

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 Аналіз методів контролю товщини покриттів та особливості  
метрологічних досліджень

Виконав: студент групи МВТ-22дм

Силантьєв О.Ю.

(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**

Силантьєву Олексію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Аналіз методів контролю товщини покриттів та особливості метрологічних досліджень

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. Діапазон вимірюваних товщин.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Характеристика методів контролю якості виробів та огляд відомих конструкцій вихрострумів товщиномірів. Аналіз особливостей та розрахунок первинного вихрострумів перетворювача. Розрахунок та аналіз електронних блоків досліджуваного приладу. Технологія виготовлення приладу та його зовнішній вигляд. Особливості метрології при вимірі товщини покриттів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Зовнішній вигляд розглянутих товщиномірів. Зовнішній вигляд вихрострумів перетворювачів. Перетворювачі для контролю параметрів навколишнього середовища і умов нанесення покриттів. Конструкція накладного ВСП із жорстким кріпленням котушок. Структурна схема товщиноміру. Принципові електричні схеми блоків приладу.

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1-5	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	Характеристика методів контролю якості виробів та огляд відомих конструкцій вихрострумових товщиномірів	28.10.23	
3	Аналіз особливостей та розрахунок первинного вихрострумового перетворювача	03.11.23	
4	Розрахунок та аналіз електронних блоків досліджуваного приладу	10.11.23	
5	Технологія виготовлення приладу та його зовнішній вигляд	17.11.23	
6	Особливості метрології при вимірі товщини покриттів	24.11.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	01.12.23	
8	Оформлення графічного матеріалу	08.12.23	

Студент

  
 (підпис)
Силантьєв О.Ю.  
(прізвище та ініціали)Керівник проекту \_\_\_\_\_  
(підпис)Романченко Ю.А.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 77 стор., 17 рис., 1 табл., 14 бібл. найм.

У магістерській роботі був розроблений вихрострумний товщиномір для вимірювання діелектричних покриттів на неферромагнітній основі.

У процесі розробки була виконана наступна робота: проведено огляд відомих методів контролю товщини покриттів, встановлені основні параметри датчика, необхідні для проведення контролю, а також зроблено аналіз структурної та принципової схеми приладу, спроектовано загальний вигляд товщиноміра.

**Ключові слова:** товщиномір, вихрострумний контроль, трансформаторний датчик, прилад контролю, діелектричне покриття, обмотка збудження, вимірювальна обмотка, феритовий стрижень, структурна схема, схема електрична принципова, електронний блок, підсилювач, мікросхема, частота, чутливість, зазор.

## ABSTRACT

The explanatory note contains 77 pages, 17 figures, 1 table, 14 bibliography hiring.

In this master's thesis, an eddy current thickness gauge was developed to measure dielectric coatings on a non-ferromagnetic base.

During the development process, the following work was carried out: a review of known methods for monitoring the thickness of coatings was carried out, the basic parameters of the sensor necessary for monitoring were established, an analysis of the structural and circuit diagram of the device was made, and a general view of the thickness gauge was designed.

**Keywords:** thickness gauge, eddy current testing, transformer sensor, monitoring device, dielectric coating, excitation winding, measuring winding, ferrite rod, structural diagram, electrical circuit diagram, electronic unit, amplifier, microcircuit, frequency, sensitivity, gap.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	8
1 ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ТА ОГЛЯД ВІДОМИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИХРОСТРУМОВИХ ТОВЩИНОМІРІВ.....	12
1.1 Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів .....	12
1.2 Основні види неруйнівних методів контролю (НМК).....	14
1.3 Вихрострумний метод контролю.....	20
1.4 Контроль товщини покриттів .....	22
1.5 Різновид приладів для вимірювання товщини покриттів.....	23
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА РОЗРАХУНОК ПЕРВИННОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....	34
2.1 Конструктивні особливості датчиків.....	34
2.2 Розрахунок геометричних та електричних параметрів вихрострумного датчика .....	38
3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННИХ БЛОКІВ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРИЛАДУ .....	44
3.1 Опис структурної схеми приладу.....	44
3.2 Опис електронних блоків.....	46
3.2.1 Блок живлення.....	46
3.2.2 Генератор із кварцовим резонатором $G$ .....	48
3.2.3 Фазообертачі ФВ1 та ФВ2.....	48
3.2.4 Компаратори К1, К2.....	49
3.2.5 Підсилювачі П1 та П2.....	50
3.2.6 Фазові детектори ФД1 і ФД2.....	51
3.2.7 Суматор С.....	51

3.2.8 Підсилювач постійного струму УПТ.....	52
3.2.9 Перетворювач напруга – струм.....	52
3.2.10 Індикатор показників ІІ.....	53
4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИБАДУ ТА ЙОГО ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД .....	54
4.1 Експлуатаційні вимоги.....	54
4.2 Вимоги до приладових корпусів та до компонування в них апаратури.....	57
4.3 Конструктивно-технологічні та виробничі вимоги.....	58
5 ОСОБЛИВОСТІ МЕТРОЛОГІЇ ПРИ ВИМІРІ ТОВЩИНИ ПОКРИТТІВ.....	64
5.1 Загальна класифікація вимірів.....	64
5.2 Характеристика вимірів товщини покриття.....	69
5.3 Рекомендовані вимоги до спеціальних зразкових мір товщини неелектропровідних покриттів.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

## ВСТУП

Стан захисних покриттів та їх товщина багато в чому визначають якість та довговічність продукції, що випускається на підприємствах.

Підвищенню якості продукції та її корозійної стійкості сприяє широке впровадження у практику неруйнівних електромагнітних методів контролю покриттів. До цих методів, в першу чергу, відноситься метод вихрових струмів, що дозволяє вимірювати товщину лакофарбових, емалевих, теплозахисних, керамічних, склопластикових, хімічних, гальванічних покриттів та товщину плакування.

Лакофарбні покриття не тільки захищають метали від корозії, але й виконують різні функції: забезпечують сталість радіотехнічних властивостей, зменшують електризованість, збільшують термостійкість і випромінювальну здатність, маскують від оптичного дешифрування.

Серед гальванічних покриттів велике застосування отримали цинкові, кадмієві, хромові, нікелеві, олов'яні, мідні та срібні покриття, а також з інших дорогоцінних та рідкісних елементів. Так, срібні покриття підвищують відбивну здатність світлотехнічних та оптичних пристроїв, знімають перехідний опір у місцях контактів, підвищують корозійну стійкість виробів, що працюють у лужних та агресивних середовищах. При покритті сріблом, золотом та іншими дорогоцінними матеріалами питання вимірювання товщини безпосередньо пов'язані з економією та розумною витратою цих матеріалів.

Для багатьох покриттів, наприклад, срібла, бажаний, а іноді і необхідний підшар із міді або латуні. Для інших покриттів як підшар використовується нікель.

Дослідження та досвід експлуатації приладів показали, що електроосажені метали і сплави мають сильно спотворені кристалічні ґрати з великою кількістю дефектів упаковки і можуть містити в своєму складі домішки. Їхня електрична провідність і магнітна проникність залежать від



складу ванни, температури та ряду інших факторів, у тому числі і товщини покриттів. На якість та властивості покриттів впливають концентрація електроліту, наявність та кількість поверхнево-активних домішок.

Тому для отримання достовірних результатів вимірювання товщини гальванічних покриттів у відповідних підрозділах підприємств доцільно мати добре поставлену службу з підготовки та атестації контрольних зразків та заходів товщини.

Плакування – один із прогресивних напрямків захисту конструкційних матеріалів від корозії в агресивних середовищах. Отримують плакувальний шар шляхом гарячої прокатки заготовки на прокатних верстатах.

Навіть при строгому дотриманні технології прокату отримати листи з рівномірним плакуванням досить важко через різну пластичність матеріалу плакування та основи листа, які при прокаті деформуються неоднаково. Більше пластичний шар плакування «розтікається» вздовж прокатки, а також до країв листа, утворюючи потовщення. Крім того, у міру остигання металу пластичність його змінюється. Це призводить також до появи різної товщини шару плакування уздовж прокатки і викликає локальне здуття.

Таким чином, у всіх випадках істотну, а іноді і головну роль, грає товщина шару покриття.

Багаторічний досвід розробки та використання електромагнітних товщиномірів, заснованих на методі вихрових струмів, показує, що найбільш ефективними є спеціалізовані прилади, що забезпечують вимірювання товщини покриття певного типу. Розроблені та застосовуються вимірювачі товщини лакофарбових та окисдованих покриттів (діапазон вимірювань від 5 до 3000 мкм) на магнітних та немагнітних металах, прилади для контролю товщини гальванічних покриттів (діапазон вимірювання від 1 до 100 мкм) та вимірювачі товщини алюмінієвого плакування від 10 до 300 мкм. Однак розробка та впровадження приладів, особливо приладів для контролю

товщини гальванічних покриттів, затримується внаслідок труднощів метрологічного характеру.

Прилади для вимірювання товщини покриттів виконують за типовими блок-схемами, що включають генератор змінного струму, вимірювальний блок з накладним датчиком, котушку якого надалі називатимемо перетворювачем, індикаторний блок з вимірювальним або реєструючим індикатором на виході [1].

У нашому випадку ми розроблятимемо товщиномір діелектричного покриття на електропровідній основі. Один з основних параметрів товщиноміра – похибка вимірювання, що виникає, як правило, внаслідок впливу факторів, що заважають, пов'язаних з вимірюванням параметрів об'єкта. Структурні схеми товщиномірів визначаються способом виділення інформації та відрізнятимуться від схем дефектоскопів, як правило, відсутністю блоків, що застосовуються при модуляційному способі.

Для калібрування товщиномірів застосовують контрольні зразки, які зазвичай виготовляються споживачем і атестуються його метрологічними службами. Останнім часом міри товщини покриттів розпочали випускати підприємства Держстандарту.

Налаштування товщиномірів полягає в установці нуля та верхньої межі шкали за відповідними контрольними зразками шляхом регулювання компенсуючих пристроїв та чутливості вимірювального каналу. Паралельно з цим проводиться відбудова від впливу факторів, що заважають, на показання приладу.

Похибка вимірювання товщиномірів залежить від шорсткості поверхні, змін електромагнітних параметрів та близькості краю об'єкта, варіації зазору між ВСП та об'єктом, перекосів ВСП при встановленні його на контрольовану поверхню тощо.

До діелектричних покриттів на електропровідній основі відносяться різні оксидні, фосфатні, лакофарбові, керамічні, емалеві, пластмасові та інші покриття на феро- та неферомагнітних металах та сплавах. Товщиноміри

діелектричних покриттів на електропровідних основах є вимірювачами зазору. Вибравши досить велике значення узагальненого параметра контролю, можна отримати хорошу чутливість до зазору за малої похибки, викликані впливом змін та товщини основи. Завдяки цьому вдається створити товщиноміри без застосування спеціальних схем, призначених для ослаблення впливу факторів, що заважають, на показання приладів.

У цих приладах застосовані трансформаторні накладні ВСП, завдяки чому знижено похибку вимірювань та розширено діапазон допустимих температур навколишнього середовища [3].

## РОЗДІЛ 1

### ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ТА ОГЛЯД ВІДОМИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИХРОСТРУМОВИХ ТОВЩИНОМІРІВ

#### 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'ятинка);

– 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 виробах, 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 витоку 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 несутцільності (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 несучільностей; вологість сипучих матеріалів та інші властивості.

Для контролю провідників застосовують метод *електричного потенціалу*. Товщину провідного шару, наявність несучільностей 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 несучільності 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 Вихрострумівий метод контролю**

Як відомо, для захисту металевих виробів від корозії зазвичай застосовують різноманітні лакофарбові, гальванічні та інші покриття. При цьому якість виробу часто залежить від товщини покриття. Для її контролю зазвичай використовують різні товщиноміри покриттів. Якщо основний метал є феромагнітним, то це зазвичай магнітні товщиноміри. Якщо основа немагнітна, то застосовують вихроструміві товщиноміри. У ряді випадків вихроструміві товщиноміри можуть бути використані і в тих випадках, коли основний матеріал – феромагнітний. У той же час вихроструміві товщиноміри широкого призначення мають одне обмеження за матеріалом покриття – воно має бути неелектропровідним (діелектричним).

Розглянемо деякі конструкції вихрострумівих товщиномірів для контролю товщини діелектричних покриттів. Для чого спочатку дізнаємося, як працює і на чому ґрунтується вихрострумівий метод контролю товщини покриттів, на базі якого будуються дані товщиноміри.

Вихрострумівий метод заснований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться котушкою збудження в електропровідному об'єкті контролю. Щільність вихрових струмів в об'єкті залежить від геометричних та електромагнітних параметрів об'єкта, а також від взаємного розташування вимірювального вихрового перетворювача (ВСП) та об'єкта. Як перетворювач використовують зазвичай індуктивні котушки (одну або кілька). Синусоїдальний (або імпульсний) струм, що діє в котушках ВСП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них ЕРС або змінюючи їх повний

електричний опір. Реєструючи напругу на затискачах котушки або їх опір, отримують інформацію про властивості об'єкта та положення перетворювача щодо нього.

