

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

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Дипломний проєкт  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Роботизовані і автоматизовані системи неруй-  
нівного контролю та діагностики»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
на тему: «Автоматизований вихрострумний дефектоскоп на базі магніторезистора»**

Виконав :

студент IV курсу, групи ПК-91

Рудов Ярослав Дмитрович \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н. доцент

Баженов Віктор Григорович \_\_\_\_\_

Рецензент:

д.т.н., професор кафедри ІВС

Костянтин ШЕВЧЕНКО \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПК91.9118.000 ПЗ	Пояснювальна записка	62	
3	A1	ДП ПК91.9118.001 СхФ	Функціональна схема	1	
4	A1	ДП ПК91.9118.002 СхЕ	Принципальна схема	1	
5	A1	ДП ПК91.9118.003	Креслення ВСП	1	
6	A1	ДП ПК91.9118.004	Креслення друкованої плати	1	

				ДПБ.ПК-91.18.1760.01.001 ДП		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Рудов Я.Д.				1	1
Керівн.	Баженов В.Г.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-91	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Автоматизований вихрострумний дефектос-  
коп на базі магніторезистора»**

Київ – 2023 року

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

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 **«Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю»**

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ю. В. Киричук

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Рудову Ярославу Дмитровичу**

1. Тема проєкту **«Автоматизований вихрострумний дефектоскоп на базі магніторезистора»**, керівник проєкту Баженов Віктор Григорович, доктор технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2023 року.

3. Вихідні дані до проєкту :

- Трансформаторний накладний вихрострумний перетворювач

4. Зміст пояснювальної записки

Розділ 1: Аналітичний огляд

У першому розділі проведено огляд неруйнівного контролю для металевих виробів, зосереджуючись на окремих методах. Розглянуто магнітний неруйнівний контроль, індукційний метод, магніторезистивний метод контролю та вихрострумний метод. Також надано класифікацію вихрострумних перетворювачів та описано опрацювання сигналів з вихрострумних перетворювачів.

## Розділ 2: Проектування вихрострумowego дефектоскопа і розрахунок ВСП

У другому розділі описано процес проектування вихрострумowego дефектоскопа і проведений розрахунок вихрострумowego перетворювача. Задокументовано постановку завдання для цього розділу і розроблено функціональну схему. Також надано розрахунки для вихрострумowego перетворювача та обґрунтовано заміну вимірювальної котушки на магніторезистор. Окремо розглянуто вибір мікроконтролера як головного блоку керування, вибір попереднього підсилювача та розрахунок шумів. Завершується розділ розрахунком фільтра нижніх частот. Розділ закінчується висновком.

У кінці дипломного проекту наведено висновок до дипломного проекту, а також список використаних джерел літератури.

5. Перелік графічного матеріалу : схема електрична функціональна(лист А1), схема принципова електрична(лист А1), складальне креслення ВСП, та плакат.

6. Дата видачі завдання 21 лютого 2023 року

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання проєкту	12.03.2023	
2	Проведення аналітичного огляду	18.04.2023	
3	Розрахунок компонентів	15.05.2023	
4	Оформлення пояснювальної записки	30.05.2023	
5	Розробка графічної частини проєкту	03.06.2023	

Студент

Рудов Ярослав

Керівник

Баженов Віктор

## **Abstract**

This thesis is devoted to the analysis and design of an eddy current flaw detector for non-destructive testing of metal products. In Chapter 1, an analytical review of nondestructive testing methods, including magnetic, induction and magnetoresistive testing, is carried out. The main characteristics of the eddy current method of control and the classification of eddy current transducers are also considered. The processing of signals from eddy current transducers is investigated. The conclusion to Chapter 1 contains the results and conclusions obtained during the analysis of non-destructive testing methods.

Chapter 2 discusses the stages of designing an eddy current flaw detector. First, the problem statement for this section is formulated. Further design included the development of a functional diagram, the calculation of an eddy current converter, and the selection of a microcontroller for the control unit. The preamplifier was also selected and the noise was calculated, as well as the low-pass filter.

The abstract presents a compact overview of the main content of the thesis, including the analysis of nondestructive testing methods, the development of a functional circuit, and the calculation of an eddy current flaw detector. The work is aimed at improving and implementing an effective method of non-destructive testing for metal products.

## Анотація

Дипломна робота присвячена аналізу та проектуванню вихрострумowego дефектоскопа для неруйнівного контролю металевих виробів. У розділі 1 проведений аналітичний огляд методів неруйнівного контролю, зокрема магнітного, індукційного та магніторезистивного. Також розглянуті основні характеристики вихрострумowego методу контролю та класифікація вихрострумових перетворювачів. Досліджено опрацювання сигналів з вихрострумових перетворювачів. Висновок до 1 розділу містить підсумки та висновки, отримані під час аналізу методів неруйнівного контролю.

У розділі 2 розглянуті етапи проектування вихрострумowego дефектоскопа. Спочатку сформульовано постановку завдання для даного розділу. Подальше проектування включало розробку функціональної схеми, розрахунок вихрострумowego перетворювача та вибір мікроконтролера для блоку керування. Також проведений вибір попереднього підсилювача та розрахунок шумів, а також розрахунок фільтра нижніх частот.

Анотація представляє компактний огляд основного змісту дипломної роботи, включаючи проведений аналіз методів неруйнівного контролю, розробку функціональної схеми та розрахунки вихрострумowego дефектоскопа. Робота спрямована на вдосконалення та впровадження ефективного методу неруйнівного контролю для металевих виробів.

Розділ 1: Аналітичний огляд.....	9
1. Огляд неруйнівного контролю з використанням окремих методів для металевих виробів.....	9
1.1. Магнітний неруйнівний контроль.....	9
1.2. Індукційний метод.....	12
1.3. Магніторезистивний метод контролю .....	14
1.4. Огляд основних характеристик вихрострумowego методу контролю.....	15
1.5. Класифікація вихрострумових перетворювачів .....	19
1.6. Опрацювання сигналів з вихрострумових перетворювачів .....	27
Висновок до 1 розділу .....	32
Розділ 2. Проектування вихрострумowego дефектоскопа і розрахунок ВСП.....	33
2.1. Постановка завдання для 2 розділу дипломної роботи.....	33
2.2. Розробка функціональної схеми .....	34
2.3. Розрахунок ВСП-ОК.....	35
2.4. Обґрунтування заміни вимірювальної котушки на магніторезистор .....	42
2.6. Коротка характеристика та вибір мікроконтролера як головного блоку керування... ..	48
2.7. Вибір попереднього підсилювача та розрахунок шумів. ....	56
2.8. Розрахунок ФНЧ .....	58
Висновок до 2 розділу:.....	59
Висновок до дипломного проекту .....	60
ЛІТЕРАТУРА.....	61

					ПК-91.18.0000.000ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Рудов Я.Д			Автоматизований вихрострумовий де- фектоскоп на базі магніторезистора				Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевір.		Бажено В.Г											
									ПБФ, ПК-91				
Н. Контр.													
Затверд.		Баженов В.Г.											



## Розділ 1: Аналітичний огляд

### 1. Огляд неруйнівного контролю з використанням окремих методів для металевих виробів.

#### 1.1.Магнітний неруйнівний контроль

Широкий спектр методів, відомих як магнітний неруйнівний контроль (НК), ґрунтується на ідеї, що магнітні поля можна використовувати для пошуку дефектів, кількісного визначення фізичних характеристик матеріалів і регулювання якості без заподіяння шкоди.

Для пошуку дефектів на поверхні матеріалів використовується метод магнітного неруйнівного контролю, який називається магнітопорошковою дефектоскопією (MPI). Цей метод заснований на використанні магнітних частинок, які можна побачити на поверхні матеріалу в місцях, де є дефекти.

Алгоритм проведення роботи МПК:

- Підготовка ОК: очищення поверхні об'єкта від забруднень, жирів та інших зовнішніх речовин, які можуть перешкоджати процесу контролю.
- Нанесення магнітопорошкової суміші на поверхню ОК рівномірним шаром, ця суміш має магнітні частки та скріплюється зв'язуючим агентом. Суміш може бути в формі сухого порошку чи змішана з рідиною (вода, олія), утворюючи пасту або суспензію.
- Створюється магнітне поле за допомогою електромагніту або постійного магніту навколо ОК. Орієнтація та сила поля залежать від вимог контролю та властивостей матеріалу.
- Виявлення дефектів: Якщо в ОК присутні дефекти, такі як тріщини чи нерівності, ця суміш буде мати вигляд нагромадження або ліній на поверхні ОК в місці де ці дефекти знаходяться.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Оцінка дефектів: Нагромадження частинок цієї суміші, дають змогу визначити форму дефекту, розмір та характер. Оператор візуально оцінює дефекти та приймає рішення про критичність та подальші заходи.
- Очищення ОК: Після завершення контролю, суміш видаляється з поверхні за допомогою чистячого розчину. Також об'єкт може бути промити та просушений для подальшого виробничого процесу.

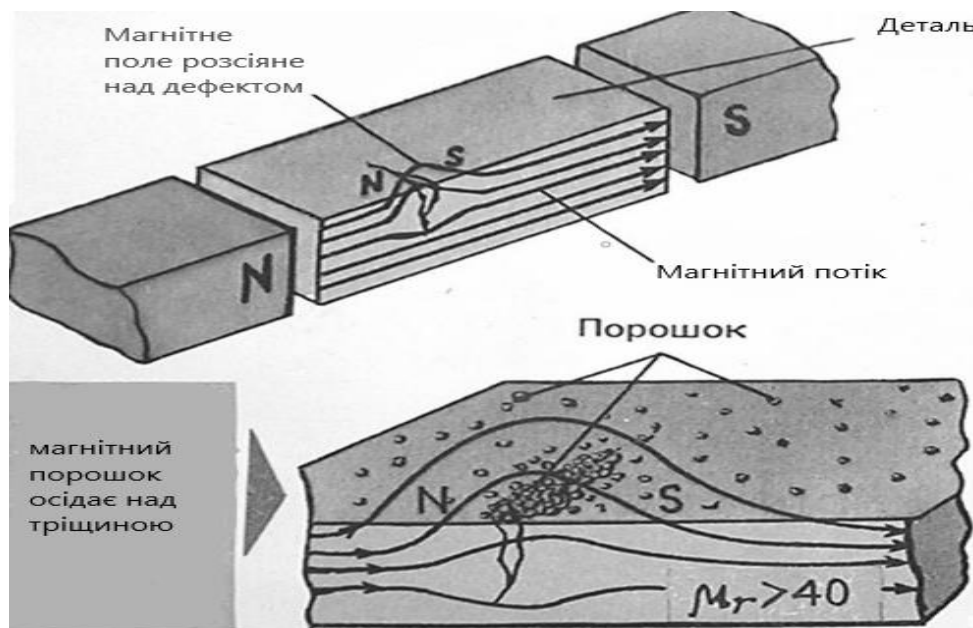


Рис. 1.1

В основі МПК лежить наступний фізичний принцип: під впливом магнітного поля магнітні частинки в зоні дефекту намагнічуються і рухаються в зону з найбільшою неоднорідністю магнітного поля під дією пондеomotorної сили, яка виникає в результаті механічної взаємодії. Під час руху частинок виникають сили тертя, які протидіють руху частинок. З огляду на це, на рух частинок впливає сумарна сила, що складається з наступних елементів.

