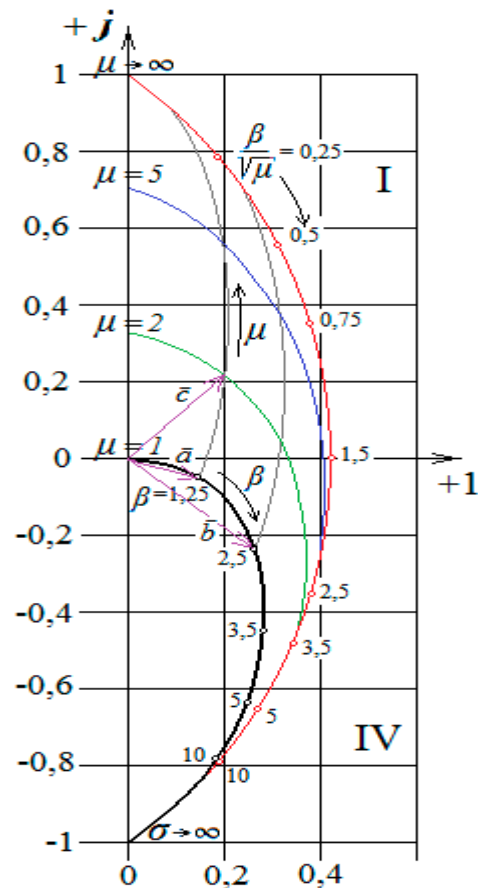


Рисунок 2.4 – Годограф для накладного вихрострумowego перетворювача, що знаходиться над феромагнітним провідниковим півпростором, на якому показано внесену напругу

Проте як наслідок спостерігаємо різку зміну фази, причиною чого є зміна магнітної проникності. Як результат можна виконувати роздільний контроль двох інформативних параметрів об'єкту контролю аналізуючи зміну амплітуди і фази на годографі вихрострумowego перетворювача.

Рівень розвитку сучасної дефектоскопії дозволяє встановлювати на дефектоскопи екрани, на які можна вивести комплексну площину. Це призводить до того, що сучасні дефектоскопи мають більше можливостей для послаблення впливу факторів, що вносять похибку ніж старі дефектоскопи зі стрілочними індикаторами які дозволяли оцінити тільки амплітудні значення сигналів вихрострумowego перетворювача.

Якщо значення магнітної проникності більше 30 роздільний контроль інформативних параметрів перестає бути можливим.

## РОЗДІЛ 3

### ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

#### 3.1 Класифікація пристроїв електромагнітної дефектоскопії

При класифікації пристроїв електромагнітної дефектоскопії необхідно враховувати взаємозамінність та зміну компонентів структури приладу, наприклад, залежно від об'єктів контролю або умов проведення контролю. Тобто слід виділяти кілька класифікаційних ознак, якими можна класифікувати електромагнітні прилади. Розглянемо кожну з цих ознак та відповідну їй класифікацію.

Одна з класифікаційних ознак – тип використовуваного в дефектоскопії ВС перетворювача (щодо положення перетворювача та об'єкта контролю). Залежно від типу ВСП виділяють:

- прилади із прохідними датчиками,
- прилади з накладними датчиками,
- прилади з комбінованими перетворювачами.

Характер розміщення перетворювача щодо об'єкта контролю визначається, головним чином, геометричними розмірами та формою об'єкта контролю, тому застосування приладу з тим чи іншим типом ВСП обґрунтовується формою, розмірами об'єкта контролю. Прокідний перетворювач являє собою пристрій, який у процесі контролю (руху об'єкта контролю або перетворювача) проходить або зовні об'єкта, охоплюючи його або всередині об'єкта. В результаті чого в зоні контролю забезпечується однорідне електромагнітне поле і перетворювачем формуються сигнали, що не залежать від радіальних зсувів довгого однорідного виробу. Поріг

чутливості дефектоскопів з прохідними перетворювачами зазвичай визначається глибиною довгого вузького поздовжнього дефекту, вираженої у відсотках від поперечного розміру (діаметра) деталі. Застосовують прилади з прохідними перетворювачами для контролю лінійно-протяжних об'єктів, наприклад, дрiт, прутки, труби, вироби прокату тощо, а також масовий контроль дрібних виробів типу кульок і роликів підшипників [2, 3, 4].

Такі перетворювачі мають розміри, підібрані відповідно до розмірів об'єкта контролю, а форма котушок перетворювача може бути як циліндричної, так і іншої форми поперечного перерізу. Крім того, прохідні перетворювачі розрізняються за конструктивним виконанням: залежно від розташування, кількості, форми та розмірів вимірювальних та збуджуючих котушок, наявності системи підмагнічування. Накладні перетворювачі зазвичай є однією або кількома котушками, до торців яких підводиться поверхня об'єкта контролю. Кути нахилу котушок перетворювача та форми перерізу можуть бути різноманітні. Застосовують перетворювачі з круглими коаксіальними котушками, прямокутні, прямокутні хрестоподібні, котушки з взаємно перпендикулярними осями та ін. [3, 6]. Найбільш поширене використання накладних ВТП при контролі плоских поверхонь, листів та у разі, коли необхідно забезпечити локальність або високу чутливість контролю. Поріг чутливості дефектоскопів з накладними перетворювачами визначається зазвичай у абсолютних одиницях за глибиною та протяжністю вузького дефекту. Багатоелементні конструкції, що складаються з окремих накладних перетворювачів із сердечником, забезпечують охоплення значної поверхні при контролі або, концентруючи електромагнітне поле, дозволяють оцінювати стан контрольованої поверхні в дуже малій зоні. Комбінований перетворювач складається з кількох котушок (вимірювальних, збуджуючих), які є обмотками як прохідного, так і накладного типів. Комбіновані перетворювачі використовуються значно рідше за прохідні та накладні перетворювачі [2]. Це обмеженими можливостями їх застосування. Однією з сфер їх використання є контроль металевих куль на наявність тріщин. При



цьому дві збудливі котушки розміщують взаємно перпендикулярно, а кільцеву вимірювальну котушку поміщають між ними посередині.

Особливий різновид являють собою *прилади з екранними ВСП*, що відрізняються тим, що у них збуджувальні та вимірювальні обмотки розділені контрольованим об'єктом. Розрізняють накладні екранні ВСП та прохідні екранні ВСП. Робота екранних перетворювачів заснована на використанні енергії електромагнітного випромінювання, що пройшло. Хоча екранні накладні та прохідні перетворювачі служать для контролю об'єктів, що мають різні геометричні форми та розміри, загальним для них є можливість двостороннього доступу до об'єкта контролю. Області застосування приладів з екранними ВСП можуть бути: з екранними накладними ВСП – контроль листів, фольги, тонких пластинок, а з екранними прохідними ВСП – контроль труб тощо [2, 3].

Вихроструміві дефектоскопи можна класифікувати за режимом роботи дефектоскопа. Виділяють:

- дефектоскопи, що працюють у статичному режимі;
- дефектоскопи, що працюють у динамічному режимі
- універсальні дефектоскопи.