ЕРС (чи опір) перетворювача залежить від багатьох параметрів об'єкта контролю, тобто інформація, що надається перетворювачем, багатопараметрова. Це визначає як перевагу, так і труднощі реалізації вихрострумowego методу (ВСМ). З одного боку, ВСМ дає змогу здійснити багатопараметровий контроль; з іншого боку, потрібні спеціальні прийоми для поділу інформації про окремі параметри об'єкта. При контролі одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача стає таким, що заважає, тому цей вплив необхідно зменшувати.

Особливість вихрострумowego контролю в тому, що його можна проводити без контакту перетворювача та об'єкта. Їхня взаємодія відбувається зазвичай на відстанях, достатніх для вільного руху перетворювача щодо об'єкта (від часток міліметра до декількох міліметрів). Тому цими методами можна отримувати хороші результати контролю навіть за високих швидкостях руху об'єктів.

Отримання первинної інформації як електричних сигналів безконтактність і висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації вихрострумowego контролю.

Одна з особливостей ВСМ полягає в тому, що на сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забрудненість газового середовища, радіоактивні випромінювання, забруднення поверхні об'єкт контролю непровідними речовинами.

Простота конструкції перетворювача – ще одна перевага ВСМ. У більшості випадків котушки поміщають у запобіжний корпус та заливають компаундами. Завдяки цьому вони стійкі до механічних та атмосферних впливів, можуть працювати в агресивних середовищах у широкому інтервалі температур та тисків. ВСМ заснований на збудженні вихрових струмів, тому застосовується переважно для контролю якості електропровідних об'єктів:

металів, сплавів, графіту, напівпровідників. Їм властива мала глибина зони контролю, яка визначається глибиною проникнення електромагнітного поля в контрольоване середовище.

#### **1.4 Контроль товщини покриттів**

На сьогоднішній день, метод неруйнівного контролю набуває все більшого значення, особливо при виробництві та експлуатації дорогих об'єктів. Адже цілком очевидно, що недостатність контролю або його недостовірність можуть привести до значних економічних втрат і навіть до серйозних аварійних зупинок.

У багатьох випадках основним параметром якості покриття, яке повинно відповідати певним технічним і економічним вимогам, є його товщина. У зв'язку з цим визначення товщини покриття – основа оцінки його якості.

Варто зазначити, що конкурентоспроможність виробів на ринку безпосередньо залежить від якості покриття, тому необхідно попередньо випробовувати вживані матеріали, контролювати операції процесу покриття на кожному етапі, перевіряти вже покриті деталі на відповідність встановленим стандартам і нормативної документації.

Товщина впливає на експлуатаційні якості покриття і визначає витрата матеріалів, відповідно, її важливо контролювати.

*Занадто тонке покриття матеріалу виробу* – знижує захисну і криючу здатності виробу, призводять до передчасного зносу, порушують декоративні якості покриття.

*Занадто товсте покриття матеріалу виробу* – призводить до збільшення собівартості виробництва, появи напливів, втрати еластичності, сколювання покриття, утворення проколів і кратерів.

Вимірювати покриття слід для забезпечення необхідної товщини з метою економії нанесення матеріалів. Такі вимірювання дозволяють точніше

налаштувати систему нанесення покриттів, зменшуючи витрати на доопрацювання, кількість відходів і можливість перевитрати.

*Товщиноміри покриттів* – один з основних інструментів контролю, що використовуються в лакофарбової промисловості.

Для того, щоб правильно вибрати товщиномір необхідно враховувати, такі параметри: агрегатний стан покриття при контролі, матеріал підкладки, матеріал покриття, діапазон і необхідної точності вимірювань, конфігурацію і розміри контрольованої деталі.

Комбіновані прилади дозволяють проводити вимірювання як на магнітних, так і на немагнітних підкладках.

У комбінованому товщиномірі використовуються одночасно магнітно-індукційний і вихрострумний принципи, за допомогою яких можна вирішити безліч завдань у вимірі товщини:

- діелектричних і гальванічних покриттів на сталевих деталях;
- діелектричних і електропровідних покриттів на деталях з неферомагнітних металів і сплавів, вуглепластика;
- лакофарбових і гальванічних покриттів на внутрішніх поверхнях труб;
- плакуючих покриттів; захисного шару бетону і визначення розташування арматури залізобетонних виробів;
- шорсткості поверхні;
- вологості, температури повітря і точки роси при фарбувальних роботах.

### **1.5 Різновид приладів для вимірювання товщини покриттів**

Товщиноміри знайшли широке застосування в різних областях, а саме: будівництво, суднобудування, ремонт судів, машинобудування, нафтова промисловість і автомобільна галузь. Дані прилади використовуються для контролю нанесених покриттів при проведенні

ремонтних робіт, а для багатьох фахівців такої метрологічний інструмент незамінний.

Товщиноміри для контролю непровідячих струм покриттів є найпоширенішими приладами і випускаються великими партіями. До цієї групи приладів належать вітчизняні товщиноміри типу ТПН, ЕФІТ, «Дельта» та закордонні прилади «Ізометр 2.082», «Пермаскоп».

Існують також товщиноміри для контролю товщини гальванічних покриттів, засновані на ВСМ. Найбільшого поширення та застосування набули прилади типу ППМ-6, ВІГП-1Ф, що випускалися невеликими партіями ризьким експериментальним заводом «Еталон». [6]

Розроблено і в даний час випускаються вихрострумові товщиноміри серії ВТ-60Н. Прилади, призначені для контролю товщини діелектричних покриттів на електропровідній немагнітній основі. Прилади працюють на частоті 4 МГц і забезпечені накладними вихрострумовими перетворювачами із середнім радіусом обмоток 2 мм. Вибір таких параметрів дозволяє значно знизити вплив змін питомої електричної провідності основи для сплавів на основі алюмінію або міді. Дещо гірші справи для титанових сплавів, коли порівняно невеликі неконтрольовані відхилення питомої електричної провідності основи можуть призвести до помітної похибки вимірювань, що вимагає більш ретельного аналізу результатів вимірювань.

Товщиноміри ВТ-60Н випускаються у двох виконаннях. У найпростішому вигляді прилад складається з вимірювального високочастотного тракту з амплітудним детектором, аналогового лінеаризатора і цифрового індикатора. В іншому виконанні прилад містить мікропроцесорний блок, який дозволяє автоматизувати процес калібрування приладу, провести більш точну лінеаризацію градуювальної кривої. Це спрощує роботу з приладом та дозволяє підвищити точність вимірів. Крім того, мікропроцесорний блок дозволяє запам'ятати до 4096 результатів вимірювань, які можна надалі передати в персональний комп'ютер та провести необхідну їхню обробку. Застосування оригінального алгоритму



обробки сигналу дозволило суттєво спростити процес вимірювання за рахунок підвищення стабільності показань цифрового індикатора навіть у тих випадках, коли оператор не може утримувати вихрострумний перетворювач щільно притиснутим до контрольованої поверхні. Цей товщиномір наведено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Вихрострумний товщиномір VT-60H

Контроль товщини емалей, фарб, фотолаків, пластиків та інших непровідних покриттів на деталях з немагнітних матеріалів широко використовується на підприємствах авіаційної, автомобільної, хімічної, електротехнічної та інших галузей промисловості.

Ще одним із приладів, що відносяться до вихрострумних товщиномірів, є мікропроцесорний товщиномір покриттів VT-51HP, наведений на рис. 1.2. Цей прилад призначений для контролю діелектричних

покриттів на деталях із немагнітних металів. Приклади покриття: фарба, лак, емаль, пластик. Приклади матеріалу основи: алюміній, мідь, аустенітна (немагнітна) сталь. Широко використовується на підприємствах авіаційної, електротехнічної, машинобудівної та інших галузей промисловості.

Основною перевагою приладу є використання в ньому мікропроцесора, завдяки якому: пристрій виконаний портативним; введено кнопочке керування установкою нуля та верхньої межі, що спрощує процес підготовки до роботи; здійснюється фіксація результату виміру на індикаторі після зняття датчика з об'єкта контролю; підвищено стабільність та повторюваність вимірювань; підвищено надійність та довговічність приладу. А також запроваджено можливість статистичної обробки даних масиву вимірювань.



Рисунок 1.2 – Мікропроцесорний товщиномір покриттів VT-51НП

Розглянемо переваги та технічні характеристики вихрострумowego товщиноміра покриттів VT-201, який показаний на рис. 1.3.

Вихрострумний товщиномір покриттів призначений для вимірювання товщини неметалічних покриттів (фарба, емаль, пластик) на

металевій основі (алюміній, мідь, титан). Діапазон вимірюваних товщин 5 – 1000 мкм. Прилад має кнопочке керування та цифрову чотирирозрядну індикацію. Є режим "HOLD" – утримання на індикаторі останнього виміряного значення, а також автоматичне вимкнення живлення, яке дозволяє продовжити термін служби батареї приладу. Основними галузями застосування вихрострумове товщиноміра покриттів ВТ-201 є: машинобудування, авіація, електротехніка, автомобілебудування.

Технічними характеристиками аналізованого товщиноміра виступають:

- основна похибка:  $(0,03X+1)$  мкм, де  $X$  – вимірюване значення товщини покриття;
- час безперервної роботи від однієї батареї, який становить 50 годин
- діапазон робочих температур від 0 до 40°C
- маса 0,3 кг
- габаритні розміри: 156x83x30 мм (без перетворювача).



Рисунок 1.3 – Вихрострумове товщиноміра покриттів ВТ-201

Останнім розглянемо багатофункціональний електромагнітний товщиномір покриттів та матеріалів "КОНСТАНТА К5" Товщиномір Константа К5 (див. рис 1.4), виконаний з використанням імпортової комплектації, є останнім у серії мікропроцесорних товщиномірів. Оригінальні методи обробки інформації, сервісні можливості та великий набір датчиків, у тому числі для контролю параметрів техпроцесу нанесення покриттів, роблять роботу продуктивною та ефективною, забезпечать високу достовірність результатів.



Рисунок 1.4 – Електромагнітний товщиномір покриттів та матеріалів "КОНСТАНТА К5"

Контрольовані покриття та матеріали: лакофарбові, емалеві, діелектричні, гальванічні (цинкові, хромові, кадмієві, нікелеві хімічні, електролітичні) та інші покриття на сталевих деталях; срібні та мідні покриття на деталях з неферромагнітних сплавів; лакофарбові та гальванічні покриття на внутрішніх поверхнях труб; плакуючі покриття; листові

діелектричні та електропровідні матеріали; стінки виробів (зокрема труб) із феромагнітних та кольорових металів під діелектричним покриттям.

Також за допомогою даного товщиноміра може здійснюватися:

- контроль електропровідності виробів;
- контроль шорсткості поверхні після піско- і дробострумної обробки;
- контроль вологості та температури повітря при фарбувальних роботах;
- контроль бетонних покриттів на арматурі;
- пошук розташування арматури.

Відмінними рисами приладу є: використання комбінації імпульсного індукційного, вихрострумного параметричного та фазового методів вимірювання; наявність режимів автокалібрування та самотестування; велика кількість зносостійких датчиків різного призначення (рис.1.5); відсутність температурного та часового дрейфу показань; можливість запам'ятовування налаштувань на конкретні деталі та матеріали, що дозволяє приступати до вимірів одразу після включення приладу без калібрування; можливість контролю покриттів на деталях з шорсткістю до  $R_z = 400$  мкм, на малорозмірних деталях та внутрішніх поверхнях порожнистих виробів; можливість запам'ятовування та зберігання результатів контролю, зв'язок з IBM PC та автоматичне вимкнення після закінчення роботи.



Рисунок 1.5 – Зносостійкі датчики різного призначення

Методи, які відповідають групам перетворювачів серії ИД, ПД, ФД, ДА, ДШ, ДВТР і які вимірювання можна проводити за допомогою кожної з цих груп.

*Магнітоіндукційні перетворювачі (ИД)* –призначені для неферомагнітних покриттів на феромагнітних підставах.

*Вихорострумові перетворювачі серії (ПД)* – призначені для вимірювання товщини діелектричних неферомагнітних покриттів на електропровідних підставах.

*Вихорострумові перетворювачі серії (ФД)* – для вимірювання товщини електропровідних гальванічних покриттів на феромагнітних підставах.

*Спеціалізовані перетворювачі серії (ДА)* – призначені для пошуку арматури та вимірювання товщини бетону до арматури в залізобетонних виробках і конструкціях, а також вимірювання товщини товстошарових неферомагнітних покриттів на феромагнітних підставах.

*Спеціалізовані перетворювачі серії (ДШ)* –вимір шорсткості підстави Rz (Ra) – після піскоструминної або дробоструйної обробки перед фарбувальними роботами.

*Контроль параметрів навколишнього середовища і умов нанесення покриттів (ДВТР, КД, ДКУ)*– перетворювачі застосовуються при підготовці та проведенні фарбувальних робіт і призначені для контролю параметрів навколишнього середовища (температури повітря і поверхні металу, вологості повітря і температури точки роси).