Під час аналізу суспензії як окремих магнітних частинок та їх розташуванні в неоднорідному магнітному полі, пондеomotorна сила визначається як:

$$F_x = \chi V H_i \frac{dB}{dx} \quad (1.1)$$

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Де  $V$  – об’єм частинки,  $\frac{dB}{dx}$  – складова градієнту магнітної індукції поля дефекту за координатою  $x$ ,  $\chi$  – магнітна сприйнятливість матеріалу порошку,

$H_i$  – напруженість поля всередині частинки.

Переваги цього методу:

- МПК має високу чутливість навіть до найменших поверхневих дефектів, а це такі як: тріщини, шорсткість або ін. недоліки ОК.
- МПК є швидким та простим у використанні МНК. Оцінка проводиться візуально, що тим самим прискорює аналіз результатів.
- МПК можливо успішно використовувати з різними матеріалами, що робить його універсальним і широко застосовуваним методом.
- Цей вид контролю являється економічно вигідним, оскільки не вимагає витрат на складне обладнання.

Недоліки:

- МПК важко використовувати на ОК складної форми, або у важкодоступних місцях, або на об’єктах з обмеженим простором для проведення контролю.
- Навколишнє середовище для проведення контролю має будити бути без вітру та з добрим освітленням, ці фактори мають негативний вплив на контроль.
- Для достовірного аналізу необхідно мати чисту поверхню ОК, оскільки забруднення або покриття можуть перешкоджати точному виявленню дефектів.
- МПК має обмежену здатність проникнення у метеріал, тому виявлення дефектів в глибоких шарах може бути складним або неможливим.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2. Індукційний метод

Метод базується на фізичному явищі електрорушійної сили(е.д.с), яка виникає в котушці під час її руху відносно намагніченого ОК. Виявлення дефектів у ОК здійснюється шляхом аналізу індуктивних ефектів, спричинених взаємодією магнітного поля з дефектами. У індукційного перетворювача входною величиною є магнітний потік, який з котушкою має потокозчеплення

$$\Psi = WBS_{cp} = W\mu HS_{cp}\cos\alpha \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  – кут між віссю котушки та напрямком дії векторів  $\Phi, B, H$ ,  $W$  – кількість витків котушки,  $S_{cp}$  – середня площа котушки (для круглої котушки  $S_{cp} = 0,25\pi D_{cp}^2$ ,  $D_{cp}$  – середній діаметр котушки)

Метод може застосовуватися для пошуку дефектів, таких як тріщини, зміни магнітних характеристик, товщина покриття тощо. Індукційний метод має широке застосування в промислових процесах, де важливо контролювати якість сировини та шукати будь-які дефекти.

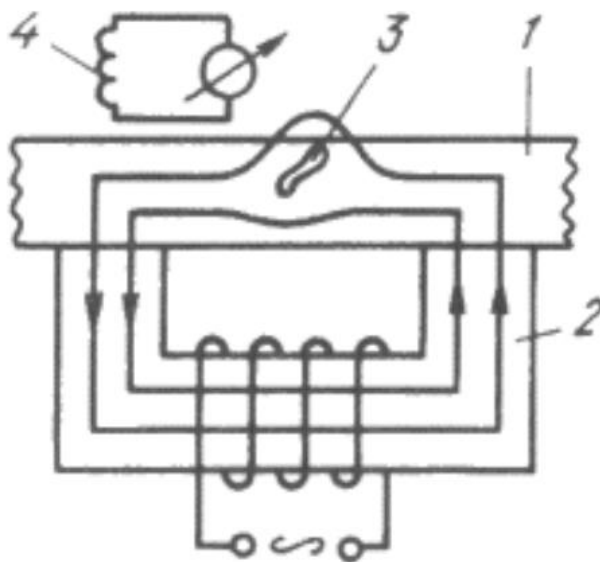


Рис. 1.2 Процес здійснення контролю з використанням індукційного методу: 1 - виріб; 2 -електромагніт; 3 - дефект; 4 –шукач

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Алгоритм проведення індукційного методу включає наступні кроки:

- Підготовка обладнання: Перед початком контролю необхідно перевірити та налаштувати індукційний перетворювач, переконатися в належному стані обмотки та всіх необхідних компонентах системи.
- Підготовка об'єкта контролю: Об'єкт контролю повинен бути очищений від забруднень, налякшень та інших перешкод, які можуть впливати на точність та якість контролю. Деякі випадки можуть вимагати попереднього намагнічування об'єкта.
- Розміщення індукційного перетворювача: Перетворювач розміщується над поверхнею об'єкта контролю з відповідною орієнтацією та встановлюється необхідна відстань між перетворювачем та об'єктом.
- Збудження індукційного поля: Застосовується змінне струмове живлення до індукційного перетворювача, що створює змінне магнітне поле.
- Збір даних: За допомогою датчиків або приймачів реєструються індукційні сигнали, що генеруються внаслідок взаємодії магнітного поля з об'єктом контролю.
- Аналіз та оцінка результатів: Отримані сигнали аналізуються та оцінюються залежно від вимог контролю. Це може включати порівняння сигналів з еталонами, визначення амплітуди та частоти сигналів, виявлення відхилень та дефектів.
- Документування результатів: Отримані дані та результати контролю фіксуються та документуються для подальшого аналізу, звітності та архівування.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3. Магніторезистивний метод контролю

Магніторезистивний метод контролю ґрунтується на тому, як змінюється опір матеріалів у результаті впливу магнітного потоку.

Явище магніторезистивного ефекту полягає в зміні опору матеріалу при розташуванні магнітних моментів електронів. Паралельна орієнтація магнітних моментів сприяє зменшенню опору, тоді як перпендикулярна орієнтація призводить до збільшення опору матеріалу.

У магніторезистивному методі контролю використовуються спеціальні датчики, відомі як магніторезистори, для вимірювання зміни опору матеріалу. Зміна опору може бути спричинена різними факторами, такими як деформація або зміна магнітних властивостей матеріалу. Цей метод дозволяє виявляти дефекти і аномалії в матеріалі.

Магніторезистивний метод контролю має кілька переваг. Він дозволяє проводити контроль без необхідності контакту з об'єктом, що тестується, що є особливо важливим для чутливих або складних матеріалів. Крім того, цей метод демонструє високу чутливість до змін магнітних властивостей матеріалу, що дозволяє виявляти навіть незначні дефекти.

Також він має потенціал для автоматизації процесу контролю, що забезпечує швидкість і ефективність вимірювань. З метою ефективного використання магніторезистивного методу контролю необхідно враховувати особливості конкретного матеріалу і правильно вибирати тип і розташування датчиків.

Розробка відповідного алгоритму контролю також є важливою задачею для отримання достовірних результатів. Завдяки своїм перевагам і можливостям, магніторезистивний метод контролю широко застосовується в різних галузях, включаючи інженерію, автомобільну промисловість, електроніку та металургію. Він дозволяє ефективно виявляти дефекти та контролювати властивості матеріалів, сприяючи покращенню якості та безпеці виробництва.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 1.4. Огляд основних характеристик вихрострумового методу контролю.

Методи, засновані на взаємодії електромагнітного поля з вихровими струмами, використовують аналіз цієї взаємодії. Котушка збудження створює вихрові струми в електропровідному об'єкті, який піддається контролю. Густина цих струмів залежить від геометрії та електромагнітних параметрів об'єкта, а також від місця розташування вимірювального вихрострумового перетворювача. ВСП може складатися з однієї або двох індуктивних котушок. Струм, що протікає через ці котушки, створює електромагнітне поле, що викликає вихрові струми в об'єкті. Вихрові струми впливають на котушки датчика, змінюючи їхню електрорушійну силу або загальний електричний опір. Щоб отримати інформацію про властивості об'єкта і положення датчика відносно нього, вимірюють напругу на затискачах котушок або їхній опір.

Глибину залягання вихрових струмів можливо визначити умовно і ця величина показує відстань від поверхні ОК, до шару в якому щільність зменшується на величину  $e \approx 2,71$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \mu_0 \sigma}} \quad (1.3)$$

де  $f$  – частота, струму збудження,  $\mu\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність для матеріалу з якого вироблений ОК,  $\sigma$  - питома електрична провідність для матеріалу з якого вироблений ОК.

Електродвижуча сила або опір перетворювача можуть піддаватися впливу різних параметрів об'єкта контролю. Це означає, що інформація, яку надає перетворювач, містить безліч параметрів. Вихрострумові методи дають змогу

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснювати багатопараметровий контроль, проте потребують особливих методів для розділення інформації про кожен окремий параметр об'єкта. Коли контролюються певні параметри, вплив інших параметрів на сигнал перетворювача може стати перешкодою, тому необхідно зменшувати цей вплив. Таким чином, вихрострумові методи надають можливість багатопараметрового контролю, але потребують врахування та зменшення впливу інших параметрів на отримуваний сигнал.

Можливістю вихрострумового контролю є здатність проводити дослідження без взаємодії перетворювача та об'єкта. Контакт зазвичай встановлюють на певній відстані, що забезпечує вільний рух перетворювача відносно об'єкта в діапазоні від часток 1 мм до декількох мм. Таким чином, вихрострумові методи мають можливість отримати надійні результати контролю навіть за високої швидкості руху об'єктів відносно один одного. Це означає, що вихрострумовий контроль може забезпечити ефективний моніторинг об'єктів, навіть за їхньої швидкої взаємодії.

Автоматизація вихрострумового контролю являє собою процес, що має значні потенційні переваги, засновані на використанні первинної інформації у формі електричних сигналів, а також на можливості безконтактної взаємодії та досягнення високої продуктивності. Це означає, що під час автоматизованого вихрострумового контролю можна отримати дані про стан об'єкта у вигляді електричних сигналів, що дає змогу проводити контроль без необхідності фізичного контакту з об'єктом. Такий підхід забезпечує ефективність і точність контролю, а також збільшує швидкість і продуктивність процесу.

Методи вихрострумового контролю (ВТМ) є ефективним підходом, що ґрунтується на індукції вихрових струмів в електропровідних об'єктах, і тому їх широко застосовують для оцінювання якості таких об'єктів. Однією з характеристик ВТМ є невелика глибина зони контролю, яка визначається глибиною проникнення електромагнітного поля в контрольоване середовище. Це

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



означає, що ВТМ забезпечують можливість проведення контролю в обмеженому обсязі матеріалу, близькому до поверхні об'єкта. Такий підхід дає змогу досягти високої чутливості та точності контролю, особливо під час роботи з тонкими шарами або поверхневими дефектами об'єкта.

Нехтування зазначеними обмеженнями розширює сферу застосування вихрострумового контролю (ВТМ) на практиці, надаючи можливості для широкого використання в царині дефектоскопії, визначення розмірів і структуроскопії різноманітних матеріалів і виробів. Це означає, що ВТМ можуть бути ефективно застосовані для виявлення та аналізу дефектів, визначення геометричних параметрів і внутрішньої структури різноманітних матеріалів і виробів. Такий підхід відкриває нові перспективи в галузі контролю та дослідження матеріалів, що сприяє підвищенню якості та безпеки в різних галузях промисловості.