Історично склалося так, що в процесі розвитку електромагнітного методу першими було створено дефектоскопи, що працюють у статичному режимі [4]. Цей режим забезпечує виявлення дефектів ОК при безпосередньому отриманні сигналів дефектів, що знімаються з первинного перетворювача. У статичних приладах використовуються мостові, резонансні та автогенераторні схеми виявлення сигналів дефекту в інформаційному сигналі від перетворювача. При цьому суттєвим недоліком статичних дефектоскоп є відносно низька продуктивність контролю. Це пояснюється тим, що активна зона контролю визначається «плямою» вихрових струмів, наведених у контрольованому матеріалі, яку, як відомо, для підвищення чутливості до протяжності тріщин прагнуть зробити якнайменше. В результаті, зменшуючи діаметр ВСП, відбудеться скорочення площі ОК під

час проходження ВСП з його поверхнею. При вибіркового чи точкового контролю це не позначиться на продуктивності дефектоскопії. Однак, при вирішенні задачі автоматизації контролю, контролю всієї поверхні виробу навіть невелике зменшення «плями» ВС викличе суттєве збільшення витрат на здійснення контролю, тобто зниження продуктивності. Ще однією з особливостей статичного режиму є те, що інформація про стан контрольованої ділянки поверхні знімається миттєво та не потребує часу на обробку. Але застосування високої швидкості руху перетворювача обмежується інерційними властивостями індикації типу стрілочного індикатора. При контролі ОК за допомогою статичного дефектоскопа здійснюється рух лише ВС перетворювача за нерухомого ОК.

Як приклад, що ілюструє роботу статичного дефектоскопа, можна розглянути принцип роботи, на якому реалізований один з дефектоскопів, що широко застосовувалися [4]. Дефектоскоп призначений для контролю труб та прутків із немагнітних сплавів. Робоча частота приладу була змінною і вибиралася залежно від марок та матеріалу та типу контрольованих деталей. Дефектоскоп виконаний за мостовою схемою. Перед початком роботи міст балансувався на нуль за контрольованим зразком. При проходженні дефектного місця в одній із котушок перетворювача міст розбалансувався. Такий самий ефект викликала зміна діаметра прутка або електропровідності контрольованого матеріалу, що обмежувало можливості застосування цього приладу. Пізніше поширення набули прилади, що дозволяють позбутися деяких типів заважаючих чинників, у яких використовується фазова відбудова, багаточастотні канали, стежачі системи та інших. Подача напруги на вертикально-відхиляючі пластини ЕПТ здійснюється через фазокоректуючі ланцюги та підсилювач від вимірювальної обмотки перетворювача. На горизонтально-відхиляючі пластини напруга подається безпосередньо від генератора високої частоти – у разі використання методу еліпса. Фаза цієї напруги за допомогою фазорегулятора може змінюватися в досить широких межах, що необхідно для того, щоб отримати відображення

на екрані прямої лінії замість еліпса. У цьому випадку за наявності тріщини в робочій зоні перетворювача на екрані з'являється зображення еліпса, нахилоного до горизонтальної осі.

До категорії динамічних або модуляційних [2, 3] відносяться всі пристрої, в яких перетворювач рухається відносно контрольованого продукту (або навпаки) з достатньо високою швидкістю. Обробка сигналу здійснюється шляхом аналізу форми огинаючої високочастотного сигналу, викликаної його модуляцією полем дефекту. Тобто при взаємному русі ОК і ВСП зміна властивостей розподіленого в просторі об'єкта перетворюється на зміну сигналу в часі. Сигнал, отриманий від перетворювача, підсилюється і детектується, а потім аналізується огинаюча високочастотних коливань. Можливість роздільного керування різними факторами визначається різницею у формі імпульсів сигналу, що призводить до появи відповідних варіацій їх спектру. Обробка сигналів здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, які аналізують спектр огинаючої, тривалість імпульсів різного рівня на заданому інтервалі часу та послідовність їх появи. У загальному випадку для аналізу можна використовувати методи теорії розпізнавання образів, а за основу можна взяти статистичні дані про сигнали від контрольованих параметрів і заважаючих факторів. Схеми приладу містять підсилювачі огинаючої (ННЧ), фільтри та блок розпізнавання сигналу, включені послідовно між детектором та індикатором. При високій швидкості управління, яка характерна для пристроїв цього типу, можна досить простими засобами налаштувати такі заважають фактори, як плавні зміни магнітної проникності, електропровідності, товщини стінки труби, діаметра тощо. Сутність полягає в тому, що короткі різкі розриви в контрольованому матеріалі, наприклад, тріщини, призводять до різкої зміни сигналу, отриманого від перетворювача, тоді як, наприклад, зміни товщини стінки труби призведуть до плавної зміни сигналу. Використовуючи частотні фільтри, можна значно зменшити вплив факторів, що викликають плавну зміну форми сигналу.

Залежно від виду перетворення параметрів об'єкта у вихідну величину первинного перетворювача розрізняють:

- дефектоскопи на основі параметричного перетворення;
- дефектоскопи на основі трансформаторного перетворення.

*Метод параметричного перетворення* – це метод, заснований на реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів, що індукуються в ОК полем перетворювача шляхом зміни повного опору котушки перетворювача.

*Трансформаторний метод перетворення* – це метод, заснований на реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів, які індукуються збуджуючою котушкою в провідному елементі шляхом зміни ЕРС на затискачах вимірювальної котушки. Так, можлива реалізація параметричного методу лише з одним індуктором у перетворювачі [2, 4, 6] і трансформаторного методу, відповідно, з наявністю вимірювальної та збуджуючої котушок [2, 4, 6, 11].

Параметричні ВСП включають у схему, що перетворює зміну їх комплексного опору зміну амплітуди і фази (або частоти) напруги. При включенні параметричних ВСП до резонансних контурів, а також контурів автогенераторів підвищується абсолютна чутливість схеми і відношення сигнал/перешкода.

Часто параметричні ВСП включають мостові схеми, де два плечі моста утворюються обмотками робочого і зразкового ВСП, а два інших – резисторами.

Підбираючи параметри елементів моста можна домогтися зменшення впливу факторів, що заважають, на сигнали ВСП, а також високої чутливості до контрольованого параметра. Проектування та розрахунок параметричного перетворювача виробляють за схемами заміщення. На рис. 3.1 як приклад зображено схему заміщення параметричного перетворювача, призначеного для роботи з неферомагнітними ОК.

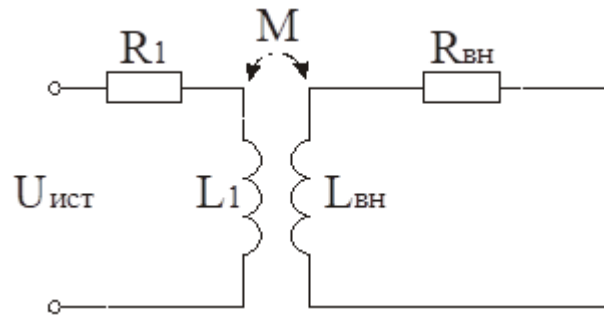


Рисунок 3.1 – Схема заміщення

Трансформаторні ВСП зазвичай включають за диференціальною схемою. При цьому можливі схема порівняння зі стандартним зразком та схема «самопорівняння». У першому випадку робочий та зразковий ВСП не пов'язані індуктивно і мають незалежні вимірювальну та збудливу обмотки. У другому випадку збуджуюча обмотка часто є загальною для двох вимірювальних. При диференціальній схемі включення підвищується стабільність роботи приладу. Однак у ряді випадків вимірювальну обмотку включають послідовно з компенсатором, що є регулятором амплітуди і фази напруги. При цьому компенсатор виконує роль зразкового ВСП: коли робочий ВСП контролює стандартний зразок, компенсатором встановлюють необхідну напругу компенсації, що дозволяє усунути нестабільність. При використанні диференціальної схеми зазвичай не виключається застосування компенсатора, який в цьому випадку необхідний для компенсації напруги небалансу, викликаного неідентичності робочого і зразкового ВСП і включається послідовно з вимірювальними обмотками зустрічно-включеними. Компенсатори часто виконують у вигляді різноманітних фазорегуляторів і атенюаторів, пасивних (RC- та LC-типів) та активних. Ефективні компенсатори у вигляді регуляторів дійсної та уявної складових вектора напруги, що компенсують.