Для зручності і спрощення вибору того чи іншого перетворювача в вимірі товщини на будь-якому з представлених основ, користуються таблицею 1.1, з якої можна вибрати потрібну серію перетворювачів для тих покриттів які необхідно контролювати.

Таблиця 1.1 – Серії перетворювачів залежно від матеріалу основи та покриття

Основа Покриття	Алю- міній	Латунь	Бронза	Мідь	Сталь	Магній	Нерж. сталь	Титан	Ф-маг. нерж.сталь	Цинк
Алюміній	-	-	-	-	ИД	-	-	-	-	-
Анодируване	ПД/ФД	-	-	-	-	ПД/ФД	-	ПД/ФД	-	-
Кадмій	-	ПД	ПД	ПД	ИД/ФДЗ	-	-	-	ИД/ФДЗ	-
Кераміка	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД	ПД	ПД	ИД	ИД
Хром	ПД	-	-	ПД	ИД/ФДЗ	-	-	-	ИД/ФДЗ	-
Мідь	ПД	ПД	ПД	-	ИД/ФДЗ	ПД	ПД	ПД	ИД/ФДЗ	ПД
Епоксидне	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД
Лаковане	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД
Нікель ел.			-		ФД	-	-	-	ФД	-
Нікель хім.	ПД	ПД	ПД	ПД		ПД	ПД	ПД		
Фарба	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД
Пластик	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД
Гума	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД	ПД	ПД	ИД	ПД
Олово	ПД	ПД	ПД	ПД	ИД/ФДЗ	ПД	ПД	ПД	ИД/ФДЗ	
Цинк	-	ПД	ПД	ПД	ИД/ФДЗ	-	-	-	ИД/ФДЗ	-

*Вихорострумові перетворювачі ПД* (рис. 1.6) призначені для вимірювання товщини діелектричних неферомагнітних (анодноокісних, лакофарбових, емалевих, порошкових, пластикових та ін.) Покриттів на електропровідних основах, а також для вимірювання товщини електропровідних неферомагнітних (хромових, срібних, олов'яних, кадмієвих тощо) покриттів на електропровідних неферомагнітних основах.



Рисунок 1.6 – Вихроструміві перетворювачі

*Вихороструміві перетворювачі серії (ФД) (рис. 1.7) призначені для вимірювання товщини електропровідних гальванічних (цинкових, нікелевих, хромових, кадмієвих, мідних і ін.) покриттів на феромагнітних основах з поліпшеною відбудовою від впливу основних заважають параметрів.*



Рисунок 1.7 – Вихроструміві перетворювачі



*Перетворювачі для контролю параметрів навколишнього середовища і умов нанесення покриттів (рис. 1.8) застосовуються при підготовці та проведенні фарбувальних робіт і призначені для контролю параметрів навколишнього середовища (температури повітря і поверхні металу, вологості повітря і температури точки роси).*

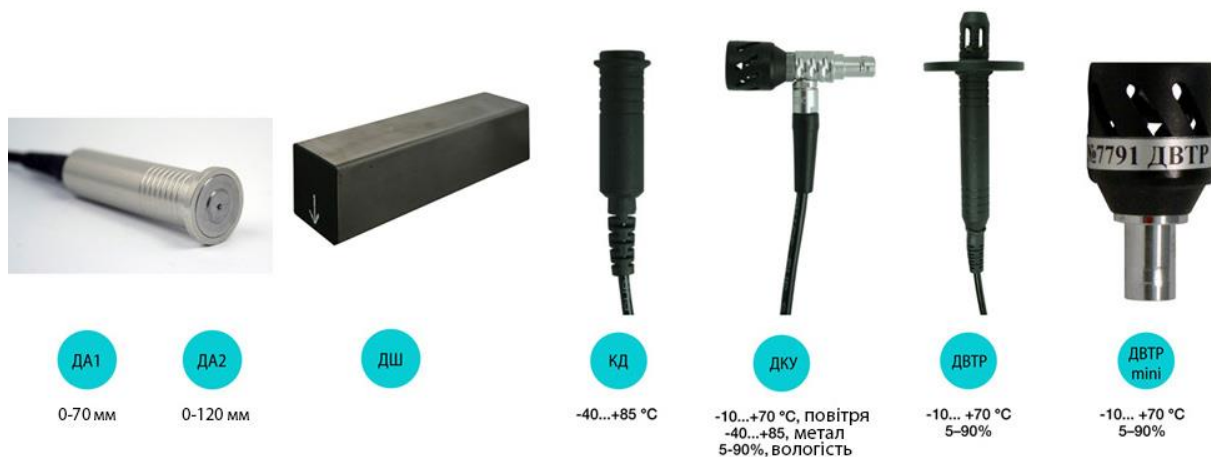


Рисунок 1.8 – Перетворювачі для контролю параметрів навколишнього середовища і умов нанесення покриттів

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА РОЗРАХУНОК ПЕРВИННОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

#### 2.1 Конструктивні особливості датчиків

Конструкції вихрострумів перетворювачів визначаються їх призначенням, умовою застосування, діапазоном частот струму збудження та іншими факторами. Тому вони дуже різноманітні.

Основні вимоги до ВТП – міцність, зносостійкість, захищеність від зовнішніх впливів, можливість доступу до зони контролю, зручність експлуатації, ергономічність та відповідність вимогам технічної естетики, взаємозамінність, та ремонтоспроможність, надійність. Успішне вирішення цього завдання багато в чому визначається ефективністю приладу.

Конструкція ВСП зазвичай містить такі складові:

- одну або кілька котушок;
- корпус для розміщення в ньому котушок та інших вузлів приладу;
- засоби стабілізації положення котушок щодо ОК у процесі контролю;
- засоби для розміщення ВСП у заданому положенні щодо ОК;
- сполучні роз'єми та панелі.

За конструкцією всі накладні ВСП можна умовно поділити на дві основні групи: для ручного та автоматичного контролю.

ВСП для ручного контролю має бути зручним для утримання в руці оператора. На рисунку 2.1. показано конструкцію такого ВСП з жорстким кріпленням котушок.

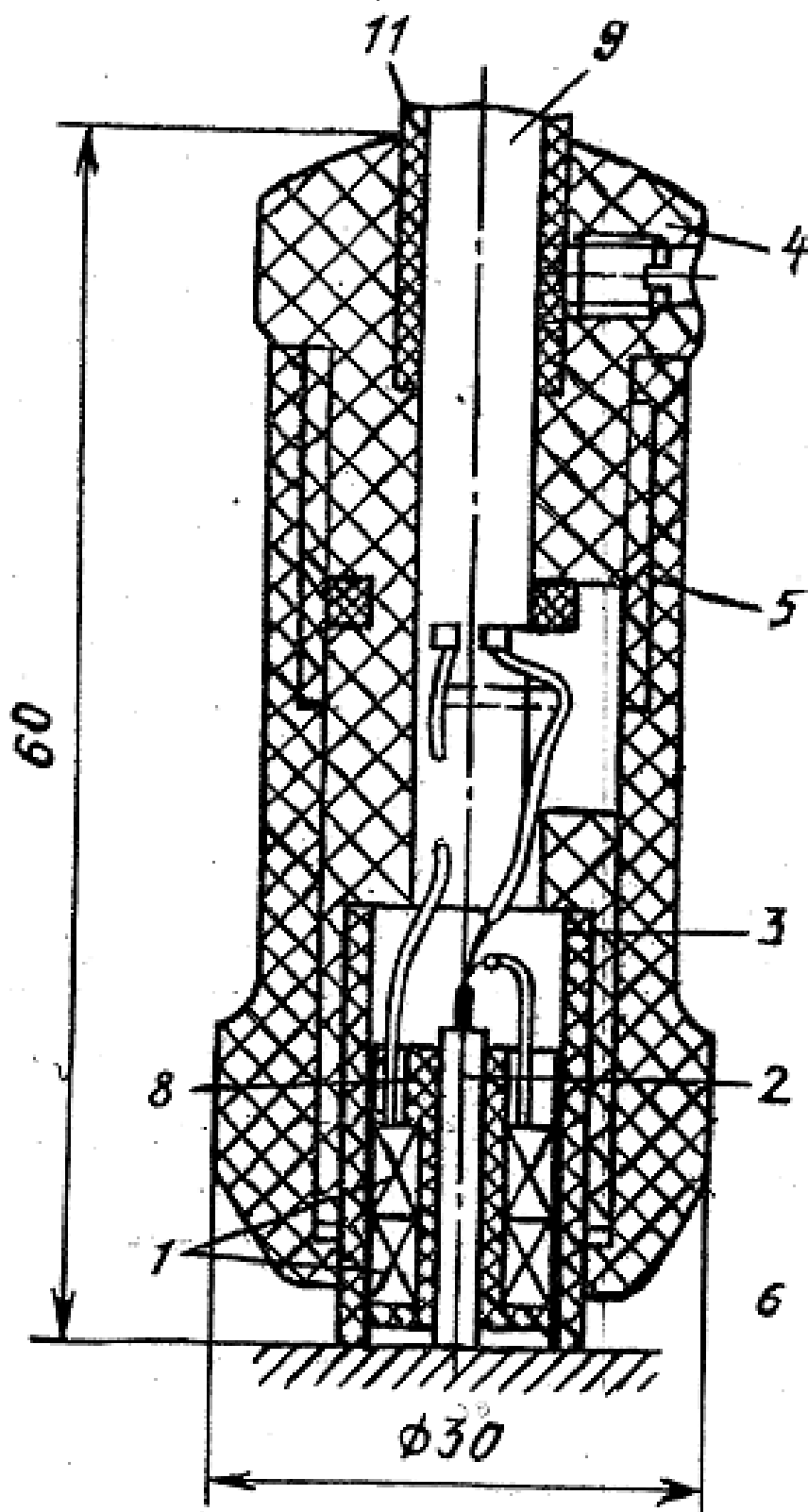


Рисунок 2.1 – Конструкція накладного ВСП із жорстким кріпленням котушок: 1 – обмотки; 2 – феритовий сердечник; 3 – керамічна втулка; 4 – корпус; 5 – оправлення; 6 – пермалоевий екран; 8 – каркас котушки; 9 – кабель; 11 – гумова втулка

У конструкції обмотки 1 ВСП, що охоплюють феритовий сердечник 2 за допомогою керамічної втулки 3 жорстко закріплюються в корпусі 4. Керамічна втулка 3 служить для охорони торця обмоток від механічних пошкоджень.

При розробці приладів залежно від поставленого завдання вибирають або розраховують робочу частоту (частоту струму, що живить перетворювач), конструктивні пропорції та намотувальні дані перетворювача.

Зазвичай використовуються перетворювачі двох типів – параметричні, що є котушкою індуктивності, і трансформаторні, що представляють собою котушку взаємоіндуктивності і мають первинну (збудливу, струмову) і вторинну (вимірювальну) обмотки.

Виходячи з досвіду експлуатації, встановлено, що для вимірювання товщини електропровідного покриття на неферромагнітній основі застосовують вихрострумові накладні параметричні датчики.

Трансформаторним називають такий вихрострумний перетворювач, у якого функції створення поля та його вимірювання розділені та здійснюються різними котушками. Котушка, що створює поле, називається струмовою, так як по ній протікає струм перетворювача. Котушка, з якої отримують сигнал, називається сигнальною або вимірювальною.

Вимірювальних котушок може бути декілька залежно від призначення перетворювача. Розміщення вимірювальних котушок також може бути різним. Так, якщо площа витків вимірювальної котушки перпендикулярна до нормальної складової магнітного поля, то її ЕРС залежатиме тільки від цієї складової, точніше, вона буде пропорційна інтегралу цієї величини по площі, що охоплюється даною вимірювальною котушкою.

Якщо площина витків вимірювальної котушки перпендикулярна тангенціальній складової, її ЕРС залежить тільки від цієї величини, тобто буде пропорційна інтегралу цієї величини по площі, що охоплюється цією вимірювальною котушкою.

Відповідно до цього будемо розділяти перетворювачі на такі, що використовують нормальну складову і на які використовують тангенціальну складову напруженості магнітного поля.

Трансформаторні ВСП зазвичай включають за диференціальною схемою. При цьому можлива схема порівняння зі стандартним зразком і схема «самозрівняння». У першому випадку робочий і зразковий ВСП не пов'язані індуктивно і мають незалежні вимірювальні збуджуючі обмотки.

У другому випадку збуджуюча обмотка часто є загальною для двох вимірювальних. При включенні ВСП за диференціальною схемою 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 встановлюється необхідна напруга компенсації. Така схема дозволяє усунути не стабільність, пов'язану з розігрівом стандартного зразка вихровими струмами.

При використанні диференціальної схеми зазвичай не виключається можливість застосування компенсатора, який в цьому випадку необхідний для компенсації напруги, викликані не ідентичністю робочого і зразкового ВСП, і включається послідовно із зустрічно включеними вимірювальними обмотками.

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 компенсує.

## 2.2 Розрахунок геометричних та електричних параметрів вихрострумowego датчика

Для захисту металевих виробів від корозії зазвичай застосовують лакофарбові, гальванічні та інші покриття. При цьому якість виробу часто залежить від товщини покриття. Для її контролю зазвичай використовують різні товщиноміри покриттів. Якщо основний метал є феромагнітним, то це зазвичай магнітні товщиноміри. Якщо основа немагнітна, то застосовують вихрострумові товщиноміри.