Застосування вихрострумових методів у контролі розмірів виробів демонструє високу ефективність. Ці методи дають змогу вимірювати діаметр дроту, прутків, труб, товщину металевих листів і стінок труб навіть у разі доступу до об'єкта з одного боку, а також вимірювати товщину електропровідних і діелектричних покриттів на електропровідних основах, товщину шарів багатошарових структур з електропровідними шарами. Діапазон вимірюваних товщин варіюється від мікрометрів до десятків міліметрів. Мінімальна площа зони контролю становить близько 1 мм<sup>2</sup>, що дає змогу вимірювати товщину покриттів на малих об'єктах зі складною структурою. Вихрострумові методи також дають змогу вимірювати зазори, переміщення та вібрації в машинах і механізмах. Похибка вимірювань для більшості приладів зазвичай становить від 2% до 5%.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наступним обговорюваним типом інструменту є товщиноміри діелектричних покриттів (ТДП) на електропровідних основах. Ці товщиноміри призначені для вимірювання товщини різних діелектричних покриттів на електропровідних матеріалах, таких як оксидні, фосфатні, лакофарбові, керамічні, емалеві, пластмасові та інші покриття на феро- і неферомагнітних металах і сплавах. Вони широко використовуються для вимірювання зазору.

Важливим параметром товщиноміра є похибка вимірювання, яка зумовлена впливом різних заводочинних факторів, що залежать від властивостей контролюваного об'єкта. У товщиномірах часто застосовуються накладні вихрострумові перетворювачі, які дають змогу отримати точніші значення фактичної товщини об'єкта.

Також слід зазначити, що похибка вимірювання товщиномірів може бути впливом різних чинників, як-от структура поверхні, зміни електромагнітних властивостей, відстань до краю об'єкта, зміни зазору між вихрострумовим перетворювачем (ВСП) та об'єктом, неправильне положення ВСП під час його встановлення на поверхні контролю та інших чинників. Усі ці фактори можуть вносити додаткову похибку в вимірювання.

При встановленні оптимального значення узагальненого параметра контролю можливо досягти високої чутливості до зазору за мінімальної похибки, спричиненої змінами провідності та товщини основи. Це дає змогу створювати товщиноміри, які не потребують використання спеціальних схем для компенсації впливу факторів, що заважають, на показання приладів. Таким чином, виникає можливість спростити конструкцію товщиномірів і знизити їхню вартість, зберігаючи при цьому високу точність вимірювань.

Існує різноманітність комбінацій покриттів і основ, включно з феромагнітними і неферомагнітними матеріалами. Використання таких комбінацій вимагає спеціалізованих приладів і складних методик контролю. Прилади мають бути попередньо відкалібровані з використанням контрольних зразків. Для

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цього можуть застосовуватися альбоми градувальних графіків, номограми або змінні шкали для стрілочних індикаторів. Це дає змогу використовувати один і той самий вихрострумний товщиномір для вимірювання товщини електропровідних покриттів на електропровідних основах у різних комбінаціях. У більшості випадків комплект товщиноміра включає атестовані зразки покриттів. У деяких випадках виробник може виготовити й атестувати спеціальні зразки.

Товщиноміри електропровідних покриттів (ТЕП) призначені для вимірювання товщини покриттів як на електропровідних основах, так і на інших матеріалах. ТЕП використовуються для вимірювання різних видів покриттів, включно з гальванічними та плакувальними покриттями. Ці покриття можуть бути як феромагнітними, наприклад, нікелевими, так і неферомагнітними, такими як мідні, цинкові, золоті, срібні та інші. Товщиноміри електропровідних покриттів надають можливість точного вимірювання товщини таких покриттів на різних типах основ.

### 1.5.Класифікація вихрострумних перетворювачів

Існують різні способи класифікації вихрострумних перетворювачів (ВП), засновані на різних параметрах і характеристиках. Далі буде розглянуто деякі з них.

ВСП розділяють в залежності від положення відносно ОК на:

- Прохідні
- Накладні
- Комбіновані

Для детектування дефектів і вимірювання електрофізичних характеристик протяжних металевих об'єктів застосовуються як зовнішні, так і внутрішні вихрострумові перетворювачі. Такі перетворювачі забезпечують контроль таких

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів, як зовнішній і внутрішній діаметри, товщина стінок і неоднорідність труб, а також форма прутків або дроту. Прохідні ВСП показані на Рис.1.3-1.5

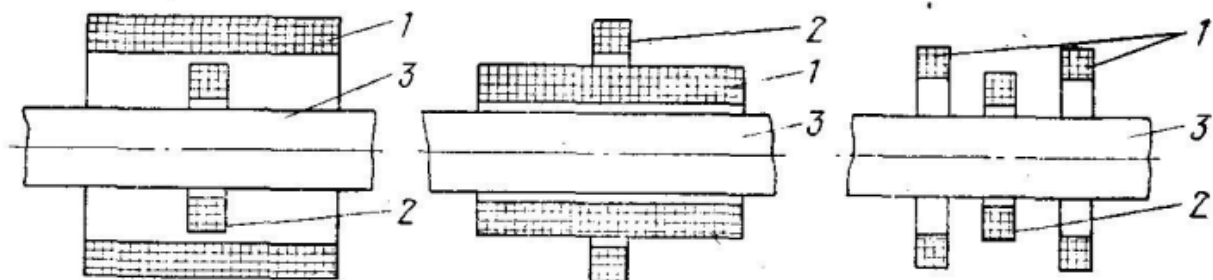


Рис.1.3 Зовнішні прохідні ВСП

1 – збуджуюча обмотка, 2- вимірювальна обмотка, 3 - об'єкт контролю

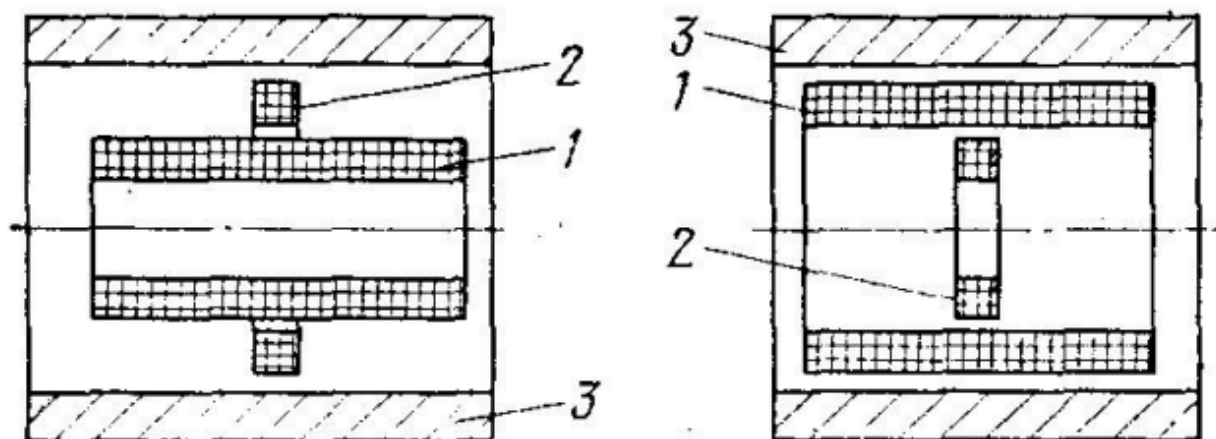


Рис.1.4 Прохідні внутрішні ВСП

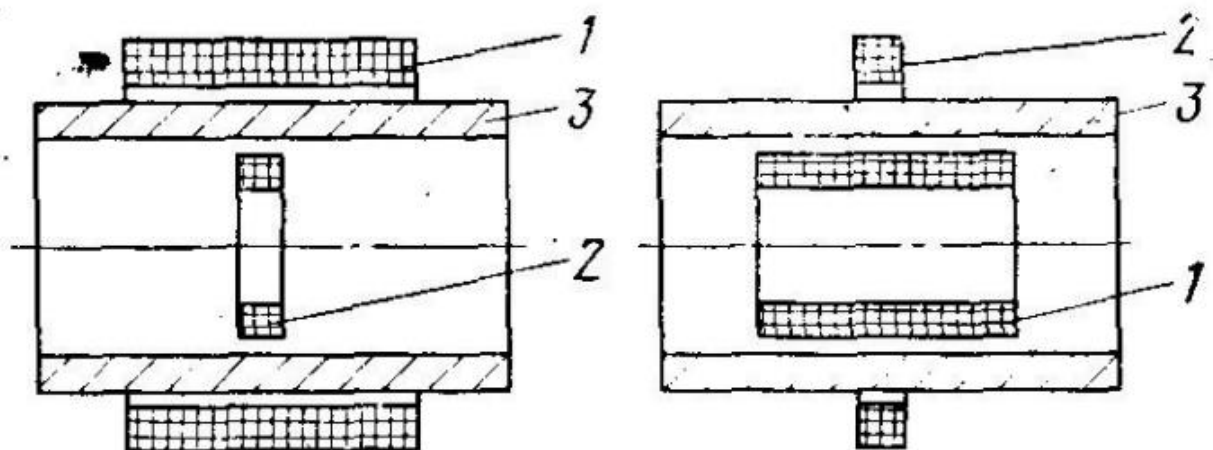


Рис.1.5 Прохідні екранні ВСП

Накладні перетворювачі. Вони розміщуються над поверхнею контролюваного об'єкта, і їм характерні більш широкі можливості контролю на відміну від прохідних. Завдяки їм з'являється можливість контролювати геометричні та електрофізичні параметри об'єктів складної форми.

На малюнку (рис.1.6) наведено приклад обмоток накладних перетворювачів у вигляді кругових коаксіальних витків, а також на малюнках показано приклад обмоток у вигляді прямокутних рамок.

На екранному накладному перетворювачі, де генераторні (1) і сигнальні (2) накладки розділені об'єктом контролю, основним призначенням є контроль товщини та електрофізичних параметрів листів, стрічок і фольги за умови доступу до них з обох боків. Одною з переваг таких перетворювачів є те, що зміщення контролюваного об'єкта вздовж осі перетворювача практично не впливають на результати вимірювань.

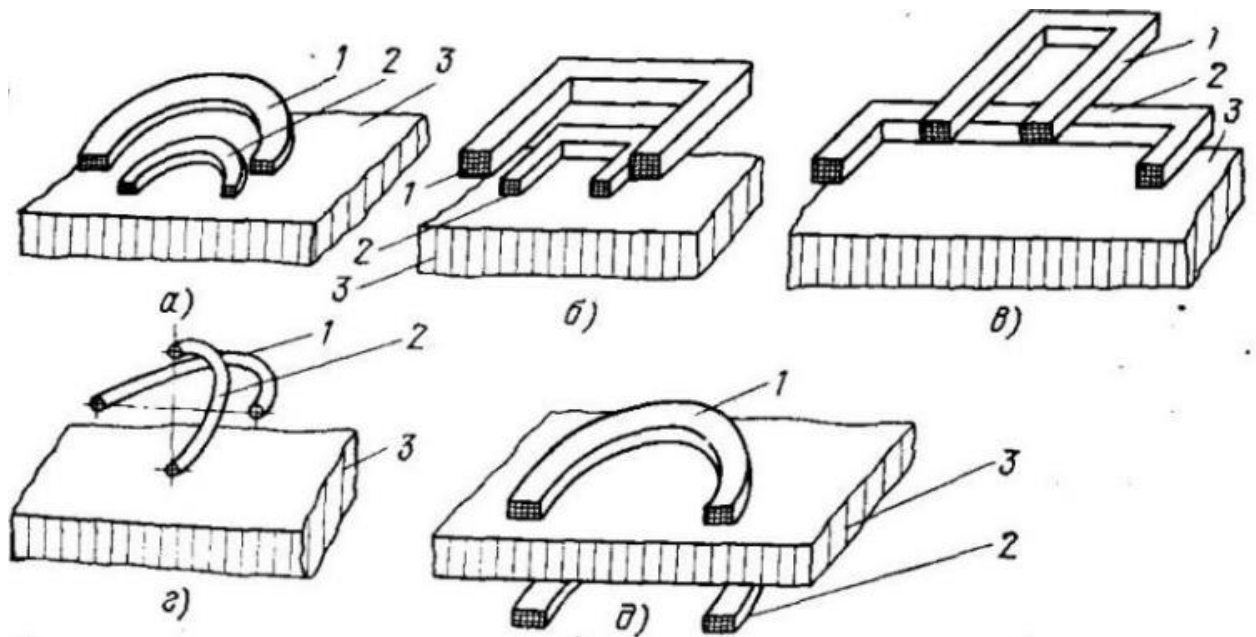


Рис.1.6 а) круглі коаксіальні, б)прямокутні коаксіальні, в)прямокутні хресто-  
подібні, г)із взаємно перпендикулярними осями, д)екранований

Котушки накладних перетворювачів, перпендикулярні одна одній, забезпечують можливість знизити вплив небажаних чинників, таких як зміни температури.