Можна виділити окремі класи вихрострумівих дефектоскопів залежно від різновиду ВСП: дефектоскопи з одиничним ВСП та дефектоскопи з матричним ВСП (МВСП).

Одиничний вихрострумний перетворювач являє собою єдиний конструктивний, схемотехнічний пристрій як самостійний елемент у складі приладу, і виконує функції отримання фізичних сигналів, полів, випромінювань від ОК і перетворення їх в інформаційний сигнал зручний для передачі, обробки та візуалізації [2, 3, 4, 6, 11].

МВСП є більш складним конструктивним і схемним пристроєм, ніж одиничний ВСП. Існують різні види МВСП [2, 6, 10]. МВСП будуються на основі одиничних ВСП і як пристрій поєднує деяку необхідну кількість одиничних ВСП. Таким чином, МВСП являє собою пристрій, що складається з системи, призначеної для створення електромагнітного поля збудження на основі котушок індуктивності та магнітопроводу та набору вимірювальних зондів, також на основі котушок індуктивності. Функції, що виконуються системою МВСП ідентичні до функцій одиничного перетворювача. Перевагою та особливістю використання МВСП є те, що МВСП дозволяє здійснювати контроль з високою точністю по координатах і з високим ступенем повторюваності умов контролю та факторів, що заважають. Висока точність руху МВСП по поверхні ОК, в кілька разів більша площа сканування, в порівнянні з одиничним ВСП, істотно розширює функціональність, створюваних на основі МВСП дефектоскопів, збільшує продуктивність і чутливість контролю, у тому числі дозволяє здійснити візуалізацію дефектів, що виявляються, з точною координацією їх місце .

При розгляді вихрострумних перетворювачів виділяють технологічні та метрологічні характеристики перетворювачів. При цьому вони є взаємопов'язаними і тому створювана конструкція покликана враховувати всю сукупність взаємовпливів, що мають до того ж якісний вплив на достовірність контролю. До метрологічних параметрів відносять сукупність параметрів, що визначають достовірність контролю, у тому числі облік або відбудова від факторів, що заважають, вплив умов контролю. До технологічних характеристик відносять способи включення збудливих та вимірювальних котушок, форми та розміри котушок, їх розміщення та

взаєморозташування. Ці показники визначають конструктивне виконання ВСП.

Умови експлуатації дефектоскопічної апаратури та характер розв'язуваних за її допомогою завдань дозволяють ввести класифікаційну ознаку, згідно з якою пристрої електромагнітної дефектоскопії поділяють на наступні п'ять груп:

1 група – стаціонарні пристрої, які експлуатуються у закритих, опалюваних приміщеннях;

2 група – стаціонарні пристрої, які експлуатуються у закритих, неопалюваних приміщеннях;

3 група – пристрої, що перевозяться, що встановлюються на носіях (автомобіль, вагон і т.д.);

4 група - пристрої, що носяться, призначені для перенесення тривалий час як у включеному, так і вимкненому станах;

5 група – портативні пристрої, призначені для тривалого перенесення у ввімкненому стані.

Для кожної із виділених груп приладів є деякі зауваження. Зміст зауважень такий. Умови експлуатації пристроїв, що належать до 1 та 2 груп, характеризуються відсутністю механічних впливів. Для 3 групи характерна наявність механічних впливів, вібрацій та жорстких кліматичних умов. Прилади четвертої групи експлуатуються за умов менш жорстких механічних впливів, ніж апаратура 3-ї групи. Остання п'ята група характеризується наявністю слабких механічних та кліматичних впливів.

Таким чином, основні класифікаційні ознаки електромагнітних дефектоскопів можуть бути зведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація приладів

Ознака класифікації	Різновиди приладів
1. Тип ВСП (відносно положення перетворювача та об'єкту контролю)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• прилади з прохідними датчиками</li> <li>• прилади з накладними датчиками</li> <li>• прилади з комбінованими перетворювачами</li> </ul>
2. Режим роботи дефектоскопу	<ul style="list-style-type: none"> <li>• прилади зі статичним режимом роботи</li> <li>• прилади з динамічним режимом роботи</li> <li>• універсальні прилади</li> </ul>
3. Вид перетворення параметрів об'єкта у вихідну величину ВСП	<ul style="list-style-type: none"> <li>• прилади на основі параметричного перетворення</li> <li>• прилади на основі трансформаторного перетворення</li> </ul>
4. Вид застосованого ВСП	<ul style="list-style-type: none"> <li>• прилади з одиничним ВСП</li> <li>• прилади з матричним ВСП</li> </ul>
5. Виконання та умови експлуатації	<ul style="list-style-type: none"> <li>• стаціонарні прилади</li> <li>• прилади, що перевозяться</li> <li>• прилади, що переносяться</li> <li>• портативні прилади</li> </ul>

### 3.2 Принципи побудови пристроїв електромагнітної дефектоскопії

Під пристроєм дефектоскопії розуміють цілісну систему чи прилад, призначені для реалізації заходів щодо виявлення дефектів. Складовою частиною пристрою електромагнітної дефектоскопії є електромагнітна система. Говорячи про електромагнітні системи, мають на увазі перетворювачі, що входять до складу приладу або системи, що працюють на використанні явищ, що виникають при існуванні електричних і магнітних



полів, протіканні електричного струму, в тому числі вихрових струмів. Такий первинний перетворювач дозволяє за допомогою зазначених явищ перетворити інформацію, одержувану від ОК про його стан або параметри, сигнал зручний для передачі, обробки і візуалізації за допомогою технічних засобів і пристроїв. Принципи побудови електромагнітних перетворювачів (надалі вихрострумівих перетворювачів) засновані на принципах, що забезпечують можливість генерації та реєстрації електромагнітного поля, що враховують види та типи об'єктів контролю. З основних особливостей електромагнітного контролю, що визначають принципи побудови перетворювачів, зазначимо такі:

- наявність контрольованих об'єктів із матеріалів із досить високою електропровідністю;
- відсутність контакту струмопровідної системи перетворювача та ОК. Взаємодія перетворювача з ОК відбувається зазвичай на відстані невеликих, але достатніх для вільного руху перетворювача щодо ОК (від часток міліметра до декількох міліметрів);
- несприйнятливості сигналів ВСП до вологості, тиску та забрудненості газового середовища, радіоактивного випромінювання, забруднення поверхні ОК непровідними струмами речовинами;
- сигнал ОК, що знімається з первинного перетворювача – багатопараметровий. Це визначає переваги та труднощі реалізації методу. З одного боку, це дозволяє здійснювати контроль за декількома параметрами, з іншого боку, потрібні спеціальні прийоми для поділу інформації про окремі параметри об'єкта. При контролі одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача ставати заважає і цей вплив необхідно зменшувати;
- необхідність враховувати розміри та характеристики, передбачуваних дефектів, що виявляються.

З урахуванням принципів побудови та реалізації вихрострумівих перетворювачів, а також умов проведення контролю та об'єктів, що піддаються контролю, розроблено безліч різних вихрострумівих

перетворювачів. Зібрані відомості про конструкції та принципи побудови ВС перетворювачів є дуже інформативними та цінними матеріалами. Систематизація та класифікація цих відомостей дозволить дати чітке уявлення та навчить краще орієнтуватися серед безлічі різних конструкцій перетворювачів. Найбільш зручним способом представлення такої класифікації схемне рішення із зазначенням виділених ознак та зв'язків. Крім розробки класифікації розглянуті та представлені відомості у вигляді графічних схем конструкцій перетворювачів, включених до класифікації, зазначені особливості цих конструкцій, галузі використання, технічні деталі тощо.