Завдання вихрострумowego контролю товщини діелектричних покриттів є двопараметровою, коли основним фактором, що заважає, служить питома електрична провідність матеріалу основи. Для зниження її впливу зазвичай намагаються вибрати якомога вищу робочу частоту, що також забезпечує максимальну чутливість до контрольованої товщини покриття.

При контролі товщини покриття накладним ВСП напруга  $U_{\text{вн}^*}$ , що вноситься, залежить від параметра  $\gamma$  і відносного зазору  $h_*$ , які розраховуються за формулами

$$\gamma = \frac{R_u}{R_g}, \quad (2.1)$$

$$h_* = \frac{2h}{R_g}, \quad (2.2)$$

де  $h$  – відстань від об'єкта контролю до обмоток ВСП або максимальна товщина ізоляційного покриття, так як зміна товщини покриття дорівнює зміні зазору.

При малих  $\gamma$  ( $\gamma < 0,2$ ) ЕРС вимірювальної котушки мала  $i$ , крім того, при невеликих розмірах датчика виготовлення такої вимірювальної котушки дуже важко. Тому на практиці зазвичай застосовують перетворювач з параметром  $\gamma = 0,5$  та концентричним розташуванням котушок. З досвіду

проекування відомо, що при  $\beta > 20$  різко знижується чутливість до зміни електропровідності  $\sigma$ . Наприклад, при  $\beta = 100$ ,  $\gamma = 0,5$ ,  $h = 0,1$  чутливість до зазору перевищує у 100 разів чутливість до електропровідності. Тому під час попередніх розрахунків зазвичай вибирають  $\beta = 30$ .

Розрахунок параметрів накладного перетворювача проводиться у наступній послідовності:

1. Задамо значення параметра  $\gamma$  вимірювального діапазону  $0,2 < \gamma < 0,8$ , тоді  $\gamma = 0,5$

2. За допомогою графіка виберемо значення узагальненого вихрострумowego параметра  $\beta = 30$ , що забезпечує максимальну чутливість до товщини покриття  $S_{h*}$ .

3. Виходячи з вимірювальної обраного значення відношення  $\gamma$  за формулами (1) і (2) розрахуємо радіус вимірювальної обмотки та знайдемо величину відносного зазору  $h_*$

$$0,5 = \frac{R_u}{2} \Rightarrow R_u = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ (мм)} \quad (2.3)$$

$$h_* = \frac{2 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,3 \quad (2.4)$$

4. Визначимо робочу частоту  $f$  (отримане значення визначається до найближчого цілого числа).

$$f = \frac{\beta^2}{2\pi R_g^2 \cdot \mu_0 \cdot \sigma}, \quad (2.5)$$

де  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – магнітна проникність;

$\sigma = 14,5 \frac{\text{МСм}}{\text{м}}$  – електропровідність матеріалу основи (латунь).

$$f = \frac{900}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 14,5 \cdot 10^6} = 1,96 \cdot 10^6 \text{ Гц} \approx 2 \text{ МГц}$$

5. за допомогою годорграфів розрахуємо відносну вносиму напругу накладного ВСП в комплексній формі  $\underline{U}_{\text{ВН}*}$ .

$$\underline{U}_{\text{BH}^*} = 0,06 - j \cdot 0,72$$

Взаємна індуктивність коаксіальних котушок у загальному випадку може бути знайдена за формулою

$$M = \frac{\pi}{8} \cdot \mu_0 \cdot \omega_u \cdot \omega_\epsilon \cdot \frac{d_u^2}{a_u \cdot A_\epsilon} \cdot (l_1 \cdot F_1 - l_2 \cdot F_2 - l_3 \cdot F_3 + l_4 \cdot F_4) \quad (2.6)$$

$$\text{де} \quad l_1 = \sqrt{\left(\frac{D_\epsilon}{2}\right)^2 + x_1^2}; \quad l_3 = \sqrt{\left(\frac{D_\epsilon}{2}\right)^2 + x_3^2}; \quad (2.7)$$

$$l_2 = \sqrt{\left(\frac{D_\epsilon}{2}\right)^2 + x_2^2}; \quad l_4 = \sqrt{\left(\frac{D_\epsilon}{2}\right)^2 + x_4^2};$$

$D_\epsilon$  і  $d_u$  – діаметри обмоток;

$A_\epsilon$  і  $a_u$  – їх довжини, що дорівнюють 12 мм і 5 мм відповідно;

$W_\epsilon$  і  $W_u$  – число витків вимірювальної та збуджуючої котушок, що дорівнює 130 і 100 відповідно.

$$X_1 = X + \frac{A_\epsilon + a_u}{2}; \quad X_3 = X + \frac{A_\epsilon - a_u}{2}; \quad (2.8)$$

$$X_2 = X - \frac{A_\epsilon - a_u}{2}; \quad X_4 = X - \frac{A_\epsilon - a_u}{2};$$

де  $X$  – відстань між центрами обмоток, що дорівнює 8,5 мм;

Підставивши відповідні значення параметрів обмоток формули (2.8), отримаємо  $X_1 = 17$  мм,  $X_2 = 5$  мм,  $X_3 = 12$  мм і  $X_4 = 0$ , так як зазору між обмоткою збудження і вимірювальною обмоткою немає.

$$\text{Тоді} \quad l_1 = \sqrt{\left(\frac{4}{2}\right)^2 + 17^2} = 17,1 \text{ мм}; \quad l_2 = \sqrt{\left(\frac{4}{2}\right)^2 + 5^2} = 5,4 \text{ мм};$$

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{4}{2}\right)^2 + 12^2} = 12,2 \text{ мм}; \quad l_4 = \sqrt{\left(\frac{4}{2}\right)^2 + 0} = 2 \text{ мм}$$

$F_1 - F_4$  – значення функції  $F$ , заданої в таблиці 7-1 [5], при  $\delta = d_u / D_\epsilon = 0,5$  і відношенні  $\lambda = \frac{D_\epsilon}{2 \cdot l}$ , що дорівнює відповідно



$$\lambda_1 = \frac{D_e}{2 \cdot l_1} = \frac{4}{2 \cdot 17,1} = 0,117; \quad \lambda_2 = \frac{D_e}{2 \cdot l_2} = \frac{4}{2 \cdot 5,4} = 0,37; \quad (2.9)$$

$$\lambda_3 = \frac{D_e}{2 \cdot l_3} = \frac{4}{2 \cdot 12,2} = 0,164; \quad \lambda_4 = \frac{D_e}{2 \cdot l_4} = \frac{4}{2 \cdot 2} = 1.$$

Зведемо значення  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  в квадрат і знайдемо по таблиці 7-1 значення для функції F, рівні  $F_1=1, F_2=0,99969, F_3=0,99992, F_4=0,96769$ .

Підставляючи знайдені значення формулу (2.6), отримаємо

$$M = \frac{3,14}{8} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 130 \cdot 100 \cdot \frac{4}{5 \cdot 12} \cdot (17,1 \cdot 1 - 5,4 \cdot 0,99969 - 12,2 \cdot 0,99992 + 2 \cdot 0,96769) = 6,1 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

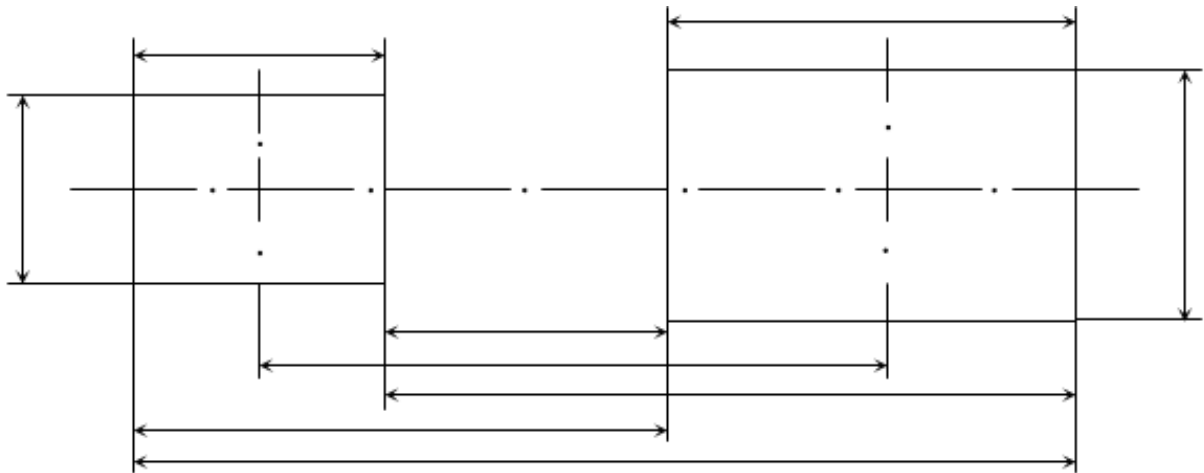


Рисунок 2.2 – До визначення взаємоіндуктивності

6. Визначимо ЕРС холостого ходу  $E_{x.x.}$  або початкова напруга  $U_0$ .

$$U_0 = k \cdot \omega \cdot M \cdot I_B, \quad (2.10)$$

де  $k = 0,1$  – поправочний коефіцієнт,

$I_B = 20$  мА – робочий струм.

$$U_0 = 0,1 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 6,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,02 = 1,5 \text{ В}$$

7. При відомій початковій напрузі  $U_0$  визначимо напругу, що вноситься в перетворювач при встановленні його на поверхню об'єкта контролю, і результуючу напругу в абсолютних одиницях

$$\underline{U}_{\text{вн}} = U_0 \cdot \underline{U}_{\text{вн}*} = 1,5 \cdot (0,06 - j \cdot 0,72) = 0,09 - j \cdot 1,08, \quad (2.11)$$

$$\underline{U}=(\underline{U}_{\text{вн}^*}+j)\cdot U_0=(0,06-j\cdot 0,72+j)\cdot 1,5=(0,06+j\cdot 0,28)\cdot 1,5=0,09+j\cdot 0,42 \quad (2.12)$$

8. За допомогою рисунку знаходимо збільшення сигналу ВСП на 1% зміни  $h^*$  -  $\Delta U_{*1\%}$ . Наприклад, при  $\beta=30$  і  $h^*=0,2$  відносно збільшення сигналу  $\Delta U_{*1\%}$  складе 0,014. У нашому випадку при  $\beta=30$  та  $h^*=0,3$

$$\Delta U_{*1\%}=0,0135.$$

10. Чутливість до зазору (товщини покриття) розрахуємо за формулою

$$S_{h^*} = \frac{\Delta U_{*1\%}}{0,01 \cdot h^*} = \frac{0,0135}{0,01 \cdot 0,3} = 4,5\% \quad (2.13)$$

Визначимо збільшення сигналу, викликане зміною зазору (товщини покриття) в межах, зазначених у завданні

$$\Delta U_{*h}=S_{h^*}\cdot(h_*'' - h_*'), \quad (2.14)$$

де  $(h_*'' - h_*') = (0,3-0,15)$  – заданий діапазон варіювання товщини покриття у відносних одиницях.

$$\Delta U_{*h}=4,5(0,3-0,15)=0,675 \quad \text{або} \quad 67,5\%$$

11. Збільшення сигналу за рахунок зміни електропровідності знайдемо за формулою

$$\Delta U_{*\sigma} = \frac{S_{\sigma^*} \cdot \Delta \sigma}{\sigma} \quad (2.15)$$

де  $S_{\sigma^*}$  – чутливість до електропровідності, яка визначається за допомогою рисунка залежно від параметра  $\beta$  та відносного зазору  $h$ .

$$\Delta U_{*\sigma} = 0,24 \cdot \frac{14,5 \cdot 10^6 \cdot 0,05 \cdot 2}{14,5 \cdot 10^6} = 0,024 \quad \text{або} \quad 2,4\%$$

12. Невелика абсолютна похибка  $\varepsilon_{\sigma}$ , яка вноситься зміною електропровідності, розрахуємо за допомогою виразу

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{(h_{\max} - h_{\min}) \cdot \Delta U_{*\sigma}}{\Delta U_{*h}}, \quad (2.16)$$

де  $(h_{\max}-h_{\min})=(300-150)$  – заданий діапазон варіювання товщини покриття в абсолютних одиницях (мкм)

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{(300 - 150) \cdot 10^{-6} \cdot 0,024}{0,675} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5,3 \text{ мкм}$$

14. Відносна помилка за рахунок зміни електропровідності дорівнює

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\varepsilon_{\sigma}}{h_{\max} - h_{\min}} = \frac{5,3}{300 - 150} = 0,035 \text{ або } 3,5\%, \quad (2.17)$$

відносна похибка за рахунок зміни електропровідності є прийнятною.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННИХ БЛОКІВ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРИЛАДУ

#### 3.1 Опис структурної схеми приладу

Схема приладу, що забезпечує вимірювання товщини покриттів на немагнітних металах в діапазоні до 1 мм, виконана оригінально. У цьому приладі вимірюються модулі активного та реактивного опорів, які на виході приладу складаються. Прилад має знижену чутливість до зміни електромагнітних властивостей основи, виготовленої з немагнітних матеріалів.