Як приклад, для компенсації впливу температури можна використовувати котушку (2). Важливо зазначити, що залежно від конфігурації та взаємного розташування збуджувальних і вимірювальних котушок, можливе отримання необхідної інформації для контролю виробів складної структури та анізотропної форми.

Перетворювачі суміщеного типу (рис. 1.7) поєднують у собі властивості як накладних (2), так і прохідних (1) вихрострумових перетворювачів. Однак через складність їхньої конструктивної реалізації, вони не набули широкого поширення в промисловості.

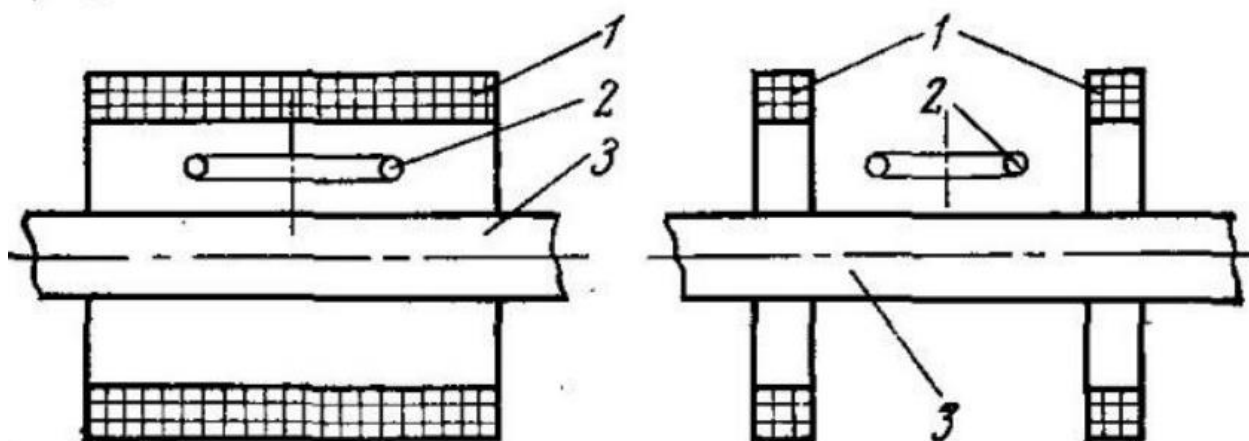


Рис.1.7 Комбіновані ВСП

Перетворювачі, що здійснюють перетворення параметрів контрольованих об'єктів у вихідні величини, можна класифікувати на два основних типи:

- Параметричні
- Трансформаторні

Параметричні перетворювачі ВСП використовують комплексне імпедансне значення обмотки (генераторна і сигнальна котушки об'єднані в одну) як вихідний сигнал. Завдяки своїй простоті та надійності, параметричні перетворювачі знайшли широке застосування в галузі дефектоскопії, вимірювання геометричних характеристик контрольованих об'єктів і віброметрії.

Трансформаторні перетворювачі ВСП, які включають відокремлені генераторні та сигнальні обмотки, використовують напругу вимірювальної обмотки як вихідний сигнал. Порівняно з параметричними перетворювачами, цей тип

має вищу температурну стійкість. Зазвичай трансформаторні ВСП підключають за диференціальною схемою.

Для збільшення абсолютної чутливості та формування бажаної топології електромагнітного поля в накладних ВСП застосовують магнітопроводи (4) (Рис.1.8) Таким чином, перетворювачі, в яких використовуються екрановані магнітопроводи (4) з окремими котушками (1), (2), дають змогу значно розширити ділянку контролю за збереження роздільної здатності на постійному рівні.

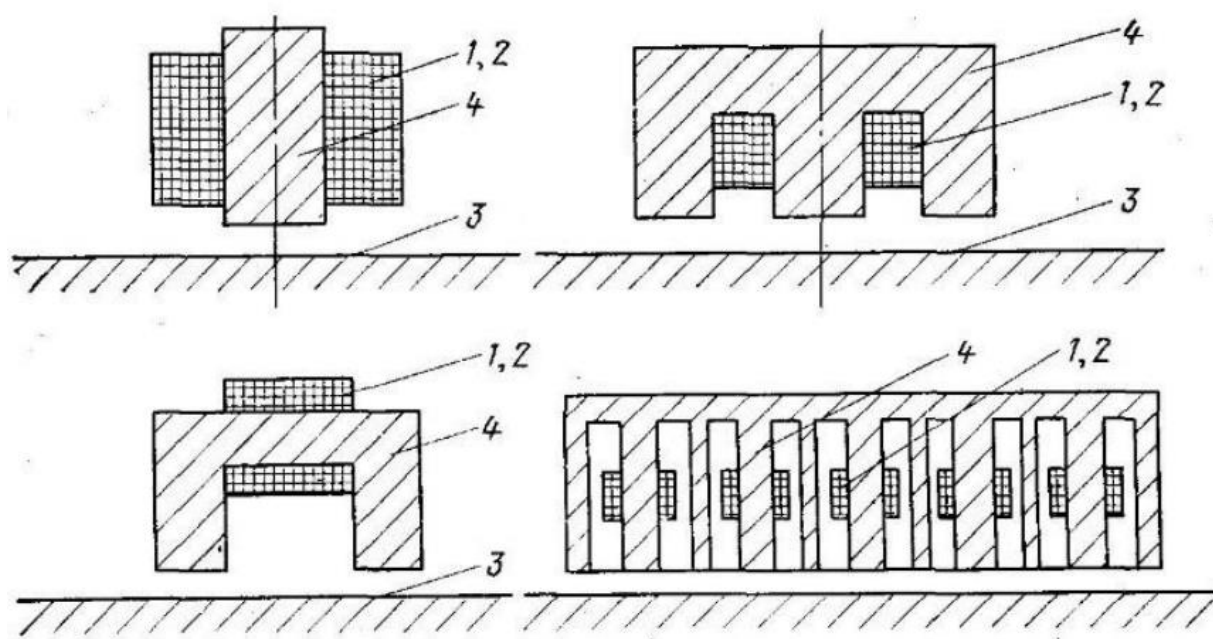


Рис. 1.8 Накладні ВСП з магнітопроводом



Для оптимального контролю дефектів і вимірювання геометричних параметрів виробів найефективніше створювати зосереджену зону електромагнітного поля в перетворювачі. Різні конструкції перетворювачів, що сприяють локалізації поля, представлені на рисунку 1.9. У перетворювачах (рис. 1.9, а-в) поле в зоні контролю об'єкта (3) зосереджується шляхом використання концентраторів (5) з електропровідних матеріалів, які не є феромагнетиками, які вставляють у повітряний зазор магнітопроводу (4) або мають спеціальну форму цього магнітопроводу. Перетворювачі з маскою також мають високу роздільну здатність (рис. 1.9, г).

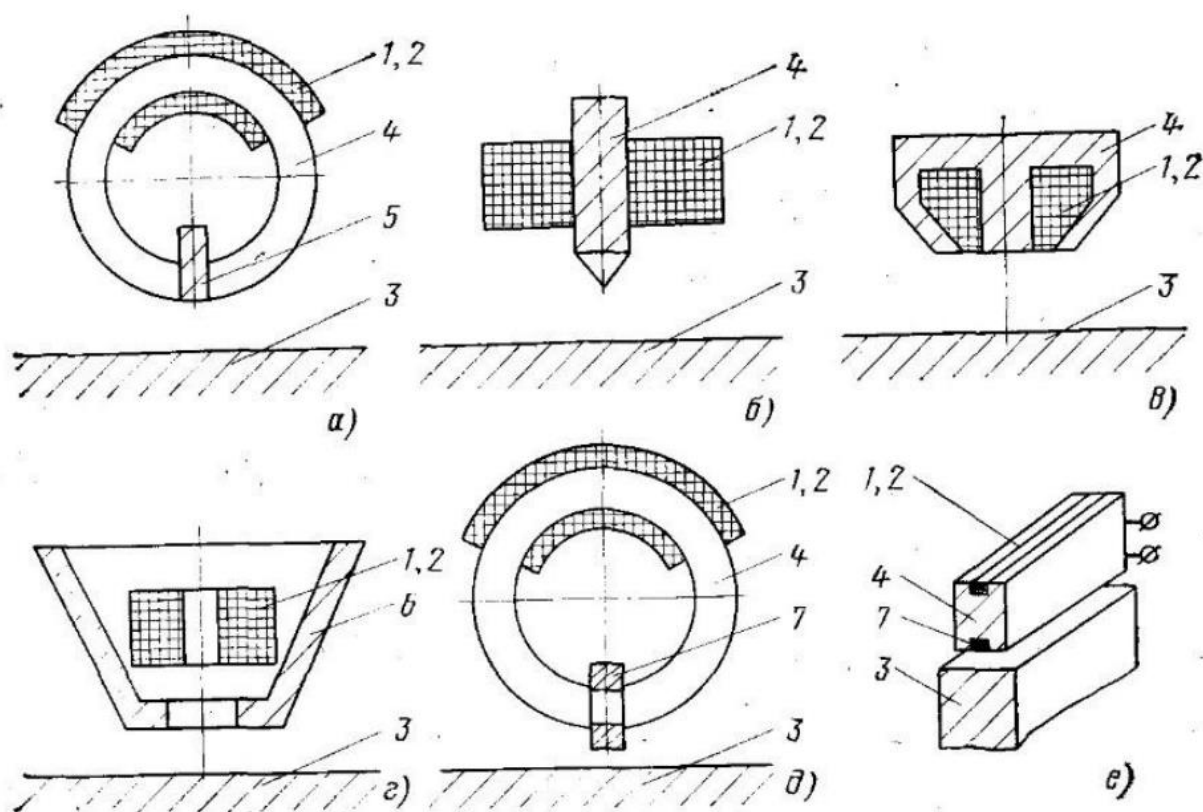


Рис. 1.9 Накладні ВСП з магнітопроводом

Віброметрія являється галуззю широкого застосування ВСП. Вихрострумові перетворювачі надають можливість контролювати вібрації як контактним (рис. 1.10, а, б), так і безконтактним (рис. 1.10, в) способом. За контактного способу вимірювання вібраційних параметрів використовується електропровідна сейсмічна маса (8) (рис. 1.10, а). У деяких конструкціях (рис. 1.10, б) вимірювальна обмотка перетворює коливальні рухи проміжних елементів (3а), пов'язаних із пружинами (10), на електричний сигнал, що дає змогу значно підвищити чутливість перетворювача. На рисунку 1.10 (в) представлено схему перетворювача, який застосовується для обох видів контролю. У першому випадку вимірювальна обмотка контролює коливання сейсмічної маси, а в другому випадку сейсмічна маса закріплена гвинтом (9) і здійснюється безконтактний контроль коливань електропровідного об'єкта (3).