У попередньому розділі розглядалися різноманітні класи електромагнітних дефектоскопів. Слід сказати що, оскільки як одна з класифікаційних ознак при класифікації пристроїв електромагнітної дефектоскопії було виділено тип використовуваного ВС перетворювача (щодо взаєморозташування перетворювача та об'єкта контролю) аналогічний спосіб класифікації використовується при безпосередньому розгляді конструкцій ВС перетворювачів – щодо розташування ВСП щодо ОК. Але докладніше зупинимось цих різновидах перетворювачів далі.

Запропонована класифікація побудована в такий спосіб, що враховуються з одного боку конструктивні параметри перетворювачів, з другого – фізичні перетворення електромагнітних полів в інформаційні сигнали.

Як головну класифікаційну ознаку обраний вид перетворення параметрів об'єкта у вихідну величину первинного перетворювача, таким чином, це відправна точка класифікації. Відповідно до цієї ознаки ВС перетворювачі розділені на трансформаторні та параметричні. Різні види ВС перетворювачів визначають різні методи вихрострумове неруйнівного контролю – параметричний і трансформаторний методи. ДСТУ EN 1330-2:2008 «Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 2. Загальні терміни

стосовно методів неруйнівного контролю» дано такі визначення цим методам.

*Параметричний метод перетворення* – метод, заснований на реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів, що наводяться в ОК полем перетворювача, зміни повного опору котушки перетворювача.

*Трансформаторний метод перетворення* – це метод, заснований на реєстрації електромагнітного поля вихрових струмів, які наводяться котушкою збудження в струмопровідному елементі зміни ЕРС на затискачах вимірювальної котушки.

Таким чином, параметричний перетворювач – перетворювач, що забезпечує перетворення параметрів об'єкта в активний, реактивний або комплексний опір індуктивної котушки; він будується на одній індуктивній котушці; трансформаторний перетворювач перетворює параметри об'єкта в напругу вимірювальної обмотки та будується з використанням не менше двох індуктивно зв'язаних котушок.

Визначити зазначену ознаку як основну при класифікації конструкцій перетворювачів не можна. Тому розглянемо наступний рівень класифікації ВСП – розташування ВС перетворювача щодо об'єкта контролю. Відповідно до нього параметричні ВСП поділяють на накладні та прохідні, а ВСП трансформаторні поділяють на накладні, екранні, комбіновані та прохідні.

Прохідний перетворювач являє собою пристрій, який у процесі контролю (руху об'єкта контролю або перетворювача) проходить охоплюючи контрольований об'єкт. Область застосування прохідних перетворювачів – це контроль лінійно-протяжних об'єктів, наприклад, дрiт, прутки, труби, вироби прокату тощо, а також масовий контроль дрібних виробів. Залежно від розташування, кількості, форми та розмірів вимірювальних та збудливих котушок, наявність системи підмагнічування виділяють ПП різного виду. У розробленій класифікації запропоновано поділ ПП на чотири види залежно від розташування перетворювача щодо об'єкта контролю. Вигляд прохідних перетворювачів зображено на рис. 3.2.

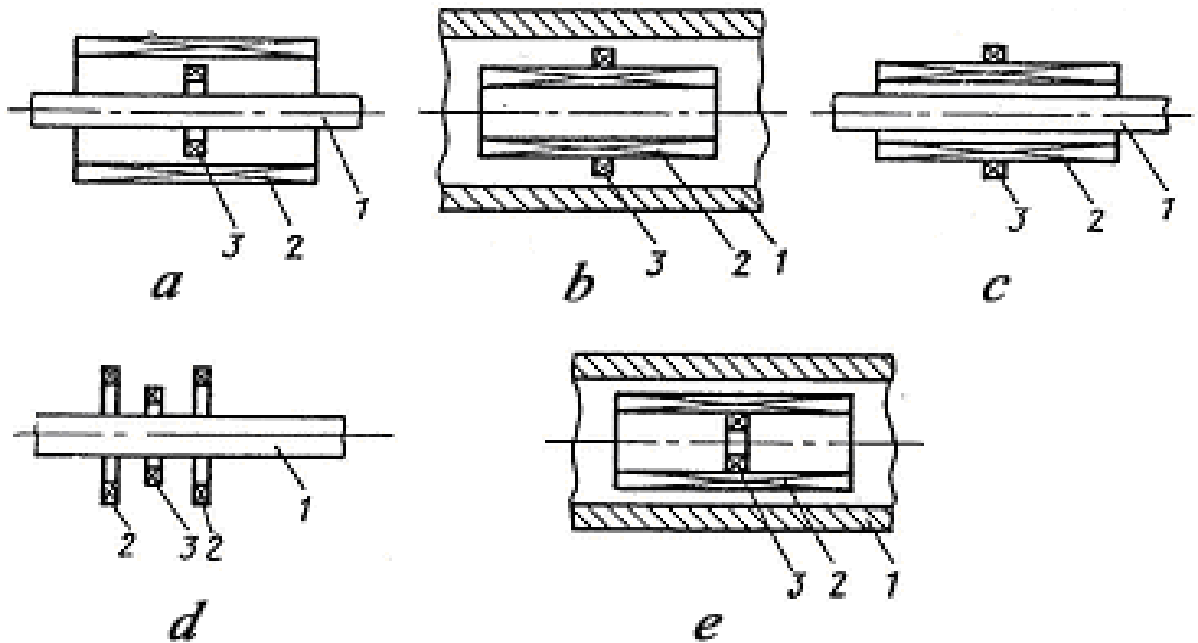


Рисунок 3.2 – Різновиди прохідних ВС перетворювачів

Внутрішній прохідний ВС перетворювач має обмотки, які вводяться всередину об'єкта, що контролюється. Зовнішній прохідний ВС перетворювач охоплює зовнішню поверхню об'єкта контролю, при цьому може забезпечуватись поступальний рух ВСП, а також обертальний рух. Занурювальний прохідний ВС перетворювач здійснює контроль параметрів ОК при зануренні його та ОК в рідке електропровідне середовище. Цей вид перетворювачів зображено на рис. 3.3.

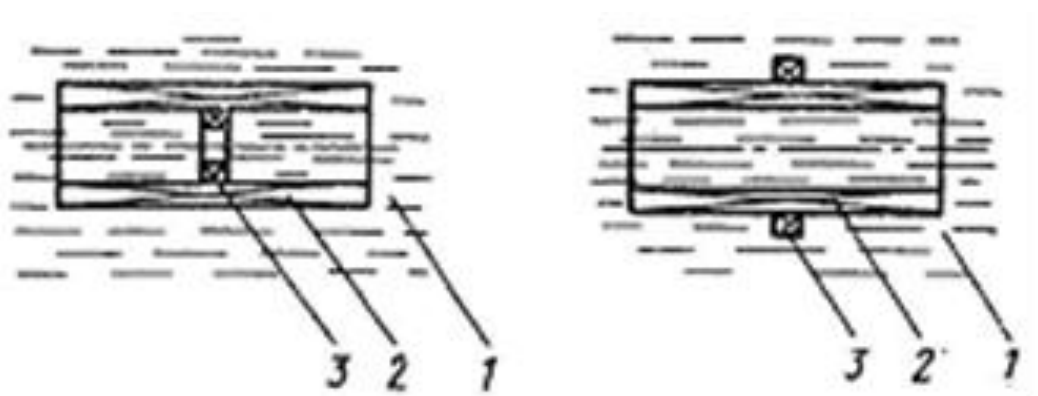


Рисунок 3.3 – Занурювальні ВС перетворювачі

Накладні перетворювачі розташовуються над поверхнею об'єкта контролюваного і до торців котушок перетворювача підводиться його поверхню. Кути нахилу котушок перетворювача та форми перерізу можуть бути різноманітні. Обмотки накладних ВСП можуть бути виконані у вигляді кругових коаксіальних витків, прямокутної форми, прямокутні хрестоподібні, котушки із взаємно перпендикулярними осями та ін. Приклади конструкцій накладних перетворювачів представлені на рис. 3.4 з різними видами та формами котушок.