Товщиномір призначений для вимірювання діелектричних покриттів завтовшки до 300 мкм при зміні питомої електричної провідності основи від 5 до 59 МСм/м з похибкою. Структурна схема приладу, що розробляється, наведена на рис. 3.1.

Живлення приладу здійснюється від мережі 36 В, при цьому в якості джерела живлення використовується схема двополярної стабілізації.

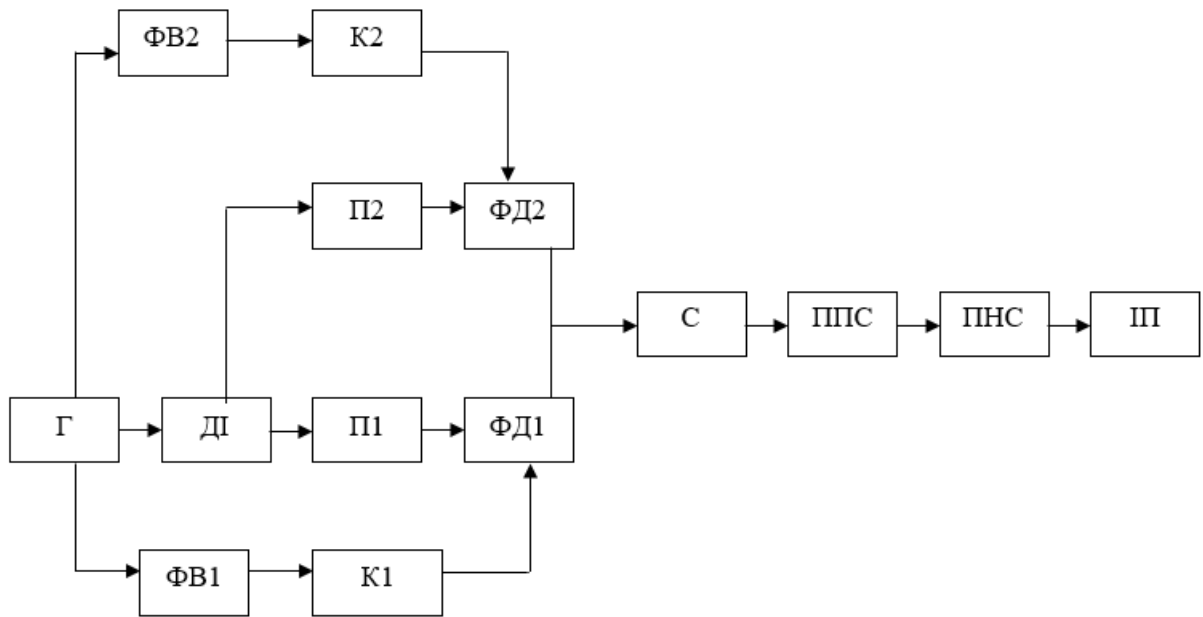


Рисунок 3.1 – Структурна схема приладу

Вхідним блоком товщиноміра є автогенератор Г, зібраний на високочастотному транзисторі VT1, який стабілізовано за частотою кварцовим резонатором. Робоча частота автогенератора становить 2 МГц. Колекторним навантаженням транзистора служить резонансний контур, що складається з первинної обмотки трансформатора Tr1 і конденсаторів С1, С2. Потім струм високої частоти (робоча частота 2 МГц) подається на обмотку збудження трансформаторного датчика ДІ і у допоміжні пристрої: фазообертачі ФВ1 і ФВ2 і компаратори К1, К2. З вихідної напруги датчика за допомогою компараторів віднімається ЕРС холостого ходу. Сигнал датчика, що несе інформацію про товщину діелектричного покриття та про питому електричну провідність основи, надходить на два канали, що містять підсилювачі (П1 і П2) і фазові детектори (ФД1 і ФД2). Обидва канали ідентичні, за винятком фазообертальної частини (ФВ1 і ФВ2). Один з каналів (П1 і ФД1) виділяє складову напруги, що збігається зі струмом (фаза опорної напруги з фазообертача ФВ1 – 90°), а другий канал (П2 і ФД2) – квадратну складову (фаза опорної напруги з фазообертача ФВ2 – 0°). Після фазових детекторів сигнали постійного струму надходять до суматора, де проводиться їх складання. Сигнал із суматора С, що несе інформацію про

товщину діелектричного покриття надходить на підсилювач постійного струму ППС, а потім сигнал приходить на вхід перетворювача напруги в струм ПНС (стабілізатор струму). У цьому випадку вихідний струм буде змінюватися пропорційно до вихідного сигналу. Для фіксації вимірювань використовується індикатор стрілок показань ПП.

При такій схемі обробки напруги, що вноситься отримані показання залежать тільки від відстані вимірювального перетворювача до поверхні металевої основи виробу і не залежать від її питомої електричної провідності. Застосування приладу з відбудовою впливу змін питомої електричної провідності дозволяє знизити похибку від впливу цих змін у 8-10 разів.

Як джерело живлення в приладі, що розробляється, використовується джерело стабілізуючої напруги STU, побудоване на мікросхемі К142ЕН6.

## **3.2 Опис електронних блоків**

### **3.2.1 Блок живлення**

Блок живлення побудований на основі двополярного стабілізатора напруги, який зазвичай виконується на основі двох однополярних, що використовують одне джерело опорної напруги. Приклад схеми такого стабілізатора наведено на рис. 3.2.

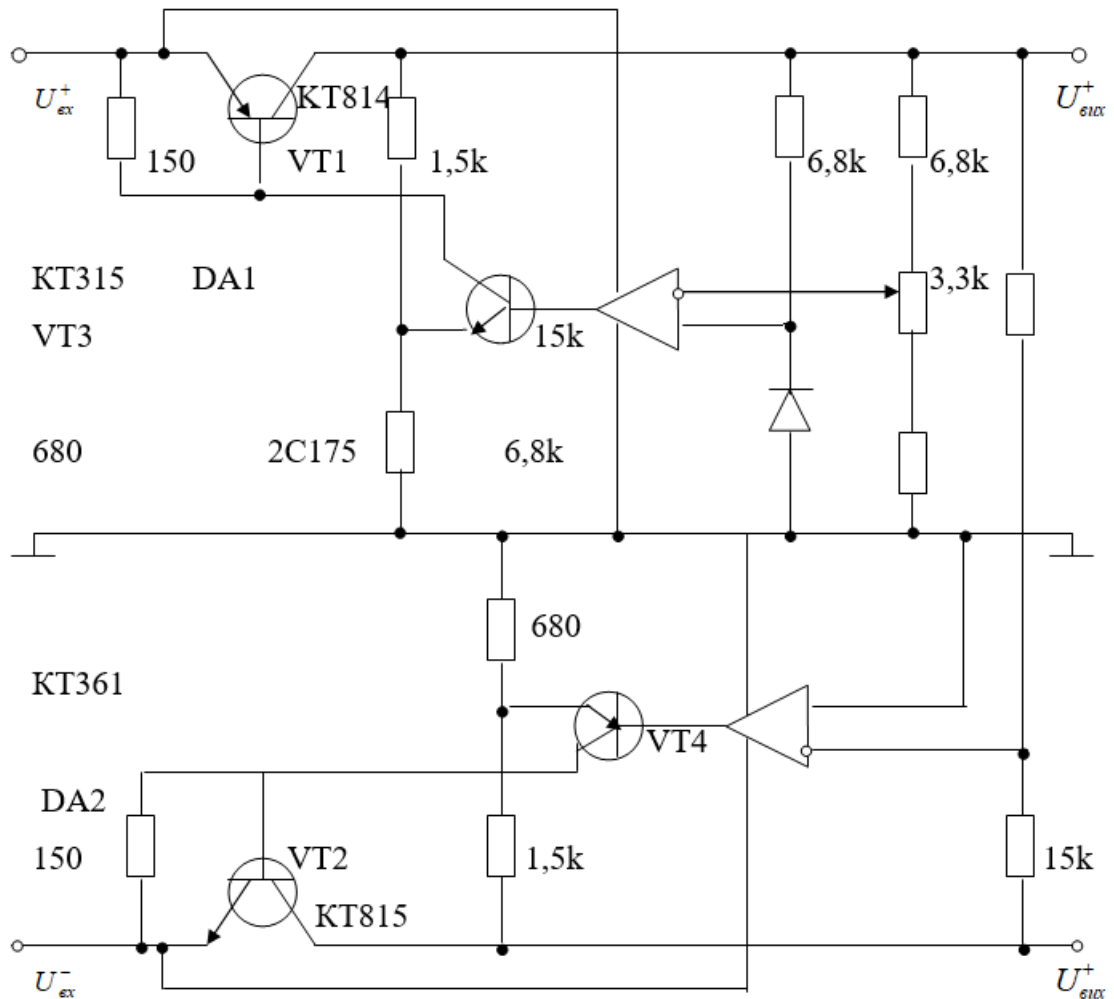


Рисунок 3.2 – Схема двополярного стабілізатора напруги

Операційний підсилювач DA2 тут включений за схемою інвертора з коефіцієнтом передачі – 1.

Завдяки цьому отримуємо  $U_{вих}^- = -U_{вих}^+$ . Вихідні каскади в двополярному стабілізаторі можуть бути побудовані на основі транзисторних повторювачів. У даному стабілізаторі застосований інший варіант вихідного каскаду, перевагою якого є можливість зменшити мінімальну допустиму різницю  $|U_{ex} - U_{вих}|$ , яка визначається напругою насичення транзисторів VT 1, VT2, і не перевищує 1В.

Транзистори VT3 і VT4 в стабілізаторі додатково посилюють струм, що надходить в бази вихідних транзисторів VT1 і VT2, що дає можливість

збільшити вихідну потужність стабілізатора за рахунок використання більш потужних транзисторів VT1 і VT2.

У цьому стабілізаторі вихідна напруга  $U_{вих}$  не може бути нижчою за опорну напругу  $U_0$ . Тому для отримання малих вихідних напруг слід використовувати низьковольтні стабілітрони.

### 3.2.2 Генератор із кварцовим резонатором Г

Генератор зібраний на високочастотному транзисторі VT1 типу 1Т308А і стабілізований за частотою кварцовим резонатором. Колекторним навантаженням транзистора VT1 служить резонансний контур, що складається з первинної обмотки трансформатора Тр1 і конденсаторів С1, С2.

Пластина кварцу здатна до власних механічних коливань, у яких як у товщині, і по довжині поширюються пружні збурення. Частота пружних коливань залежить від розмірів пластини. Щоб підтримати власні коливання пластини не загасаючими, її включають до схеми автогенератора за допомогою металевих обкладок та кварцетримача. Найбільш поширений спосіб накладання обкладок – нанесення шарів срібла на поверхню кварцу. Кварцетримач служить контакту зовнішніх проводів з обкладками. Конструкцію з кварцової пластини та кварцетримача називають кварцовим резонатором.

### 3.2.3 Фазообертачі ФВ1 та ФВ2

Фазообертачі, які служать для початкової установки фази опорної напруги, побудовані на підсилювачах типу К140УД23. Схема фазообертача зображена на рис. 3.3. Коефіцієнт передачі фазообертача  $k=1$ , тоді  $\varphi = -2 \cdot \arctg \omega \cdot R_1 \cdot C$  і модуль не залежить від положення резистора  $R_1$ , тоді як фаза змінюється від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .



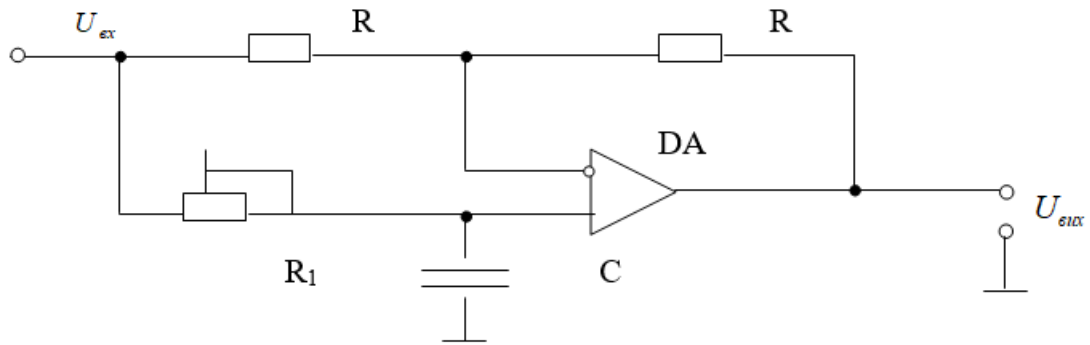


Рисунок 3.3 – Схема фазообертача

Оскільки частота вихідного сигналу дорівнює 2 МГц, а коефіцієнт передачі фазообертача  $k = 1$ , то частота одиничного посилення повинна бути не менше 2 МГц, тому вибираємо операційний підсилювач типу К140УД23.