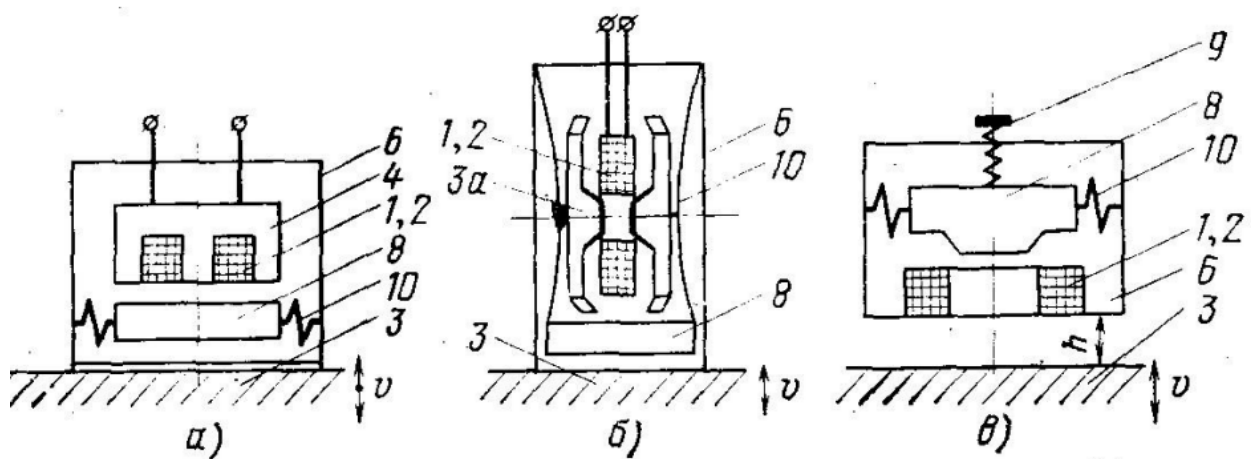


Рис. 1.10 ВСП для вимірювання параметрів вібрації.

## 1.6. Опрацювання сигналів з вихрострумових перетворювачів

Інформація яка була знята з ВСП об ОК може бути представлена у вигляді змін власної індуктивності або зміни змінної напруги на вихідних контактах.

Через те, що виміряти індуктивність обмотки перетворювача значно складніше за напругу, у сучасній дефектоскопії перевага віддається трансформаторним ВСП, що перетворюють магнітне поле вихрових струмів у змінну напругу.

Із трьох параметрів вихідного сигналу для аналізу ОК використовуються тільки амплітуда і різниця фаз щодо збудливого сигналу. На частоту вихідного сигналу об'єкт контролю не чинить жодного впливу, і залежить вона тільки від частоти сигналу збудження.

Для зручності аналізу даних з перетворювачів значення сигналу розкладають на уявну та дійсну складові й наносять на годограф.

Годограф - крива на комплексній площині, що з'єднує кінці вектора змінної вихідної напруги перетворювача.

На вихідну напругу впливають такі чинники як:

- $h$  - товщина діелектричного покриття або величина зазору між ОК.
- $\mu$  - магнітна проникність матеріалу.
- $\gamma$  - електрична провідність матеріалу.
- $\omega$  - кругова частота струму збудження.
- габаритні параметри обмоток перетворювача.
- розміри дефектів, розташованих у зоні впливу магнітного поля перетворювача.
- $T$  – товщина ОК.

Кругова частота струму збудження, радіус обмоток і електрична провідність матеріалу впливають на вихідну напругу однаково, тому ці параметри можливо об'єднати в узагальнений параметр  $\beta$ , при рівності радіусів  $R$  обмоток збудження і вимірювання, параметр буде розраховуватися таким чином:

$$\beta = R\sqrt{\omega\gamma\mu_0} \quad (1.4)$$

При зміні параметра  $\beta$  за незмінних інших умов вектор введеної напруги буде представлений на комплексній площині у вигляді гладкої прямої, що означає зміну як амплітуди, так і фази сигналу.

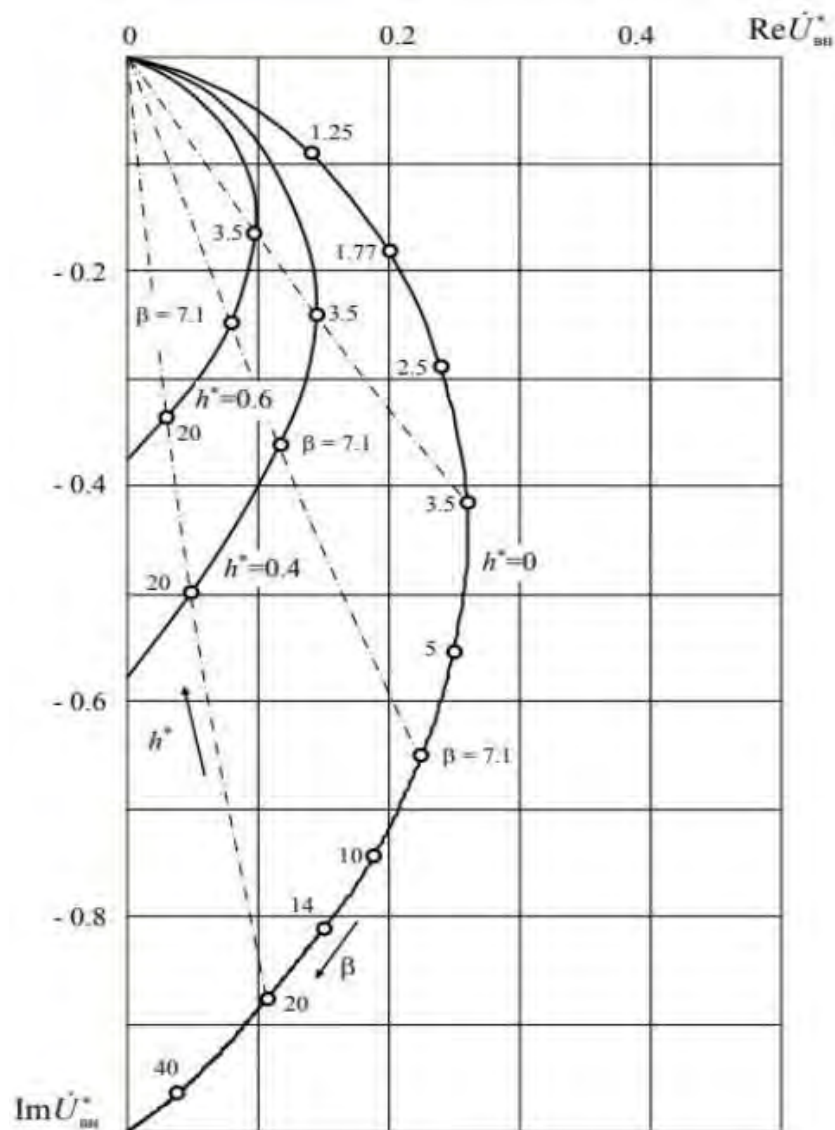


Рис. 1.11 - Годограф відносної внесеної напруги.

Зміна товщини ОК впливає як на фазу, так і на амплітуду сигналу (Рис.1.12). Зміна сигналу відбувається до певного значення товщини виробу, а в разі перевищення цього значення відбувається припинення зміни сигналу. Викликане це явище обмеженістю поширення вихрових вихрових хвиль. струмів по глибині ОК. Виходячи з цього, під час використання ВСП для визначення товщини ОК, розмір не повинен перевищувати максимальної глибини поширення вихрових струмів.

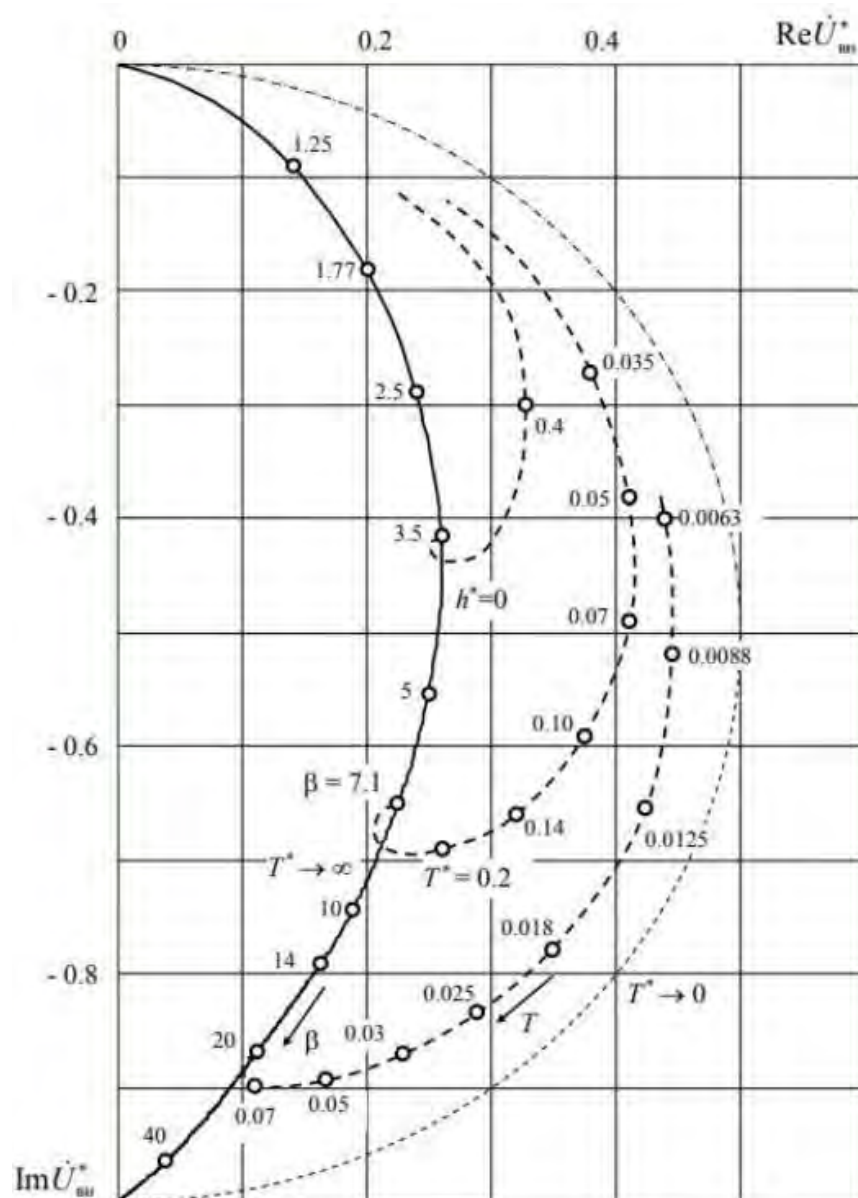


Рис.1.12- Годографи відносної внесеної напруги вихрострумового перетворювача від зміни узагальненого параметра  $\beta$  і товщини  $T^* = T / R$

Наявність у (ОК) дефектів також впливає на вихідний сигнал перетворювача. Залежно від розміру дефекту та глибини залягання відбувається зміна амплітуди та фази сигналу.