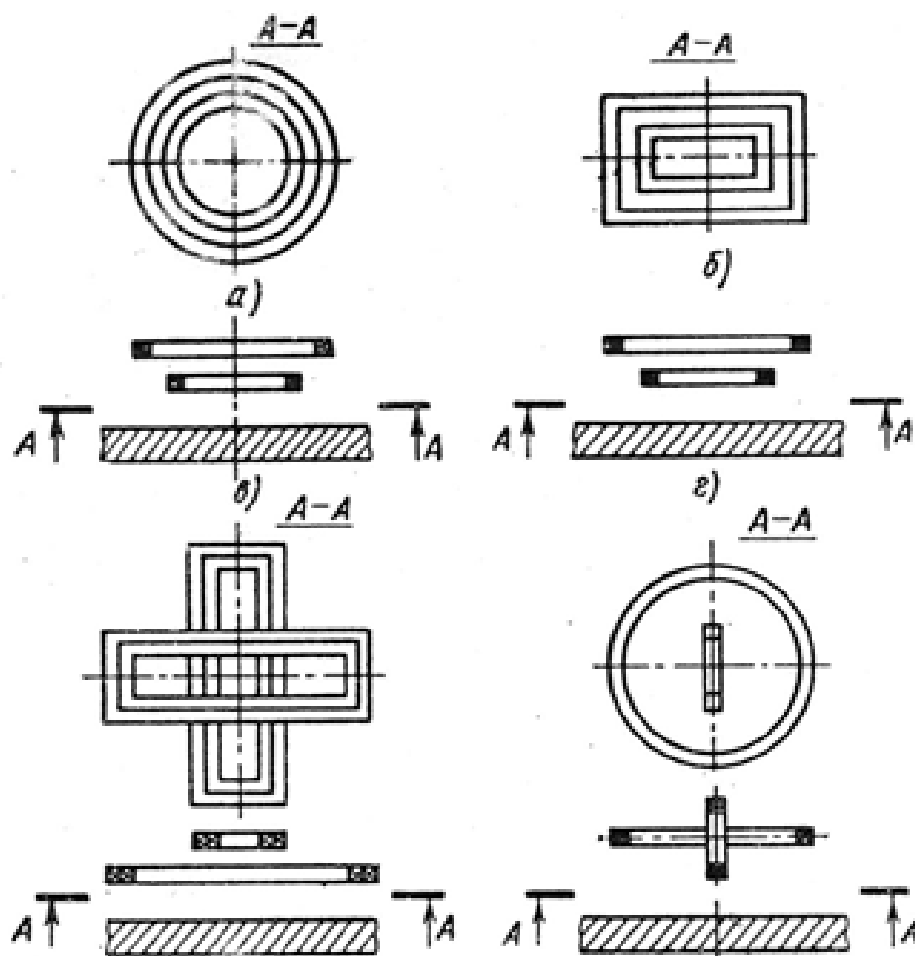


Рисунок 3.4 – Різновиди накладних ВС перетворювачів

а – ВСП із коаксіальними котушками;

б – ВСП із прямокутними котушками;

в – ВСП із прямокутними хрестоподібними котушками;

г – ВСП на основі котушок із взаємно перпендикулярними осями

Накладні перетворювачі мають ширші можливості контролю порівняно з прохідними. Вони дають змогу контролювати параметри об'єктів складної форми.

Слід зазначити, що в залежності від конфігурації та взаємного розташування збудливих та вимірювальних котушок щодо один одного, а також щодо об'єкта, що контролюється, можна отримувати певну необхідну інформацію для здійснення контролю виробів.

Комбінований перетворювач являє собою комбінацію ВС перетворювачів накладного та прохідного типів. Так, він складається з кількох котушок (вимірювальних, збуджуючих), які є обмотками як прохідного, так і накладного типів. Комбіновані перетворювачі використовуються значно рідше за прохідні і накладні перетворювачі. Це пояснюється обмеженими можливостями їх застосування. З можливих конструкцій цього типу перетворювачів використовуються, зображені на рис.3.5.

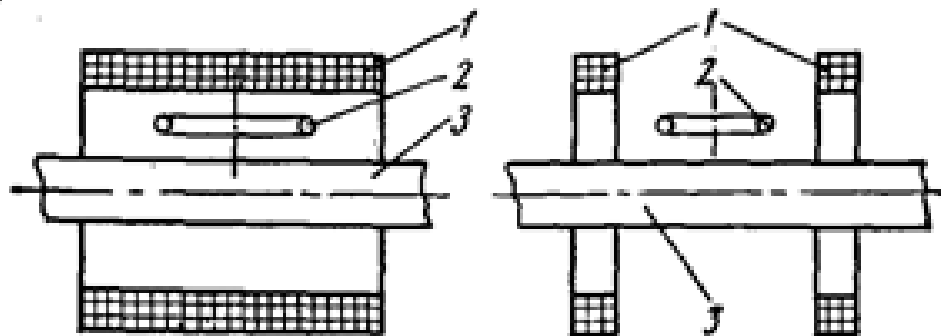


Рисунок 2.5 – Комбіновані ВС перетворювачі

Однією з сфер їх використання є контроль металевих куль на наявність тріщин. При цьому дві збудливі котушки розміщують взаємно перпендикулярно, а кільцеву вимірювальну котушку поміщають між ними посередині.

Вихрострумові перетворювачі екранного типу, відрізняються тим, що у них збуджувальні та вимірювальні обмотки розділені контрольованим об'єктом. Розрізняють накладні екранні ВСП та прохідні екранні ВСП. Робота екранних перетворювачів заснована на використанні енергії електромагнітного випромінювання, що пройшло. Хоча екранні накладні та прохідні перетворювачі служать для контролю об'єктів, що мають різні геометричні форми та розміри, загальним для них є можливість двостороннього доступу до об'єкта контролю. Области застосування приладів з екранними ВСП можуть бути: з екранними накладними ВСП – контроль листів, фольги, тонких пластинок, а з екранними прохідними ВСП – контроль труб тощо. На рис. 3.6, а, б представлені кілька варіантів конструкцій екранних ВСП перетворювачів прохідного типу, а на рис. 3.6, в – ВСП екранного накладного типу.