### 3.2.4 Компаратори К1, К2

Компаратор – найпростіший перетворювач безперервного сигналу дискретний. Напряга на виході компаратора може перебувати на одному з двох фіксованих рівнів: на нижньому, якщо напряга на його вході, що не інвертує, більше напряги на інвертуючому вході, і на верхньому – при протилежному співвідношенні цих напряг.

Звичайний операційний підсилювач (ОП) може бути успішно застосований для роботи в якості компаратора. Однак, компаратори, спеціально розроблені для перетворення безперервних сигналів на дискретні, мають ряд переваг у порівнянні зі звичайним ОП. Насамперед компаратори перемикаються набагато швидше, ніж ОП. Це досягається завдяки тому, що при проектуванні компаратора спеціально передбачаються заходи, що забезпечують швидкий вихід підсилювальних каскадів із режиму насичення. Крім того, на відміну від ОП вихідний сигнал компаратора зазвичай змінюється в межах, що дозволяють проводити безпосереднє управління логічними інтегральними схемами. Компаратор може мати окремі стробуючі входи, змінюючи потенціал яких, можна включати компаратор в роботу або вимикати його.

Схеми компараторів подібні до схем операційних підсилювачів, але зазвичай простіше їх. Параметри, що характеризують компаратори, майже такі самі як ОП. Це вхідний струм ( $I_{вх}$ ), напруга зміщення, коефіцієнт посилення, допустимий діапазон синфазного вхідного сигналу, час затримки включення ( $t_{вкл}$ ), здатність навантаження, струм споживання ( $I_{п}$ ).

Вітчизняна промисловість випускає різноманітні типи компараторів. Для роботи товщиноміра, що розробляється, використовуються компаратори DA3 і DA4 типу K140УД23.

### 3.2.5 Підсилювачі П1 та П2

Схема інвертуючого підсилювача показана на рис. 3.4. Інвертуючий підсилювач, що змінює знак вихідного сигналу щодо вхідного, створюється введенням по входу, що інвертує, ОП за допомогою резистора  $R_{oc}$  паралельного негативного зворотного зв'язку по напрузі. Неінвертуючий вхід зв'язується із загальною точкою входу і виходу схеми (заземляється). Вхідний сигнал подається через резистор  $R_1$  на вхід ОУ, що інвертує.

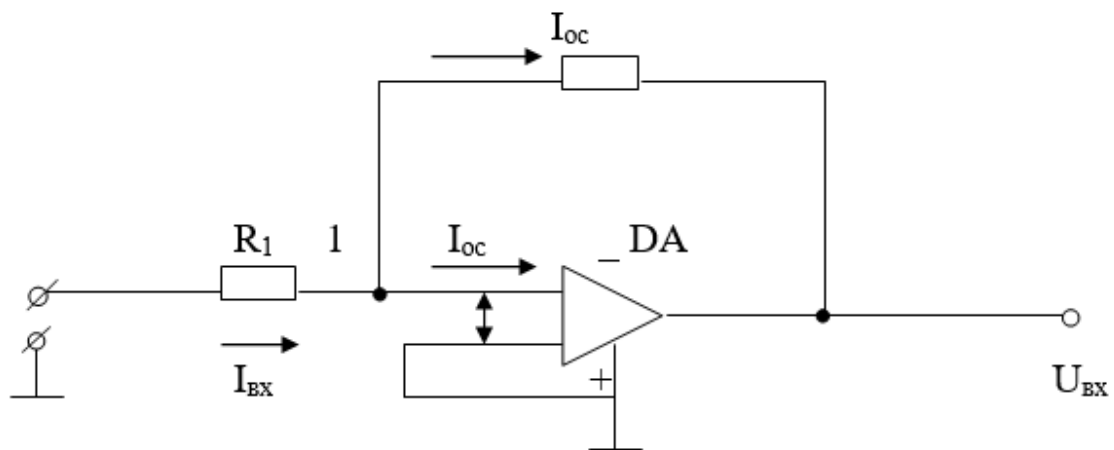


Рисунок 3.4 – Схема інвертуючого підсилювача

Показники схеми можна визначити, скориставшись рівнянням струмів для вузла 1. Якщо прийняти  $R_{вх.оп} = \infty$  і вхідний струм ОП  $I_{oy} = 0$ , то  $I_{вх} = I_{oc}$ , звідки

$$\frac{U_{\text{вх}} - U_0}{R_1} = -\frac{U_{\text{вих}} - U_0}{R_{\text{оп}}}. \quad (3.1)$$

При  $K_{\text{иоу}} \rightarrow \infty$  напруга на вході ОУ  $U_0 = U_{\text{вих}} / K_{\text{иоп}} \rightarrow 0$ , у зв'язку з чим вираз (3.1) набуває вигляду

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{вих}}}{R_{\text{ос}}}. \quad (3.2)$$

Отже, коефіцієнт посилення за напругою підсилювача, що інвертує, з паралельним зворотним зв'язком

$$K_{\text{ін}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \quad (3.3)$$

визначається параметрами лише пасивної частини схеми:

$$K_{\text{ін}} = -\frac{R_{\text{ос}}}{R_1}. \quad (3.4)$$

Для підсилювачів, що інвертують, вибираємо також тип К140УД23.

### 3.2.6 Фазові детектори ФД1 і ФД2

Фазові детектори складаються з диференціального підсилювача та фільтра низьких частот, які разом працюють за схемою керованого випрямляча. Для цього приладу вибираємо диференціальний підсилювач типу К140УД23, а фільтр низьких частот типу К140УД17 для більшої швидкодії.

### 3.2.7 Суматор С

Для сумування кількох напруг застосовуємо операційний підсилювач в включенні, що інвертує. Вхідні напруги через додаткові резистори подаються на N-вхід підсилювача (рис. 3.5). Оскільки ця точка є віртуальним нулем, то на підставі правила вузлів отримаємо наступне співвідношення вихідної

напруги схеми: 
$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} + \frac{U_{\text{вих}}}{R_n} = 0.$$

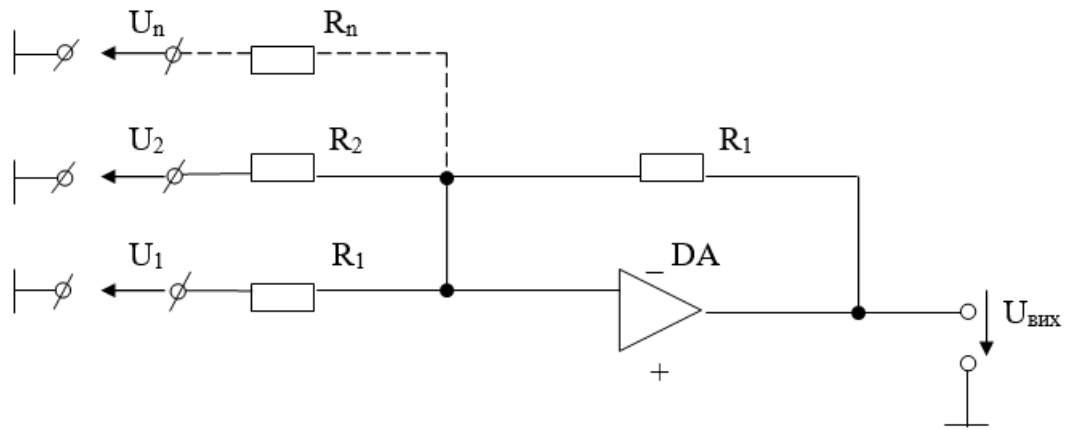


Рисунок 3.5 – Схема інвертуючого суматора

Інвертуючий суматор може бути також використаний як підсилювач із широким діапазоном зміни нульової точки. Для цього на один із входів схеми подається постійна напруга.

### 3.2.8 Підсилювач постійного струму УПТ

Підсилювач постійного струму входить до складу електричної схеми як підсилювач, що масштабує. Масштабуючий підсилювач застосовується для приведення вихідного сигналу первинного вимірювального перетворювача (датчика) до стандартного рівня для подальшого його перетворення та обробки в мікропроцесорних системах керування або вимірювання

### 3.2.9 Перетворювач напруга – струм

Перетворювачі напруги струм застосовуються тоді, коли необхідно, щоб струм у навантаженні був пропорційний вхідному напрузі і не залежав від опору навантаження. Зокрема постійній вхідній напрузі струм у навантаженні також буде постійним. Тому такі перетворювачі іноді умовно називають стабілізаторами струму.

Найпростіша схема стабілізатора струму, показана на рис. 3.6. являє собою інвертуючий підсилювач, в якому навантаження  $R_n$  включена в ланцюг зворотного зв'язку (негативного) операційного підсилювача. Струм у навантаженні дорівнюватиме  $U_{вх}/R_1$ .

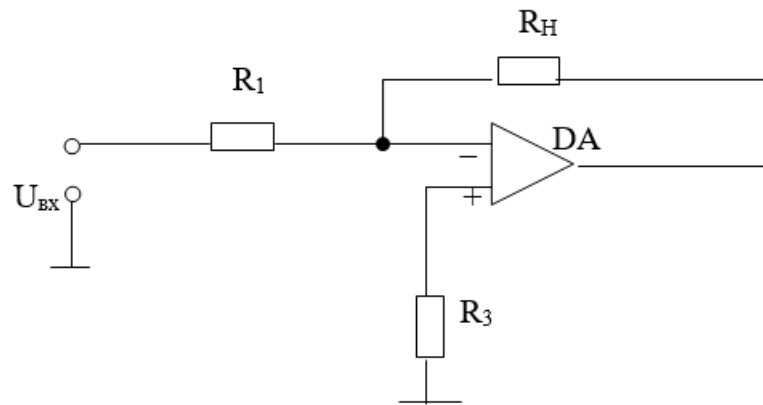


Рисунок 3.6 – Перетворювач напруга-струм на базі інвертуючого підсилювача

У стабілізаторі струм, що споживається від джерела  $U_{вх}$ , дорівнює струму, що проходить по опору навантаження. Причому, щоб зменшити навантаження на джерело вхідної напруги його підключають до входу ОУ, що не інвертує.

У стабілізаторах струму на рис.3.4. навантаження немає заземленого затиску, що завжди зручно. У цьому сенсі досконаліші схеми стабілізаторів струму, дозволяють мати заземлене навантаження.

### 3.2.10 Індикатор показників ПІ

Всі сигнали з виходу перетворювача напруга-струм надходять на індикатор показань, в якості якого виступає мікроамперметр М-24, де і реєструються.

Всі електронні блоки приладу, що розробляється, виконані на операційних підсилювачах швидкодіючого типу К140УД23 і прецизійного К140УД17А. На швидкодіючих підсилювачах виконані фазообертачі, компаратори та підсилювачі, а на прецизійних – суматор, фазові детектори, перетворювач напруги в струм і масштабуючий підсилювач.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИЛАДУ ТА ЙОГО ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД

Все більш різноманітне використання радіоелектронної апаратури в різних галузях народного господарства, особливо в тих, де вона раніше зовсім не застосовувалася, значно посилило вимоги до конструкцій, що розробляються.

Загальні технічні вимоги розробки радіоелектронної апаратури за своїм характером діляться на загальні експлуатаційні, загальні конструктивні і спеціальні технічні.

З цих загальних вимог впливають окремі вимоги на розробку корпусу радіоелектронного приладу, які можна розбити також на три групи:

- а) експлуатаційні вимоги;
- б) вимоги до корпусу приладу та до компонування на ньому апаратури;
- в) конструктивно-технологічні та виробничі вимоги.

#### 4.1 Експлуатаційні вимоги

Винятково важливе значення в умовах експлуатації, що ускладнилися, набув комплекс вимог, об'єднаних поняттям надійність і полягають у забезпеченні стабільності параметрів, заданої точності та довговічності виробів.

Ось чому при конструюванні виробів, при виборі матеріалу для деталей, а також при виборі електричних елементів і готових виробів у першу чергу слід керуватися умовами експлуатації апаратури, які обумовлюються загальними або спеціальними вимогами на розробку радіоелектронної апаратури.

Умови експлуатації визначаються в основному двома видами факторів: кліматичними та механічними. Але при розробці конструкцій необхідно враховувати також умови зберігання та транспортування, конструктивно-технологічні вимоги та ін.