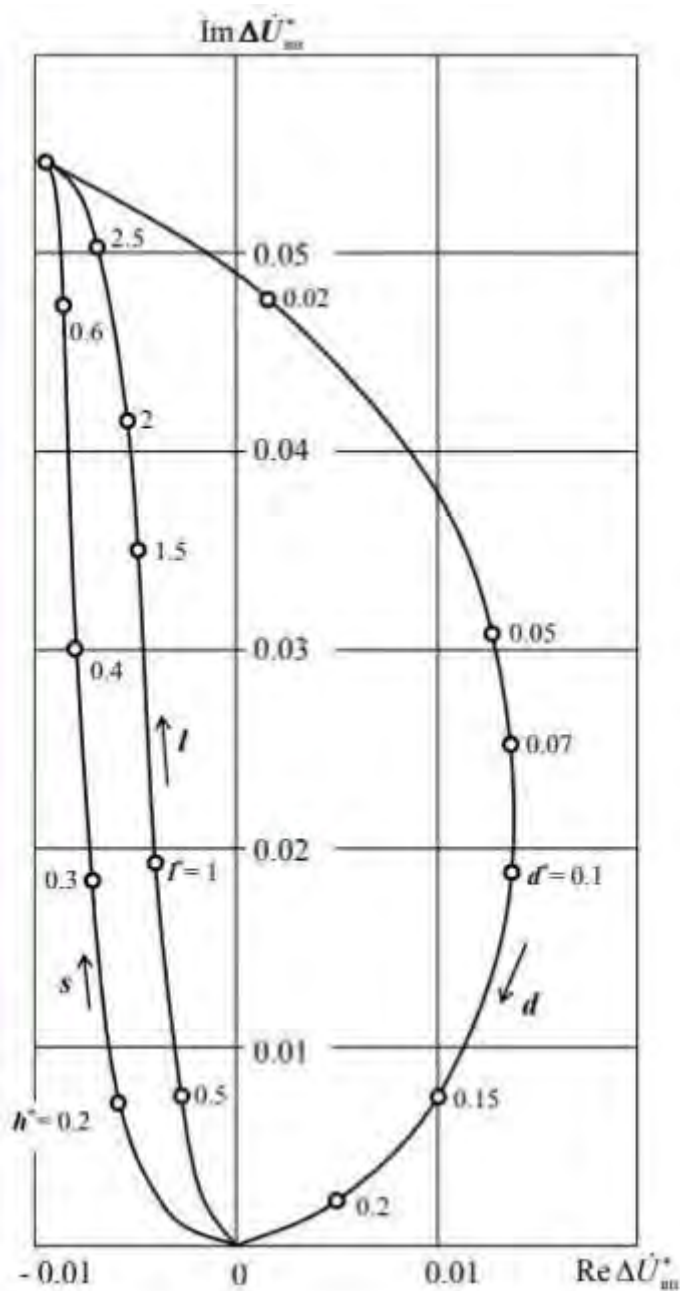


Рис. 1.13- Годографи відносної внесеної напруги вихрострумового перетворювача від зміни глибини та довжини дефекту.

Для дефекту, що являє собою вкраплення діелектричного матеріалу або порожнистої площини Рисунок 1.20, збільшення габаритних параметрів дефекту

буде підвищувати амплітуду вихідного сигналу, відносно сигналу на бездефектній ділянці ОК, доти, доки дефект не перевершить зону дії вихрових струмів, що призведе до фіксації вихідної напруги. Глибина залягання дефекту чинить зворотний вплив. Збільшення відстані від краю об'єкта контролю до дефекту призводить до зменшення амплітуди сигналу, поки дефект не покине зону поширення вихрових струмів.

Таким чином, за зміною амплітуди та фази вихідної напруги можна визначити такі параметри ОК як: матеріал; товщина ОК; товщина ОК; товщина діелектричного покриття; наявність дефектів.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### Висновок до 1 розділу

У першому розділі дипломної роботи було проведено огляд неруйнівного контролю з використанням окремих методів для металевих виробів. В рамках цього дослідження були розглянуті такі методи, як магнітний неруйнівний контроль, індукційний метод, магніторезистивний метод контролю, вихрострумний метод контролю.

Магнітний неруйнівний контроль є ефективним методом виявлення дефектів у металевих виробах шляхом аналізу змін магнітного поля. Індукційний метод використовує змінне магнітне поле для генерації електромагнітних сигналів, що дозволяють виявляти дефекти в матеріалі. Магніторезистивний метод контролю ґрунтується на вимірюванні змін опору при наявності дефектів.

Основною характеристикою вихрострумного методу контролю є його здатність виявляти дефекти у металевих виробах за допомогою зміни електромагнітних полів, що виникають при проходженні змінного струму через вихрострумові перетворювачі. Класифікація вихрострумних перетворювачів дозволяє встановлювати їхні характеристики та особливості роботи.

Опрацювання сигналів з вихрострумних перетворювачів за допомогою годографів є важливим етапом аналізу результатів контролю. Годографи дозволяють візуалізувати та аналізувати дані, отримані від перетворювачів, забезпечуючи точність та надійність контролю.

В результаті проведеного огляду було встановлено, що неруйнівний контроль з використанням різних методів має широкі можливості виявлення дефектів у металевих виробах. Враховуючи особливості кожного методу, можна вибрати найбільш ефективний і зручний для конкретних умов контролю.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## Розділ 2. Проектування вихрострумового дефектоскопа і розрахунок ВСП

### 2.1. Постановка завдання для 2 розділу дипломної роботи

Вивчення наявних дефектоскопів і аналіз їхньої вартості, якості та функціональних можливостей.

Визначення необхідних характеристик і показників для нового дефектоскопа, з урахуванням помітного зниження вартості порівняно з аналогами.

Розробка концепції вихрострумового дефектоскопа на основі трансформаторного накладного датчика.

Розрахунок і проектування трансформаторного накладного датчика з урахуванням необхідних характеристик і показників.

Дослідження можливості заміни вимірювальної котушки в трансформаторному накладному датчику на магніторезистор.

Розроблення алгоритмів і методів оброблення та аналізу даних, отриманих від магніторезистора.

Оптимізація конструкції та вибір матеріалів для забезпечення зниження вартості виробництва дефектоскопа.

## 2.2.Розробка функціональної схеми

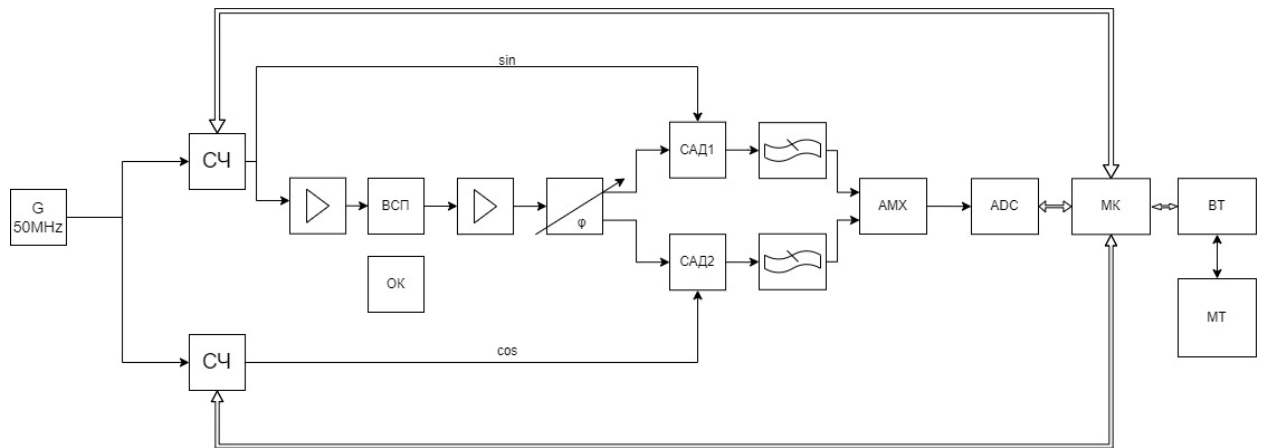


Рис. 2.1 – функціональна схема приладу

Принцип роботи приладу: Г (генератор опорної частоти) дає імпульси для синхронної роботи СЧ1 та СЧ2 (синтезатори частоти), також на ці блоки приходять керуючі сигнали з МК (мікроконтролер) який в свою чергу шляхом спілкування через послідовний інтерфейс с СЧ1,2, встановлює необхідну частоту сигналу та фазу сигналу на початку вимірів, в певний період часу. В перший запуск МК ініціалізує СЧ1 та СЧ2 паралельно з однаковою частотою але різною фазою різниця складає  $90^\circ$ , тобто ми отримаємо сигнал  $\sin$  та  $\cos$ . Далі сигнал з СЧ1 подається на П1 (підсилювач потужності) який в свою чергу підсилює сигнал до певної амплітуди, для ВСП який взаємодіє з ОК. Далі сигнал знову підсилюється в блоці П2, та потрапляє в блок ФВ (регульований фазообертач) який виконує функцію настройки приладу для різних дефектів. Далі сигнал з ФВ потрапляє в блоки САД1 та САД2 (синхронні амплітудні детектори), разом з цим сигналом в САД1 та САД2 потрапляє сигнали з СЧ1 та СЧ2 для перемноження цих сигналів. На виході з цих блоків результуючий сигнал можливо описати математично як:

$$\begin{aligned}
 a(t) * b(t) &= A \sin(\omega t) * B \sin(\omega t + \varphi) = \\
 &= \frac{1}{2} AB (\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos(2\omega t + \varphi))
 \end{aligned}
 \quad (2.2)$$

Після фільтра низьких частот відфільтровується складова  $\cos(2\omega t + \varphi)$ , і на АЦП(аналогово цифрової перетворювач) приходять постійна складова в якій є деякий коефіцієнт ( $m$ ) перетворення після фільтру. Сигнал кодується та передається до МК де він і оброблюється.

За формулами :

$$a_{sin} = ABm(\sin(\varphi)), \text{ та } a_{cos} = ABm(\cos(\varphi)) \quad (2.3)$$

Отримуємо відповідні проекції сигналу.

Амплітуда сигналу визначається як:

$$A = \sqrt{a_{sin}^2 * a_{cos}^2} \quad (2.4)$$

Фаза сигналу:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{a_{sin}}{a_{cos}}\right) \quad (2.5)$$

Далі МК через модуль зв'язку Bt (Bluetooth) передає данні до МТ (мобільний телефон). МТ використовується в якості інтерфейсу з МК через спеціальну програму, до екрану можливо виводити графіки, та ін. інформативні данні, також можна змінювати параметри контролю. Також можливо реалізувати базу даних для збереження результатів контролю.