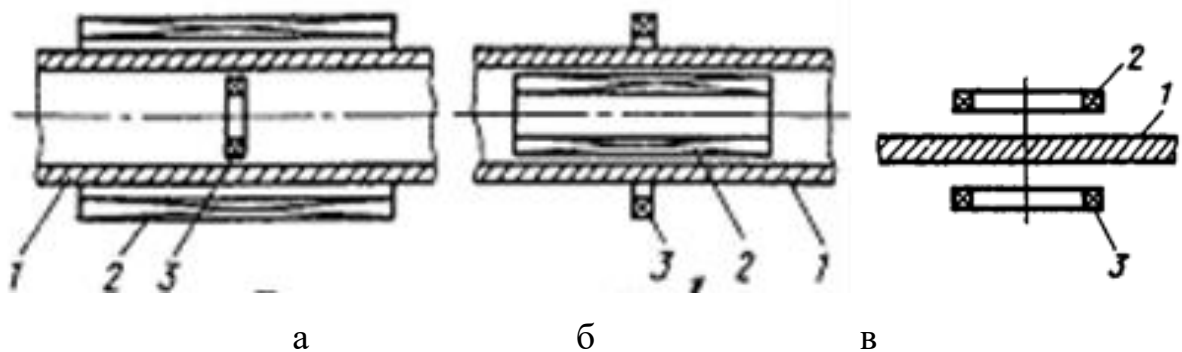


Рисунок 3.6 – Різновиди екранних ВСП перетворювачів

Однією загальною відмінністю переглянутих перетворювачів накладного, прохідного, комбінованого типів без елементів для концентрації електромагнітного поля (сердечників, магнітопроводів, екранів) є те, що локальність такого типу перетворювачів досягається зменшенням розмірів котушок.

## РОЗДІЛ 4

### ОСОБЛИВОСТІ МЕТРОЛОГІЇ ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

#### 4.1 Загальна класифікація вимірів

Одним з найбільш актуальних напрямів приладобудування ХХІ століття є створення ефективних приладів і систем для контролю якості продукції, оцінки та прогнозування стану об'єктів та пошуку можливих дефектів, що виникають в процесі експлуатації об'єктів.

Цьому напрямку належить до 25 відсотків вартості робіт у сучасному авіабудуванні, не набагато менше у залізничному та інших видах транспорту, енергетиці, будівництві та фактично у будь-якій іншій галузі. Таким чином, розвиток сучасної промисловості неможливий без розвитку та впровадження методів і засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Поява сучасних великомасштабних промислових об'єктів – атомних станцій, терміналів зі зрідженим газом, морських свердловин, великих хімічних комбінатів та авіалайнерів, дало людству не тільки економічну користь, але й негативні наслідки у разі виходу їх з ладу. Сьогодні людство не може відмовитись від таких споруд, але воно може попередити катастрофи чи зменшити їх наслідки.

Відомо, що розвинуті країни втрачають до 10 % свого національного доходу через низьку якість продукції, яка виготовляється. У всьому світі кожного року збільшується кількість значних аварій та катастроф. Збитки тільки від дефектів втомленості металу в США складають більш ніж 100 млрд. дол. на рік, від корозії – більш ніж 200 млрд. дол. на рік. В Україні



збитки від низької якості матеріалів і виробів значно вищі. Надійність та якість промислової продукції або промислових об'єктів у різноманітних галузях народного господарства можуть бути забезпечені за умови використання ефективної системи контролю якості. Контроль якості має виконуватись методами, після впровадження яких продукція або об'єкти можуть бути використані за прямим призначенням, тобто методами неруйнівного контролю.

Неруйнівний контроль – це частина широкої області науки – інтроскопії (внутрішнє бачення), яка охоплює також технічну і медичну діагностику, вивчення підземних структур, пошук прихованих предметів тощо. Відповідно до чинних стандартів і залежно від фізичних явищ, покладених в основу неруйнівного контролю, його поділяють на дев'ять основних видів: акустичний, радіаційний, магнітний, електромагнітний (вихрострумний), електричний, радіохвильовий, тепловий, оптичний та контроль проникаючими речовинами. Всі види контролю базуються на вимірюванні різноманітних фізичних величин, таких як температура, густина, сила струму, потенціал, різниця потенціалів, амплітуда, фаза і т.п. Кінцевий результат контролю полягає у порівнянні отриманих значень фізичної величини зі значеннями, що прийняті за зразкові.

У літературі по метрології зустрічається досить велика кількість варіантів класифікації видів вимірів [7]. Приведемо лише основні з них.

По числу виконаних спостережень або знятих показань засобів вимірів усі виміри ділять на однократні й багаторазові.

Однократним називають вимір, виконаний один раз.

У багатьох випадках на практиці виконуються саме однократні виміри, якщо результат вимірів задовольняє умовам конкретного вимірювального завдання.

Багаторазовим називають вимір фізичної величини одного розміру, результат якого отриманий з декількох наступних один за одним вимірів, тобто з ряду однократних вимірів.

Багаторазовий вимір виконують у випадку, коли випадкова складова похибки однократного виміру може перевищити необхідне за умовами значення. Виконавши ряд послідовних окремих вимірів (спостережень або показань), одержують один багаторазовий вимір, похибка якого може бути зменшена методами математичної статистики.

Залежно від способу одержання результату вимірів або числового значення вимірюваної величини всі виміри ділять на прямі, непрямі, спільні й сукупні.

Прямими називають виміри, у яких шукане значення фізичної величини знаходять безпосередньо з дослідних даних порівнянням даної величини із мірою цієї величини або з відліку показань засобу вимірів, градуйованого в одиницях цієї величини.

Прикладами прямих вимірів можуть бути виміри довжини лінійкою, маси – за допомогою ваг, електричної напруги – вольтметром і т.д. Прямі виміри є основою для більш складних вимірів.

Непрямими називають виміри, у яких значення величини знаходять на підставі відомої залежності між цією величиною й іншими величинами, що зазнають прямих вимірів.

Непрямі виміри виконують тоді, коли прямі виміри даної фізичної величини за якимись причинами утруднені або навіть неможливі, або коли непрямі виміри дають більш точний результат у порівнянні із прямими. У якості прикладів непрямих вимірів можна привести знаходження об'єму тіла шляхом прямих вимірів його геометричних розмірів або визначення температури в деякому об'ємі по зміні значення опору терморезистора. Більш точний результат непрямі виміри дають, наприклад, при знаходженні дуже малих значень електричного опору (мікрооми) прямими вимірами сили струму й падіння напруги на опорі й подальшим розрахунками його значення за відомим законом Ома.

Спільними називають виконані одночасно (прямі або непрямі) виміри двох або декількох різнойменних величин для встановлення функціональної

залежності між ними (або знаходження значення вимірюваної величини при відомій залежності між цією величиною й іншими величинами, що впливають на її розмір).

Прикладами спільних вимірів можуть бути виміри довжини фізичного об'єкта залежно від температури навколишнього повітря або опору ізоляції залежно від температури й вологості середовища. У багатьох видах вимірів слід контролювати умови застосування засобів вимірів, що впливають на їхні метрологічні характеристики. Так, в електричних вимірах високої точності слід контролювати температурний режим у термостаті із установленими в ньому нормальними елементами або мірами опору, на виміри магнітних характеристик речовини можуть вплинути зовнішні електромагнітні поля і т.д.

Сукупними називають виміри, у яких значення вимірюваних величин знаходять розв'язком системи рівнянь, складеної за даними повторних вимірів декількох однойменних величин при різних комбінаціях цих величин.

Для визначення значень шуканих величин число рівнянь повинне бути не менше числа величин. Так, сукупними є виміри, при яких маси окремих гир набору знаходять по відомій масі однієї з них і за результатами прямих порівнянь мас різних комбінацій гир. Сукупними є також виміри при передачі розміру одиниці електрорушійної сили (ЕРС) груповій мірі ЕРС на основі насичених нормальних елементів за відомими значенням ЕРС деяких з них.