Експлуатаційні вимоги спрямовані на те, щоб були забезпечені:

– оперативність обслуговування – мінімальні витрати часу на підготовку приладу до запуску, швидкий запуск в роботу, можливість обійтися малим числом обслуговуючого персоналу та ін;

– зручність обслуговування – хороший доступ до блоків та регульованих елементів, можливість швидкого огляду та ремонту; зручне підключення контрольно-вимірювальної апаратури, раціональне розташування органів управління (ручки, вимикачі, кнопки, штурвали) та спостереження (шкали, екрани, сигнальні лампочки тощо);

– безпека обслуговування – відсутність на корпусі приладу гострих кутів, кромek і виступаючих частин, наявність застережливих написів, блокуючих пристроїв та пристроїв заземлення, дотримання протипожежних вимог, наявність захисних кожухів, захисних пристроїв та інших заходів безпеки, що виключають можливість травмування обслуговуючого персоналу експлуатації;

– тривалість терміну служби та збереження апаратури в заданих умовах експлуатації;

– пристосованість до тривалого зберігання – простота консервації та невибагливість до умов складування;

– механічна міцність та жорсткість конструкції – надійність роботи елементів, вузлів та блоків, розміщених у корпусі приладу, при впливі на нього періодичних та аперіодичних сил, що викликають механічні навантаження; забезпечення приладового корпусу засобами, що захищають блоки від впливу вібрації, ударів, лінійних та кутових прискорень як при експлуатації, так і при транспортуванні приладів;

– стійкість параметрів апаратури та збереження її під впливом різних кліматичних факторів, а саме: зміни вологості, температури та тиску; захищеність від дощу, бризок води, дрібнорозпиленних солей та пилу в навколишньому середовищі;

– підтримка нормального теплового режиму всередині корпусу приладу, що досягається правильним вибором засобів вентиляції (витяжна, приточна або приточно-витяжна), способів охолодження (природний чи примусовий, від індивідуального вентилятора чи загальної вентиляційної магістралі тощо);

– спеціальні якості, що диктуються родом апаратури, сферою її застосування та умовами її використання.

Так, апаратура, що встановлюється стаціонарно в закритому приміщенні, що опалюється і добре вентиляється, повинна бути захищена від зовнішніх механічних пошкоджень; польова апаратура повинна мати надійний захист від шкідливого впливу навколишнього середовища (запиленості, підвищеної вологості, загазованості, наявності солей у повітрі, різких коливань температури), а також повинна бути забезпечена водозахищеним кабельним зв'язком, додатковим обладнанням тощо.

Крім перелічених вище загальних вимог, розробки конструкції часом потрібно враховувати і додаткові, специфічні вимоги. Зокрема, при конструюванні апаратури, призначеної для встановлення на автомашинах, залізничних поїздах та інших видах наземного транспорту, необхідно домагатися раціонального розміщення її в кабінах, кузовах, вагонах тощо.

Розробка переносної або пересувної (перебазованої з одного місця на інше) апаратури повинна бути спрямована на максимальне обмеження ваги та габаритів приладів та окремих їх частин, забезпечення простоти розбирання багатоблочних приладів на зручні для перенесення або перевезення частини та подальшого швидкого збирання їх. Нарешті, повинні бути забезпечені простота та надійність електричних з'єднань приладів та



блоків між собою, транспортабельність окремих частин, наявність укладальних засобів, такелажного майна та різного додаткового обладнання.

#### **4.2 Вимоги до приладових корпусів та до компонування в них апаратури**

Загальні вимоги до приладових корпусів та умов компонування в них апаратури спрямовані на те, щоб забезпечити:

– необхідну за умовами експлуатації механічну захищеність приладу та зв'язків між блоками, доцільне розміщення блоків, зручний доступ для огляду, регулювання та дрібного ремонту при мінімальному обсязі робіт з розбирання;

– захист апаратури від випадкових механічних пошкоджень при обслуговуванні;

– надійність кріплення приладу до фундаменту безпосередньо або на амортизаторах, доступність кріплення без додаткового розбирання, можливість зміни амортизаторів тощо;

– провідний зв'язок між блоками та кабельний зв'язок між приладами, підключення приладу до загальної кабельної схеми, а блоків – до міжблочного електричного монтажу;

– відсутність взаємних наведень між блоками та електричними ланцюгами міжблочного монтажу, між вводами та виводами кабелю, між клемними платами та іншими елементами;

– гарантію ефективного та стійкого екранування електростатичних та електромагнітних полів;

– зменшення втрат в електричних ланцюгах та зниження шкідливих зв'язків між блоками, максимальне скорочення довжини монтажних проводів, надійність закріплення джгутів електричного монтажу, раціональний вибір місць укладання міжблочного монтажу тощо;

– зручність транспортування у навантаженні приладу, встановлення на корпусі приладу транспортувальних засобів, визначення транспортабельних

габаритів та місць роз'ємів для перевезення, надійність кріплення та амортизації в пакувальній тарі, наявність у роз'ємах тимчасових заглушок, що оберігають блоки від пошкодження;

– раціональні габарити, об'єм (форму) та вага корпусу, максимальний коефіцієнт заповнення корпусу (використання об'єму), раціональне використання відведеного для приладів приміщення;

– засоби охолодження або підігріву корпусу приладу, приєднання повітропроводу, пристрій каналів охолодження або підігріву, вибір найпростіших та найефективніших засобів примусової чи природної вентиляції.

### **4.3 Конструктивно-технологічні та виробничі вимоги**

Призначення цих вимог – забезпечити:

– взаємозамінність блоків та електричних елементів, що встановлюються в корпусі, окремих вузлів та деталей несучої конструкції;

– максимальну типізацію та уніфікацію конструкції корпусу та його вузлів, використання типових конструкцій, типове оформлення корпусів у вигляді стійок, шаф, контейнерів, кожухів скриньок, уніфікацію елементів арматури корпусів, кратність розмірів типових блоків, вузлів та модулів;

– максимальне скорочення номенклатури електричних елементів, матеріалів та напівфабрикатів;

– технологічність деталей та вузлів, тобто зручність складання, максимальну можливість механізації та автоматизації виробничого процесу при виготовленні, закінченість виробничого циклу виготовлення блоку, вузла та корпусу;

– необхідні міцність та довговічність конструкції, що досягається ретельним вибором профілю балок несучої конструкції та раціональним розподілом навантажень між ними, правильним вибором якості матеріалів, створенням нормального запасу міцності тощо;

– гарний зовнішній вигляд приладу, простоту та строгість форми, вдале поєднання кольорів, вибір найкращого оздоблення, відсутність зайвої декоративності;

– раціональний вибір матеріалів, що володіють міцністю, малою питомою вагою, антикорозійністю, малою вартістю, за дотримання відповідності їх експлуатаційним умовам тощо;

– раціональний вибір покриттів та оздоблень, створення стійких антикорозійних покриттів, захисних та декоративних забарвлень за мінімальної номенклатури забарвлень, гальванічних та інших видів покриттів.

Цей далеко не повний перелік технічних вимог, що обумовлює створення досконалої та надійної в експлуатації радіотехнічної апаратури, висуває ряд складних завдань, які доводиться творчо вирішувати конструктору-приладобудівнику.

На вигляд прилади можуть відрізнитися формою корпусу, габаритами, компонованням елементів, обробкою та забарвленням. Ці особливості залежать від призначення приладів і від того, де вони використовуються – в медицині чи залізничному транспорті, промисловості чи сільському господарстві, на кораблях чи авіації тощо.

Кожен із елементів зовнішнього оформлення приладів тією чи іншою мірою зумовлює певні технологічні та експлуатаційні властивості конструкції. Зрозуміло, створення гарного та зручного в експлуатації приладу потребує гармонійного поєднання елементів зовнішнього оформлення з раціональним компонованням окремих конструктивних елементів та монтажної схеми, а також зручного розташування органів управління та спостереження.

У цьому плані важливу роль відіграють естетичні міркування, яким у радіоелектронному приладобудуванні, так само як і в інших галузях промисловості, надається велике значення.

Гармонійність поєднання елементів залежить передусім від цього, якою мірою конструктор під час розробки керується законами зорового сприйняття і правилами освіти естетичних форм технічно досконалих приладів. Інакше кажучи, якість зовнішнього оформлення приладу залежить від того, якою мірою засоби виконання технічних вимог вдало поєднуються з його зовнішньою формою, кольором забарвлення і з прийнятою системою місцевого освітлення (підсвічування) шкал і лицьових панелей.

Для створення гарного зовнішнього вигляду приладу при конструюванні слід насамперед прагнути:

а) до дотримання оптимальних співвідношень габаритних розмірів – ширина приладу має бути порівнянна з висотою, прилад не повинен здаватися занадто плоским або, навпаки, занадто виступаючим тощо;

б) до простого і ясного оформлення шкал, рукояток, написів та інших елементів, а також до правильного взаємного розташування написів;

в) до згладжування зовнішніх контурів приладу – строгість зовнішньої форми корпусу досягається обмеженням кількості виступаючих частин та виключенням гострих кутів, що одночасно захищає обслуговуючий персонал від випадкових травм.

Взагалі при конструюванні приладу треба враховувати, що велика кількість зовнішніх контурних переходів у приладового корпусу створить враження складності апаратури, що здається. Це враження можна послабити, застосувавши симетричне компонування як самого приладу, так і розміщених на ньому органів управління та спостереження. Однак при цьому не слід порушувати принцип логічної освіти форми приладу і відмовлятися від ефективного, технічно обґрунтованого компонування.

При визначенні форми приладів треба враховувати такі істотні чинники, як форма і розміри приміщень, призначених для установки апаратури. Тут слід насамперед керуватися необхідністю забезпечити зручні підходи до апаратури та хорошу життєдальність приміщень.

Користування апаратурою, розміщеної в автомашинах, літаках, корабельних рубках і відсіках, дуже важко через тісноту робочих приміщень. У цих випадках важливо, використовуючи закони зорового сприйняття, створити в оператора відчуття простору приміщення та зручності роботи.

Це досягається доцільним вибором колірної гами при обробці площин і раціональним освітленням як самих приладів, так і приміщень, призначених для їх встановлення. При цьому необхідно керуватися фізіологічними законами найбільш сприятливого сприйняття оком людини колірних та світлових відчуттів.

Відомо, що швидкість зчитування далеко не в останню чергу визначається контрастністю між фоном панелі або шкали, з одного боку, та кольором нанесених на них цифр, написів, поділів та покажчиків (стрілок) – з іншого. Швидкість, з якою людина реагує на сигнали, що говорять про необхідність виконання тих чи інших перемикань, також багато в чому залежить від маркування кольорів органів управління за різними режимами робіт.

Колір є важливим засобом вирішення та інших питань. Так, колір можна використовувати на користь техніки безпеки, щоб зосередити увагу оператора, або на користь експлуатації, щоб забезпечити швидку реакцію його на найважливіший сигнал. Крім того, кольором та інтенсивністю його тону можна викликати різні фізіологічні відчуття: теплоти чи холоду, напруженості чи спокою, помітності чи прихованості. Забарвлення в певний колір надає предметам враження: тяжкості або легкості, площині, що відступає або виступає, гладкої або фактурної поверхні.

Наприклад, сині та зелені тони викликають почуття прохолоди, червоний та помаранчевий – почуття теплоти. Контраст між «важкими» (чорний і червоний) тонами фарбування верхньої частини приладу і «легкими» (світлими) тонами фарбування нижньої його частини створює пригнічуючу напруженість у оператора, і, навпаки, фарбування верхньої частини в «легкі» тони, в нижній – «важкі» створює спокійну впевненість у

стійкості апаратури та враження вільного розміщення у малому просторі. Площини, забарвлені у світлі тони, здаються більше за розмірами площин, забарвлених у темні тони.

Колір фарбування часто визначає характер приладу чи його призначення. Так, при виготовленні приладів спеціального призначення зазвичай застосовують вузьку гаму кольорів забарвлення зовнішніх поверхонь, що забезпечує спокійне зорове сприйняття.

Зовнішня обробка приладів вимагає ширшого діапазону кольорів забарвлення, так як у цьому разі часто виникає необхідність зосередити увагу оператора на певних ділянках приладу. Внутрішні поверхні приладів зазвичай фарбують у світлі тони. Це забезпечує хорошу помітність електроелементів і електромонтажу, що особливо важливо в слабо освітлених приміщеннях.

#### Освітлення шкал та лицьових панелей

Раціональність освітлення визначається колірним сприйняттям ока. У зв'язку з цим використання кольорового освітлення обумовлюється низкою технічних і фізіологічних чинників, наприклад, необхідністю підвищити помітність предметів, знизити стомлюваність зору тощо. Кольорове освітлення полегшує розгляд дрібних написів, поділів і цифр.

Кольорові фільтри, використані при освітленні шкал чи таблиць, збільшують їх ясність і чіткість, отже, і помітність поділів і цифр. Особливо широко поширені фільтри жовтих і помаранчевих тонів, що переважають у сонячному спектрі, до якого наше око добре пристосоване.

Освітленість робочих поверхонь приладу має бути рівномірною та «м'якою» (без різких тіней). М'якість освітлення досягається винятком із поля зору яскравих предметів, відблисків та відбиття від полірованих або глянсових поверхонь. Рівномірність освітлення забезпечується раціональним розміщенням ламп підсвічування, місцевого освітлення та світильників загального світла, а також застосуванням захисних козирків, спеціальних відбивачів та світловодів із органічного скла.

Під час проектування освітлення слід керуватися загальними правилами освітлення та нормами освітленості робочих місць операторів. Сильна освітленість елементів приладу або надмірна яскравість сигнального скла заважають оператору розрізнити поділки на шкалах і написи, що знаходяться в умовах меншої освітленості; відповідно тривалість зчитування показань збільшується на час, необхідне пристосування (адаптації) очі оператора до певної яскравості поля.