### 2.3.Розрахунок ВСП-ОК

Для контролю визначеного ОК використовується накладний ВСП трансформаторного типу. У цьому випадку зміна опору є основним фактором завади. Тому доцільно використовувати амплітудно фазовий метод виділення інформації. При вимірюванні питомої електропровідності критерієм оптимальності являється досягнення максимальної чутливості до її приросту.

1. Підбір діаметра котушки збудження, для максимально локального контролю візьмемо :

$$D_1 = 5 \text{ мм}$$

2. Узагальнений параметр  $\beta$ , вибирається у урахуванням того факту, що максимальна чутливість до приросту питомої електропровідності знаходиться в проміжку між 3 – 6, Отже:

$$\beta = 3.5$$

3. Для сплаву титану питома електропровідність знаходиться в проміжку між 0,6 – 2,4 МСм/м.

Оберемо середнє значення:

$$\sigma = \frac{0,6 + 2,4}{2} = 1,5 \frac{\text{МСм}}{\text{м}}$$

4. Визначимо аксіальну довжину котушки згідно з умови, що :

$$0,15\text{мм} < \frac{L}{D_1} < 0,3\text{мм}$$

$$0,75\text{мм} < L < 1,5\text{мм}$$

$$L = 1.5 \text{ мм}$$

5. Діаметр дроту котушки збудження , вибираємо згідно умови:

$$0,05\text{мм} < d_1 < 0,4\text{мм}$$

$$d_1 = 0.05 \text{ мм}$$

6. Число витків котушки розраховується в залежності від розмірів котшки яку ми хочемо отримати та кількості шарів обмотки дротом певного діаметру.

Отже :

$$\text{площа вікна } S_0 = 10\text{мм}^2$$

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількість шарів обмотки котушки :

$$n = \frac{L}{d_{1iz}} \quad (2.6)$$

де  $d_{1iz}$  – діаметр дроту котушки збудження з ізоляцією.

$$d_{1iz} = 0,1 \text{ мм}$$

$$n_1 = \frac{1.5}{0.1} = 15$$

Визначення кількості витків,

$$W_1 = n_1 * \frac{S_0}{L * d_{1iz}} \quad (2.7)$$

$$W_1 = 15 * \left( \frac{10}{1,5 * 0,1} \right) = 1000$$

7. Розрахунок струму збудження  $I$  з умови перегріву котушки:

$$I = (0.85 \div 0.9) * I_{пр} \quad (2.8)$$

Де,

$$I_{пр} = \sqrt{\frac{\lambda * S_{охл} [\theta]_d}{R}} \quad (2.9)$$

$$\lambda = (8 \div 12) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^\circ\text{C}} - \text{коефіцієнт теплопередачі}$$

$$S_{охл} = 7,069 * 10^{-10} \text{ м}^2 - \text{поверхня охолодження котушки};$$

$$[\theta]_d = 5^\circ\text{C} - \text{допустима температура перегріву, яка вибрана з умови ,}$$

$$[\theta]_d < 25^\circ\text{C}$$

$$\rho = 0.0175 \text{ Ом} * \frac{\text{мм}^2}{\text{м}} - \text{електричний опір для міді}$$

$R$  – опір збуджувальної котушки;

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R = \frac{4 \cdot \rho \cdot W_1 \cdot D_1}{d_1^2} \quad (2.10)$$

$$R = \frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{(0,1)^2 \cdot 10^{-6}} = 35 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 3,141593 \cdot 10^{-5} \cdot 5}{35}} = 0,016 \text{ А}$$

$$I = 0.9 \cdot 0.016 = 0.014 \text{ А}$$

8. Далі обираємо діаметр дроту вимірювальної котушки з умови:

$$d_2 = (0.02 \div 0.1) \text{ мм}$$

$$d_2 = 0.05 \text{ мм}$$

Товщина дроту з ізоляцією :

$$d_{2\text{із}} = 0,1$$

9. Розрахунок кількості витків вимірювальної котушки

$$n_2 = \frac{L}{d_{2\text{із}}} \quad (2.11)$$

$$n_2 = \frac{1.5}{0.1} = 15$$

$$W_2 = n_2 \cdot \frac{S_0}{L \cdot d_{2\text{із}}} \quad (2.12)$$

$$W_2 = 15 \cdot \frac{4}{1,5 \cdot 0,1} = 400$$

10. Розрахунок частоти струму збудження здійснюється виходячи з формули для розрахунку узагальненого параметру  $\beta$  :

$$\beta = 0,5 \cdot D \sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \quad (2.13)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.14)$$

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f = \frac{\beta^2}{2\pi D^2 \mu_0 \sigma} \quad (2.15)$$

Підставивши необхідні значення, отримаємо вираз:

$$f = \frac{3.5^2}{2\pi * 5^2 * 10^{-6} * 1.5 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7}} = 41.4 \text{ кГц}$$

11. Розрахунок проникання вихрових струмів розраховується за формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \quad (2.16)$$

Підставивши значення отримаємо вираз:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi * 41400 * 4\pi * 10^{-7} * 1.5 * 10^6}} = 0.002 \text{ мм}$$

12. Розрахунок напруги холостого ходу:

$$U_{\text{оп}} = 1,35 * \omega * \mu_0 * W_1 W_2 * \left(\frac{D_2}{D_1} - 0.3\right) * I \sqrt{D_1 D_2} \quad (2.17)$$

$$U_{\text{оп}} = 1,35 * 2\pi * 41400 * 4\pi * 10^{-7} * 1000 * 400 * \left(\frac{10}{5} - 0.3\right) * \\ * 0.014 \sqrt{5 * 10 * 10^{-6}} = 0.801 \text{ В}$$

13. Здійснюємо розрахунок внесених напруг за допомогою застосування MATLAB

Для  $\beta = 3.5$ , значення буде дорівнювати :

$$U_{\text{вн}} = 0.4144 - 0.3256i = 0.52 * e^{-0.66i}$$

Для  $\beta = 4$ , значення буде дорівнювати :

$$U_{\text{вн}} = 0.3570 - 0.2921i = 0.46 * e^{-0.7i}$$

Для  $\beta = 4.5$ , значення буде дорівнювати :

$$U_{\text{вн}} = 0.3158 - 0.2642i = 0.41 * e^{-0.69i}$$

Для  $\beta = 5$ , значення буде дорівнювати :

$$U_{\text{вн}} = 0.2841 - 0.2416i = 0.37 * e^{-0.71i}$$

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



#### 14. Визначення абсолютно внесеної напруги

$$U_{\text{вн}} = U_{\text{оп}} (Re U_{\text{вн}} + i Im U_{\text{вн}}) * e^{-3\xi} \quad (2.18)$$

Де  $\xi$  – відносна відстань від еквівалентних витків збуджуючої та вимірювальної обмоток ВСП до ОК:

$$\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_e} \quad (2.19)$$

$h_1, h_2$  - висота розташування обмоток над ОК

$D_e$  – еквівалентний діаметр контуру

$$D_e = D_1 + 1.5h_1 \quad (2.20)$$

$$D_e = 5 + 1.5 * 0.1 = 5.15 \text{ мм}$$

$$\xi = \frac{0,1 + 0,1}{5,15} = 0,04$$

Отже  $U_{\text{вн}}$  дорівнює:

$$U_{\text{вн}} = 0,801(0.4144 - 0.3256i) * e^{-3*0,04} = 0.328 - 0.258i = 0.42 * e^{-0.66}$$

$$U_{\text{вн}} = 0.42 \text{ В}$$

#### 15. Визначення вихідного сигналу ВСП:

$$U_{\text{вих}} = E_0 + U_{\text{вн}} \quad (2.21)$$

$$E_0 = j \cdot U_{\text{оп}} \cdot e^{-3c/D_1} \quad (2.22)$$

$$E_0 = j \cdot 0,801 \cdot e^0 = j0,801 \text{ В}$$

$$c = h_1 - h_2 = 0$$

$$\dot{U}_{\text{вих}} = j0,801 + 0,3$$

$$U_{\text{вих}} = 0,9 \text{ В}$$

## 2.4. Обґрунтування заміни вимірювальної котушки на магніторезистор

Вихрострумний контроль має важливу перевагу безконтактного та швидкого тестування струмопровідних пластин. Так, в літературі описані різні архітектури вихрострумних зондів ЕСП для виявлення дефектів. Вихрострумний зонд зазвичай складається з котушки збудження і чутливого елемента. В якості чутливого елемента можуть використовуватися магніторезистори, анізотропні або гігантські котушки. Великі шуми і спотворення через ефект відриву і електромагнітні характеристики матеріалу є загальними недоліками використання вихрострумних зондів. Однак, хороші геометричні параметри котушок і оптимальне формування та обробка сигналу підвищують можливості цих датчиків у виявленні дефектів. У конкретному випадку контролю зварювальної зони ефект відриву та електромагнітні характеристики матеріалу майже не зменшують можливості котушок збудження млинцевого типу з використанням котушок або магніторезисторів як чутливих елементів. Попередні роботи повідомляють про кращі результати з рівномірними вихрострумними зондами, включаючи тангенціальне збудження і диференціальне виявлення котушок.

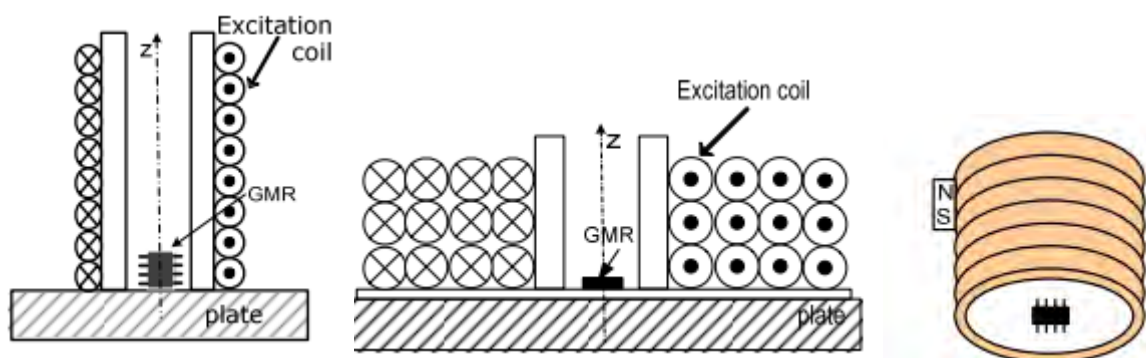


Рис. 2.2. ЕСП: (а) соленоїд; (б) (в) млинець;\*. З боків розташовані поляризаційні магніти.

Сьогодні магнітометричні магніторезистивні датчики замінюють детектуючі котушки з ВСП. В якості магніторезистивних ефектів згадують анізотропний магнітоопір, "гігантський" магнітоопір (GMR) та тунельний магнітоопір. Значення чутливості та властивості спрямованості рекомендують датчики GMR як найкраще рішення в складі ЕСП для застосування для виявлення тріщин та дефектів.

У даній роботі була побудована система, яка поєднує гігантських магніторезисторних датчики (GMR) і трансформаторну котушку збудження. Ця установка демонструє необхідні вимоги до чутливості для виявлення субповерхневих дефектів навіть при використанні низькочастотних полів збудження. Використання цієї архітектури вихрострумowego датчика дозволяє мінімізувати шум, пов'язаний з ефектом відриву в області зварного шва, забезпечуючи точне виявлення дефектів і оцінку геометричних характеристик дефектів навіть для субповерхневих дефектів або аномалій зварного шва.