По характеру залежності вимірюваної величини від часу всі виміри розділяють на статичні й динамічні

Статичними називають виміри, при яких вимірювана фізична величина ухвалюється за незмінну, принаймні на час, необхідний для вимірів.

Статичними є виміри розмірів об'єкта, його маси, виміру режимів і параметрів електричному кола в режимі, що встановився. Статичними вважають усі виміри, при яких швидкість зміни величини не вносить у

результат виміру додаткову складову похибки, обумовлену інерційними властивостями засобу вимірів.

Динамічними називають виміри, при яких вимірювана величина змінюється зі швидкістю, що перевищує можливості засобу вимірів відслідковувати зміну вхідної вимірюваної величини.

У цьому випадку виникає додаткова динамічна складова похибки, обумовлена інерційними властивостями вимірювального приладу. Прикладами динамічних вимірів є виміри миттєвих значень процесів, що швидко протікають: пульсацій, вібрацій, імпульсів, перехідних процесів в електричних колах. Слід зазначити, що вимір однієї й тієї ж величини різними засобами вимірів, що мають різні інерційні властивості, може виявитися як динамічним, так і статичним.

За рівнем точності всі виміри ділять на виміри максимально можливої точності, контрольні й технічні.

Виміри максимально можливої точності, досяжної при існуючому рівні науки й техніки, виконують насамперед у метрологічних центрах при створенні й експлуатації вихідних еталонів, що визначають точність усіх нижчестоящих еталонів і робочих засобів вимірів. Такі виміри необхідні також при деяких фізичних експериментах, наприклад при визначенні значень фізичних констант, багатьох стандартних довідкових даних, тощо.

Контрольні (контрольно-повірочні, метрологічні) виміри, похибка яких не повинна перевищувати деяке заздалегідь задане контрольне значення, виконують, наприклад, при перевірці або калібруванні засобів вимірів. У цьому випадку похибка еталона повинна бути в певне число раз менше похибки засобу вимірів, що повіряється або калібрується. Співвідношення похибок приладу, що повіряється і еталона встановлюються в повірочних схемах і методиках повірки.

Технічні (робочі) виміри виконують у промисловості й у техніці – скрізь, де похибка вимірів визначається застосовуваними засобами вимірів.

Такі засоби вимірів називають робочими, і значення їх метрологічних характеристик достатні для розв'язку поставленого перед ними завдання.

По особливостях обробки результатів усі виміри ділять на рівноточні й нерівноточні.

Рівноточними вимірами називають ряд вимірів якої-небудь величини, виконаних однаковими по точності засобами вимірів у тих самих умовах і з однаковою старанністю.

Нерівноточними вимірами називають ряд вимірів якої-небудь величини, виконаних, засобами вимірів, що різняться по точності і/або в різних умовах.

Перш ніж обробляти ряд вимірів, спочатку слід переконатися у тому, що всі виміри з даного ряду є рівноточними. Якщо встановлено, що ряд вимірів є нерівноточним, обробляти такий ряд потрібно з урахуванням ваги окремих вимірів, що входять у ряд.

Слід також розглянути принцип і метод вимірів.

Принцип вимірів – фізичне явище або сукупність фізичних явищ, покладені в основу вимірів.

Метод вимірів – сукупність прийомів порівняння вимірюваної фізичної величини з її одиницею відповідно до обраного принципу вимірів.

Метод вимірів звичайно обумовлений пристроєм засобу вимірів. Так, вимір маси тіла з використанням сили ваги шляхом зважування – це принцип виміру, а зважування тіла за допомогою пружинних або важільних ваг – це методи виміру.

#### **4.2 Характеристика вимірів електромагнітним (вихрострумним) дефектоскопом**

Розвиток приладобудування у галузі неруйнівного контролю призвів до значного збільшення кількості вихрострумних дефектоскопів. Повірка цих дефектоскопів має велике значення для забезпечення якісного

вихрострумове контролю, підвищення вірогідності виявлення та локалізації дефектів, оцінки їх потенційної небезпеки.

Незважаючи на розмаїтість типів вихрострумових дефектоскопів, вони мають схожі основні метрологічні характеристики. Цей стандарт призначено для визначення основних метрологічних характеристик під час проведення повірки ультразвукових дефектоскопів.

**Вихрострумний перетворювач (далі – ВСП)** – пристрій, який призначено для створення вихрових струмів у об’єкті, що контролюється, та сприйманні наведених у цьому об’єкті сигналів від дефектів.

**Поріг чутливості** – мінімальна можлива глибина дефекту, що виявляється дефектоскопом.

**Рівень спрацьовування автоматичної сигналізації дефекту (далі – АСД)** – мінімальна глибина дефекту, що виявляється, за даних параметрів налаштування дефектоскопа.

**Абсолютна похибка при встановленні рівня спрацьовування АСД** – різниця між значенням глибини дефекту, на яку проводилось налаштування рівня спрацьовування АСД дефектоскопа та максимальним значенням глибини дефекту, що не виявляється

Під час проведення повірки дефектоскопа слід виконувати операції, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Операції повірки

Найменування операції повірки	Проведення операції під час періодичної (позачергової) повірки	Проведення операції під час повірки після ремонту
Зовнішній огляд	Так	Так
Перевірка працездатності	Так	Так
Визначення метрологічних характеристик	Так	Так
Визначення абсолютної похибки при встановленні рівня спрацьовування АСД	Так	Так

У разі отримання негативного результату будь-якої з операцій повірка припиняється, а дефектоскоп визнається непридатним до застосування.

Перелік еталонів, засобів повірки та допоміжного обладнання, а також операції повірки, під час яких їх застосовано: зразок стандартний зі штучними дефектами еталонний (далі – зразок еталонний), глибина штучних дефектів – від 0,2 мм до 3,0 мм; розширена невизначеність при відтворенні глибини штучних дефектів – 0,03 мм.

Засоби повірки, допоміжне обладнання, необхідні для проведення повірки:

1) Вимірювач параметрів повітря:

– Діапазон вимірювань: температури навколишнього повітря – від 5 °С до 40 °С; відносної вологості навколишнього повітря – від 10,0 % до 90 %.

– Розширена невизначеність при вимірюванні: температури навколишнього повітря – 0,5 °С; відносної вологості навколишнього повітря – 3,0 %

2) Зразок стандартний зі штучними дефектами настроювальний (далі – зразок настроювальний): глибина штучних дефектів – від 0,2 мм до

3,0 мм; розширена невизначеність при відтворенні глибини штучних дефектів – 0,05 мм.

Дозволяється також застосування інших еталонів та засобів повірки, що забезпечують повірку з необхідною точністю.

Персонал, який виконує роботи з повірки дефектоскопу, повинен:

- відповідати вимогам [4];
- мати групу з електробезпеки не нижче III та пройти інструктаж з охорони праці.

Під час проведення повірки потрібно дотримуватись таких умов:

- температура навколишнього повітря – від 15 °С до 25 °С;
- відносна вологість навколишнього повітря – від 20 % до 80 %.

Умови проведення повірки повинні бути задокументовані у протоколі повірки.

При виконанні повірки необхідно дотримуватися вимог [7], а також вказівок щодо техніки безпеки, наведених в ЕД на дефектоскоп та засоби повірки.

– Приміщення, в якому проводиться повірка, повинне бути обладнане протипожежною сигналізацією та засобами пожежогасіння.

– Освітленість робочого місця повинна відповідати вимогам [6].

– До повірки допускаються фахівці, що вивчили інструкцію з техніки безпеки на робочому місці, принцип дії дефектоскопу і пройшли інструктаж з охорони праці в установленому порядку.