Тому в приладах зазвичай застосовують регулювання яскравості сигнальних ламп, електронно променевих трубок і систем підсвічування шкал. На закінчення необхідно відзначити, що створення радіоелектронного приладу з гарним зовнішнім виглядом часто буває не під силу одному конструктору, тому що коло питань, що належать до його компетенції і так значне; тому до роботи над зовнішнім виглядом приладу доцільно залучати художників-оформлювачів, які мають спеціальну технічну освіту.

У магістерській роботі товщиномір є приладом переносного типу з масою 5 кг. Габарити приладу становлять 100x300x250 мм. Каркас приладу виготовляється зі сталі 20, а кришки зі сталі 45, передня та задня панелі виготовлені з алюмінію.

Зовнішній вигляд приладу: на передній панелі розміщено мікроамперметр, тумблер живлення та світлодіод «Мережа», а також роз'єм РС10ТВ для включення датчика та ручка налаштування. На задній панелі приладу є роз'єм для приєднання шнура до мережі та запобіжник.

Колірна гама приладу буде такою: фундамент приладу, тобто нижня кришка та каркас пофарбовані чорним кольором, верхня кришка – насиченого синього кольору, передня та задня панелі – кремового. Усі написи на передній та задній панелі пишуться чорним кольором.

## РОЗДІЛ 5

### ОСОБЛИВОСТІ МЕТРОЛОГІЇ ПРИ ВИМІРІ ТОВЩИНИ ПОКРИТТІВ

#### 5.1 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.

## **5.2 Характеристика вимірів товщини покриття**

При вимірі товщини покриттів прилади та установки повинні мати контрольні зразки.

Надзвичайно важливо, щоб усі фіксовані параметри зразків витримувалися постійними з більш високою точністю, ніж при контролі

властивостей монолітних виробів, через абсолютних малих значень сигналів від зміни товщини. Крім того, товщиноміри покриттів, маючи підвищену чутливість порівняно з вимірювачами інших параметрів, більше зазнають впливу факторів, що заважають, таких як зміна властивостей, форми і якості поверхні об'єкта контролю.

Для перевірки та налагодження конкретного приладу необхідні контрольні зразки. Вони повинні виготовлятися як робочі міри на заводі-виробнику та додаватися до приладу. Кількість та якість зразків визначаються відповідними метрологічними організаціями та повинні гарантуватися заводом-виробником.

Можна використовувати і допоміжні робочі міри у вигляді контрольованих виробів, виготовлених стосовно вирішення конкретної вимірювальної задачі, яка вирішується за допомогою типових або спеціально розроблених приладів та установок. Дуже важливу роль при впровадженні приладу відіграє форма та розміри зразка, чистота обробки поверхні, метрологічна підготовка контрольних зразків та, нарешті, технологія нанесення покриття на них.

Великі труднощі виникають під час виготовлення зразків внаслідок підвищеної вимогливості до стабільності їх параметрів. Не вирішена остаточно і проблема атестації зразків, оскільки металографічний аналіз не завжди може дати точні значення товщин шарів, покриттів, особливо для м'яких матеріалів.

Товщиноміри тонких покриттів часто контролюються двома зразками: без покриття та з покриттям максимальної товщини. У більшості випадків цього недостатньо, оскільки через неправильний вибір умов контролю або наявності нелінійності в тракці товщиноміра шкала індикатора, як правило, нелінійна. Тому необхідно як мінімум використовувати третій зразок із товщиною покриття приблизно рівною половині максимальної товщини. Для багатограничних приладів необхідно мати такі зразки з товщиною покриття, що відповідає кожному діапазону вимірювання. У багатопараметрових

приладах та установках кількість зразків має визначатися з урахуванням конкретного впливу всіх факторів на необхідну точність контролю.

При імітації товщини неметалічних покриттів прокладками останні повинні виготовлятися із досить міцних зносостійких матеріалів. Накладати їх один на одного не слід, тому що починають позначатися їх пружні властивості, повітряні проміжки, витріщання і т. п. похибка вимірювань товщини покриттів зазвичай менша у приладів, що мають нормоване притискання датчика, що забезпечує сталість тиску на зразок або виріб.

Метрологічна оцінка якості приладів проводиться на заздалегідь підготовлених та атестованих метрологічними організаціями контрольних зразках, методика виготовлення яких складається з особливостей технології виготовлення контрольованих деталей.

Виготовлення цих зразків проходить у два етапи: перший етап полягає у підготовці металевих заготовок, другий етап включає нанесення покриттів на заготовки. Для виготовлення металевих заготовок краще використовувати прутковий матеріал діаметром не менше 60 мм або лист товщиною не менше 10 мм. З цього матеріалу виготовляють заготовки – з прутка завтовшки 10 мм, а з листа – квадрати розміром 50×50 мм. При нарізанні їх необхідно звернути увагу на те, щоб метал заготовок не мав дефектів у вигляді пір і тріщин і був однаковим за структурою. Після цього заготівлі механічно обробляють до необхідного розміру. На бічній поверхні заготовок гравіюють маркування зразка, матеріал, порядковий номер, характер термообробки. Гострі та прямокутні краї заготовок необхідно закруглити під радіус. Потім, якщо це необхідно за технологією, заготовка термообробляється за режимом виготовлення деталі.

Після термообробки деталі її великі поверхні шліфують і доводять притиранням до необхідної паралельності. Вимірювання паралельності проводять за двома взаємно перпендикулярними діаметрами в декількох точках. Якщо заготовки виготовляються з кольорового металу, поверхні

обробляються на токарному верстаті за спеціальною технологією, що включає алмазне точення, яке дає чистоту поверхні  $\nabla 8$ .

Перед нанесенням покриття всю поверхню зразка необхідно знежирити, протерти серветкою, змоченою у бензині.

Після цього зразок затискають у хомут або різьбовим з'єднанням приєднують до струмового приводу гальванічної ванни.

Гальванічне покриття наносять тільки на середню частину зразка діаметром на 20-30% менше, ніж діаметр заготовки. Гальванічне покриття на зразок наноситься за прийнятою технологією та з дотриманням усіх правил інструкції з нанесення покриттів. Товщина шару гальванічного покриття на зразку повинна бути дещо більшою, ніж необхідно нанести. Відпрацювання режиму нанесення товщини гальванічного покриття в часі можна провести на зразках-свідках. Після нанесення покриттів зразок виймають із ванни, очищають від ізоляції та притиранням доводять до необхідної товщини покриття. Товщину гальванічного покриття перевіряють на оптиметрі по 4-5 точках.

Серійні прилади для вимірювання товщини покриттів проходять державні випробування згідно з ДСТУ.

Товщиноміри, випущені в одиничних примірниках для виконання науково-дослідних або дослідно-конструкторських робіт, а також прилади, що виготовляються підприємствами та організаціями разовими партіями для відомчих потреб, атестуються в індивідуальному порядку метрологічними організаціями Держстандарту чи відомчими органами метрологічної служби. У цьому випадку на випробування подаються три прилади з технологічною документацією, виконаною за ДСТУ, а також перелік апаратури або за погодженням з комісією, що проводить випробування, атестована апаратура, необхідна для проведення випробувань з посвідченням метрологічної організації Держстандарту, що підтверджує результати атестування та посібником з користування.



Випробування зразків проводяться за програмою, складеною розробником приладу, відповідно до технічних умов на засіб вимірювань.

### **5.3 Рекомендовані вимоги до спеціальних зразкових мір товщини неелектропровідних покриттів**

1. Міри товщини покриттів повинні бути виконані у вигляді набору діапазону товщин від 5 до 300 мкм.

2. Рекомендовані номінальні розміри мір за товщиною в наборі: 5–10–15–20–25–30–35–40–45–50–100–150–200–250–300 мкм. (можуть коригуватися в процесі роботи згідно з ДСТУ та ТУ на плівки).

3. Відхилення товщини міри від номінального розміру має знаходитися в межах допуску на товщину плівки за ДСТУ та ТУ.

4. Похибка атестації мір товщини покриттів повинна бути не більше  $0,1 \div 1,0$  мкм (або не більше 2% від номінального розміру товщини міри).

5. Площа атестованої робочої зони міри товщини обмежена колом діаметром не менше 20 мм. Робочу зону міри товщини покриттів виділити колом діаметром не менше 20 мм.

6. При атестації мір товщини покриттів вимір проводити у п'яти точках робочої зони міри: чотири точки по колу зони діаметром 20 мм та п'ята – у центрі (рис. 5.1). Методику атестації можна змінити за умови підвищення точності.

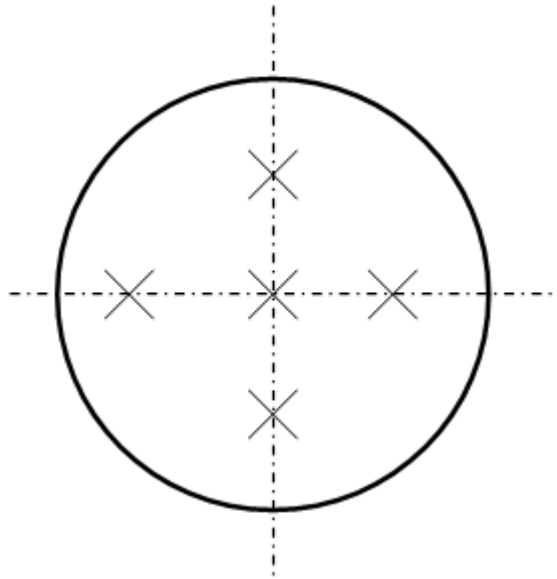


Рисунок 5.1 – Зразкова міра

Міри товщини покриття повинні бути виготовлені з неелектропровідного матеріалу (плівки) будь-якого кольору та хімічного складу. Фізико-механічні та діелектричні властивості повинні відповідати вимогам стандартів на плівку.

7. Для збереження та зручності користування кожна міра повинна поміщатися у спеціальну електроізоляційну оправу.

8. Оправа може бути виготовлена з картону, прес-шпану та інших матеріалів.

9. Оправа складається із двох склеєних половинок із наскрізними вирізами квадратної форми 40×40 мм. Між половинками оправы симетрично вирізам вклеюється атестована плівка (конструкція та форма оправы підлягають узгодженню із замовником у процесі розробки).

10. На оправі повинні бути зазначені ДСТУ або ТУ на плівку, товщина плівки у п'яти точках (рис.5.1).

11. Кожна міра товщини покриттів повинна забезпечуватись атестатом, підписаним особами, які проводили вимірювання та головним метрологом підприємства [1].

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі було проведено аналіз та розроблено вихрострумний товщиномір для вимірювання діелектричного покриття на неферомагнітній основі.

В огляді методів вимірювання товщини покриттів було розглянуто магнітний, індукційний, оптичний, ємнісний, термоелектричний, тепловий, ультразвуковий, а також вихровий методи та наведено описи конструкцій приладів.

При розрахунку вихрострумного перетворювача були визначені його геометричні розміри, а саме діаметри обмотки збудження та вимірювальної обмотки, рівні відповідно  $D_g = 4 \text{ мм}$ ,  $D_u = 2 \text{ мм}$  та їх довжини, рівні  $L_g = 12 \text{ мм}$ ,  $l_u = 5 \text{ мм}$ , а також визначена чутливість до зазору, що дорівнює 4,5%, що свідчить про незначний вплив чутливості електромагнітних властивостей основи. Для проведення контролю вибирається вихрострумний трансформаторний накладний перетворювач.

Далі було розроблено структурну схему товщиноміра з описом її основних електронних блоків.

Прилад відноситься до переносного типу з масою 5 кг та габаритними розмірами 100×300×250 мм.

У результаті наведено методика метрологічної оцінки та перевірки приладу, і рекомендовані вимоги до спеціальних зразкових заходів товщини неелектропровідних покриттів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miller, R.A “Thermal Barrier Coatings of Aircraft Engines: History and directions” *Journal of Thermal Spray Technology* 1997, pp 35 - 42
2. Bhagi LK, Rastogi V, Gupta P (2017). "Study of corrosive fatigue and life enhancement of low pressure steam turbine blade using friction dampers". *Journal of Mechanical Science and Technology*. 31: 17–27. doi:10.1007/s12206-016-1203-5.
3. Kurt H. Stern *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, ISBN 0412544407, Chapman & Hall.
4. Thomas E. Strangman *Metallurgical and protective coatings thermal barrier coatings for turbine airfoils* / Thomas E. Strangman // *Thin solid films*, 1985. – 127. – P. 93–105.
5. De Matthew J. Donachie, Stephen James Donachie *Superalloys: A Technical Guide – Pag 319* ISBN 0871707497 *Technology – 2002*
6. Поліщук Є.С. *Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник/ Є. С. Поліщук. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.*
7. 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.*
8. 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.*
9. 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.

10. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники: Учебник. - 2-е изд. - К.: Вища школа, 1983.

11. Туяхов А.І. Практична метрологія і виміри. Навчальний посібник / А. І. Туяхов. – Севастополь: Вебер, 2003. – 288 с.

12. Саранча Г.А. Метрологія і стандартизація / Г. А. Саранча. – К.: Либідь – 1997. – 191 с.

13. 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.

14. Бичківський Р., Зорій В., Столярчук П. Основи метрологічного забезпечення. -Львів: Вид. ДУ "Львівська політехніка", 1999. - 179 с.