– Процес проведення повірки дефектоскопу не належить до робіт зі шкідливими або особливо шкідливими умовами праці.

Перед проведенням повірки необхідно:

– перевірити наявність метрологічного маркування для тих дефектоскопів, які введені в обіг за результатами оцінки відповідності ЗВТ



згідно з [2], або свідоцтва про попередню повірку та відбитка повірочного тавра тощо;

- перевірити наявність необхідних допоміжних пристроїв, які подаються на повірку разом з дефектоскопом, а саме: ВСП, блока живлення або акумуляторної батареї, з'єднувальних кабелів та ЕД;

- перевірити наявність документів, що підтверджують результати калібрування еталона та повірки чи калібрування засобів повірки;

- підготувати до роботи еталон, зазначений в таблиці 2, засіб повірки, зазначений в таблиці 3, а також дефектоскоп відповідно до їхніх ЕД.

Проведення повірки:

1) Зовнішній огляд:

- Зовнішній огляд проводять візуально.

- Результати вважаються задовільними, якщо під час зовнішнього огляду встановлено:

- відсутність механічних пошкоджень дефектоскопу, датчиків і з'єднувальних кабелів;

- відсутність дефектів, що ускладнюють зчитування маркування дефектоскопу.

- Результати зовнішнього огляду документують в протоколі повірки.

2) Перевірка працездатності

- Встановити ВСП дефектоскопа на бездефектну ділянку зразка настроювального. За допомогою органів керування дефектоскопа провести настроювання дефектоскопа.

- Переміщувати ВСП по поверхні зразка настроювального та визначити найменшу глибину дефекту, що виявляється. Це значення відповідає поругу чутливості дефектоскопа за даного значення параметра шорсткості поверхні зразка.

– Якщо зразок має поверхні з різними параметрами шорсткості, попередні операції провести для поверхонь з іншими параметрами шорсткості.

– Результат операції перевірки працездатності вважається позитивним, якщо пороги чутливості не менше відповідних значень, зазначених в ЕД на дефектоскоп.

### 3) Визначення метрологічних характеристик

*Визначення абсолютної похибки при встановленні рівня спрацювання АСД*

– Встановити ВСП на дефект, у якого значення глибини перевищує поріг чутливості на значення максимальної допустимої похибки (далі – МДП) при встановленні рівня спрацювання АСД. За допомогою органів керування дефектоскопа встановити рівень спрацювання АСД на цей дефект.

– Переміщувати ВСП по поверхні зразка еталонного та зафіксувати мінімальне значення глибини дефекту, за якого спрацювала АСД дефектоскопа  $H_{iB}$ , мм, та значення глибини дефекту, за якого АСД не спрацювала  $H_{iH}$ , мм. При цьому  $i$  – точка діапазону вимірювань.

– Провести розрахунок абсолютної похибки при встановленні рівня спрацювання АСД  $\Delta_{iH}$ , мм, за формулою (4.1):

$$\Delta_{iH} = H_{iB} - H_{iH} . \quad (4.1)$$

#### *Приклад*

Настроювання дефектоскопа здійснюється на дефекті зразка настроювального глибиною 0,2 мм. На зразку еталонному дефектоскоп виявляє дефект глибиною 0,3 мм та не виявляє дефект глибиною 0,2 мм. Значення похибки при встановленні рівня спрацювання АСД, розраховане за формулою (4.1), становить 0,1 мм.

Операції провести для значень глибини, що відповідає максимальним значенням діапазону виявлення дефектів.

Результати визначення глибини дефектів і розрахунку абсолютної похибки занести до протоколу повірки.

Результат операції повірки вважається позитивним, якщо значення абсолютної похибки при встановленні рівня спрацьовування АСД, розраховане за формулою (4.1), не перевищує максимальної допустимої похибки (МДП), яка зазначена у ЕД на дефектоскоп.

Результати повірки дефектоскопу вважають позитивними, якщо його метрологічні і характеристики відповідають вимогам [2] щодо дефектоскопів, відповідність яким надає презумпцію відповідності суттєвим вимогам технічного регламенту.

Позитивні результати повірки дефектоскопу засвідчують оформленням свідоцтва про повірку дефектоскопу за формою та (за вимогою власника дефектоскопу) відбитком повірочного тавра у відповідному розділі ЕД.

У разі, якщо за результатами повірки дефектоскоп визнано таким, що не відповідає встановленим вимогам, оформлюють довідку про непридатність дефектоскопу за формою [3].

Копії свідоцтв про повірку або довідок про непридатність зберігають протягом 10 років.

За результатами експертної повірки персонал, що проводив повірку, складає висновок у довільній формі, який затверджує керівник організації-виконавця. У висновку зазначаються результати повірки дефектоскопу в обов'язі, визначеному в заявці на проведення експертної повірки.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглядаються прилади та системи електромагнітного неруйнівного контролю; принципи побудови та конструкції перетворювачів; особливості їх застосування та контрольованих параметрів (дефектів).

В роботі приведено загальну характеристику електромагнітного метода та пристроїв електромагнітної дефектоскопії. Представлено класифікацію і характеристику методів контролю якості матеріалів та виробів; основні види неруйнівних методів контролю (НМК); проблеми виявлення дефектів та характеристика методів неруйнівного контролю; технічні характеристики електромагнітних дефектоскопів; огляд пристроїв електромагнітної дефектоскопії.

Проаналізовано інформативні параметри вихрострумового (електромагнітного) контролю, методи виділення корисної інформації.

Розглянуто принципи побудови та розроблено класифікацію пристроїв електромагнітної дефектоскопії.

У результаті наведено методичку метрологічної оцінки та перевірки приладу, і рекомендовані вимоги до вимірів електромагнітним (вихрострумовим) дефектоскопом.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. Посібник. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Остащ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. Львів: Сполом, 2007. 1068 с.
2. Белокур И.П. Дефектология и неразрушающий контроль. – Киев: Вища шк., 1990. – 207с.
3. Храмов В. А. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювальних приладів і автоматичних систем: Навч.посібник. – К.: Вища школа, 1998. – 527 с.
4. Білокур І. П. Основи дефектоскопії: Підручник. – К.: «Азимут-Україна», 2004. – 496 с.
5. Білокур І. П. Елементи дефектоскопії при вивченні неруйнівного контролю. – К.: НМК ВО, 1990. – 252 с.
6. Патент України № 60751. Вихрострумний перетворювач для контролю конструкцій із феромагнітних матеріалів // В. Учанін, 2011.
7. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник/ Є. С. Поліщук. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.
8. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с.
9. Протасов, А. Г. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.

10. Петрик, В. Ф. Метрологія та стандартизація [Електронний ресурс] : навчальний посібник / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 2,85 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 302 с.
11. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники: Учебник. - 2-е изд. - К.: Вища школа, 1983.
12. Туяхов А.І. Практична метрологія і виміри. Навчальний посібник / А. І. Туяхов. – Севастополь: Вебер, 2003. – 288 с.
13. Саранча Г.А. Метрологія і стандартизація / Г. А. Саранча. – К.: Либідь – 1997. – 191 с.
14. Державні стандарти України: ДСТУ 2681-94, ДСТУ 2708:2006, ДСТУ 3231-95, ДСТУ 3651.0-97 - ДСТУ 3651.2-97, ДСТУ 4017-2001, ДСТУ ISO 10012:2005.
15. Бичківський Р., Зорій В., Столярчук П. Основи метрологічного забезпечення. -Львів: Вид. ДУ "Львівська політехніка", 1999. - 179 с.