Неруйнівний контроль парамагнітних металевих матеріалів, таких як алюміній, є зростаючою галуззю, яка вимагає нових сенсорних рішень. Сьогодні вихрострумові випробування вступають в нову еру, замінюючи традиційні індуктивні датчики вихрострумовими датчиками (ЕСР), що використовують повністю збуджуючі котушкові структури на основі котушок в поєднанні з твердотільними магніторезистивними датчиками (анізотропний магнітоопір - AMR, "гігантський" магнітоопір - GMR, тунельний магнітоопір - TMR) в якості частини детектування і плоскі друковані плати - в якості частини збудження.

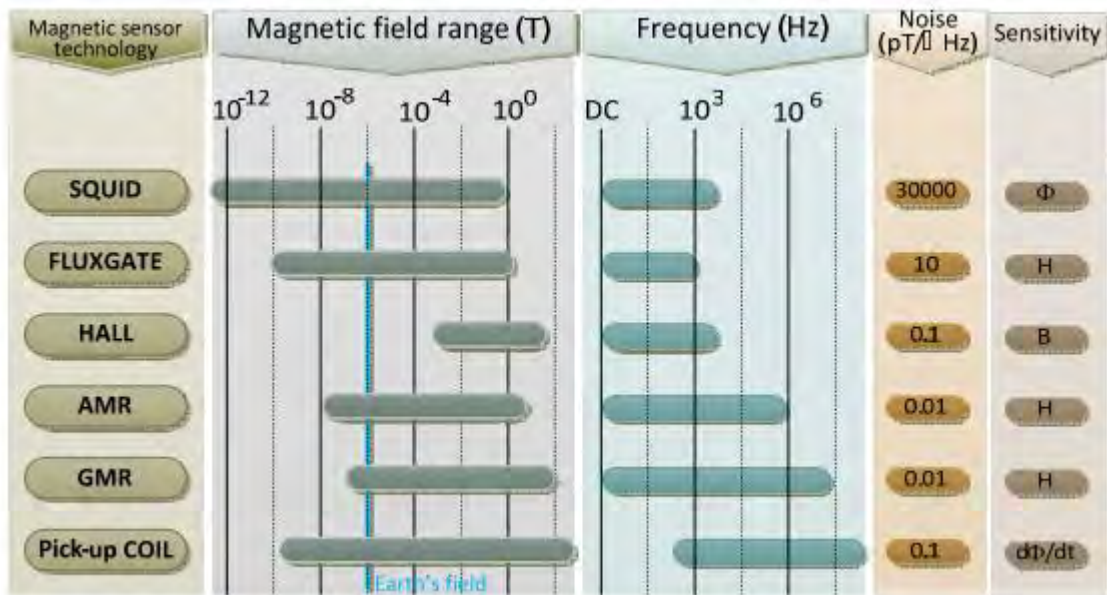
Гігантські магніторезистори (GMR) - це пристрої, засновані на явищі гігантської магніторезистивності, яке було вперше виявлено в 1988 році. Найкраще використання GMR для датчиків магнітного поля здійснюється у конфігурації Вітстоуна-моста, як зображено на рис. 2.3 (а).



Рис. 2.3 - (а) Мостовий датчик GMR AA002-02; (б) Вихідна характеристика для напруги живлення 5 В.

Чотири гігантські магніторезистори з'єднані у мостову конфігурацію, причому два з них захищені від магнітного впливу. Рис. 2.3 (б) представляє напругу виходу датчика в залежності від густини магнітного потоку. Типова V-подібна характеристика визначає необхідність постійної постійної напруги, яку можна

отримати за допомогою магніту або змінного струму. В лінійних ділянках датчик AA002-02 має чутливість приблизно 4 мВ/В-Ое. Ця чутливість відповідає характеристиці на рис. 2.3 (б) для постійної напруги живлення 5 В в СІ-одинацях.



Таблиця 2.1 - Технологія магнітних датчиків

GMR мають обмежену роздільну здатність поля, як показано у таблиці 1. Тим не менш, вони мають переваги, які роблять їх надійними зондами в промислових шумних середовищах. Наприклад, вони нечутливі до магнітних полів, перпендикулярних до їхньої напрямку чутливості, і характеристика їх датчика не буде порушена при сильних магнітних полях.

Що стосується твердотільних датчиків магнітного поля, то GMR є загальноприйнятим рішенням. Використання гігантських магніторезисторів в якості магнітометрів для виявлення поля робить вихрострумний контроль більш чутливим до широкосмугового частотного збудження. Було розроблено кілька реалізацій, в яких різні типи дефектів були виявлені і проаналізовані для вилучення інформації, пов'язаної з локалізацією дефектів і геометричними характеристиками.

Значне покращення можливостей ВСП, в тому числі зменшення шуму, пов'язаного з ефектом відриву, досягається за рахунок використання рівномірної генерації вихрових струмів. Порівняння результатів, отриманих при використанні котушок з рівномірним вихровим струмом і класичних плоских котушок збудження, представлено в роботі Кояма (Koyama). Автори підкреслюють переваги використання рівномірного магнітного поля для дефектоскопії в

зоні зварювання. Поєднання переваг генерації рівномірного магнітного поля з високою чутливістю датчиків магнітометрів GMR призвело до розробки нових архітектур рівномірних вихрострумових зондів.

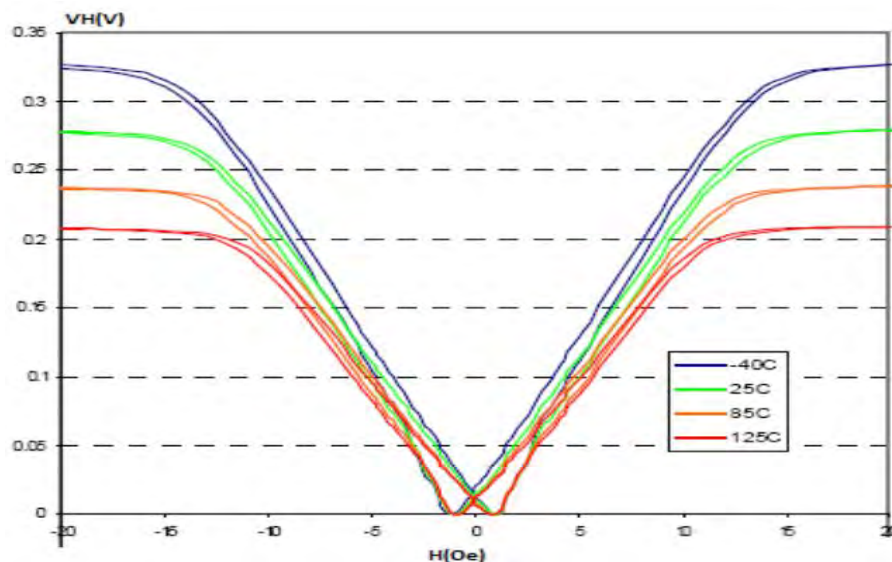


Рис. 2.3 - AA002 Температурні характеристики датчика магнітометра GMR (вихідна напруга,  $H$  - прикладена магнітна індукція) AA002 Магнітометр GMR (вихідна напруга,  $H$  - прикладена магнітна індукція)

Рівномірна вихрострумова зонда - складова детекції Частина вихрострумового GMR AA002 від NVE. Геометричні характеристики GMR відповідають геометричним характеристикам SOIC8. За внутрішньою електричною архітектурою AA002 вона містить чотири 5 кОм GMR, налаштовані у формі моста диференційного зв'язку, що забезпечує високу чутливість, але також знижує вплив температури, як це можна бачити на характеристиках, представлених на рисунку 2,3.

На рисунку 2.3 можна спостерігати гістерезис характеристик AA002, який може обмежувати відтворюваність та точність виявлення тріщин, у індуктованих зразках.

З урахуванням низького рівня змін напруги на GMR, спричинених неоднорідностями у зразках з алюмінію, було використано набір підсилювачів сигналу, щоб підсилити сигнали, отримані на виходах GMR. Внаслідок V-подібних характеристик вихідного сигналу магнітного поля GMR, для окремих GMR потрібна магнітна встановка, характеризується дисперсією магнітних характеристик, що ускладнює процедуру встановлення зсуву.



## 2.5. Вибір магніторезистивного датчика

Таблиця 2.2 – Серія магніторезисторів від компанії NVE

Magnetometers (AA-Series)										
Available Part	Linear Range (lOel)		Saturation (lOel)	Sensitivity (mV/V-Oe)		Max. Non-linearity (% Uni.)	Max. Hysteresis (% Uni.)	Max. Operating Temp.	Typ. Resistance	Package
	Min.	Max.		Min.	Max.					
AA002-02	1.5	10.5	15	3	4.2	2%	4%	125°C	5 kΩ	SOIC8
AA003-02	2	14	20	2	3.2	2%	4%	125°C	5 kΩ	SOIC8
AA004-00	5	35	50	0.9	1.3	2%	4%	125°C	5 kΩ	MSOP8
AA024-00	5	35	50	0.9	1.3	2%	4%	125°C	5 kΩ	MSOP8 (cross-axis)
AA004-02	5	35	50	0.9	1.3	2%	4%	125°C	5 kΩ	SOIC8
AA005-02	10	70	100	0.45	0.65	2%	4%	125°C	5 kΩ	SOIC8
AA006-00	5	35	50	0.9	1.3	2%	4%	125°C	30 kΩ	MSOP8
AA006-02	5	35	50	0.9	1.3	2%	4%	125°C	30 kΩ	SOIC8
AA007-00	50	450	500	0.08	0.12	2%	4%	125°C	5 kΩ	MSOP8
AAH002-02	0.6	3	6	11	18	4%	15%	150°C	2 kΩ	SOIC8
AAH004-00	1.5	7.5	15	3.2	4.8	4%	15%	150°C	2 kΩ	MSOP8
AAL002-02	1.5	10.5	15	3	4.2	2%	2%	125°C	5.5 kΩ	SOIC8
AAL004-10	1.5	10.5	15	3	4.2	4%	2%	125°C	2.2 kΩ	TDFN6
AAL024-10	1.5	10.5	15	3	4.2	4%	2%	125°C	2.2 kΩ	TDFN6 (cross-axis)
AAK001-14	400	2500	4000	0.0025	0.004	2%	4%	85°C	3.5 kΩ	ULLGA4

Існує чотири типи датчиків серії AA/AB, як показано в таблиці 2.3. Підтипи “Н” призначені для дуже високої чутливості, а типу «К» мають низьку чутливість і високу насиченість для зондування у високих полях. Тип «L» мають низький гістерезис. Деталі серії ААН також мають максимальну температуру 150°C.

Параметр	AAxxx/ ABxxx	AAHxxx/ ABHxxx	AAKxxx	AALxxx
Чутливість до поля	Високий	Дуже високий	Низький	Високий
Діапазон робочих полів	Високий	Низький	Дуже високий	Середній
Гістерезис	Середній	Високий	Середній	Низький
Максимально. Температура	Високий	Дуже високий	Рекламний ролик	Високий

Таблиця 2.3 - Підтипи датчиків

Магніторезистор вибирався від компанії ;

NVE Corporation (NVE) - це технологічна компанія, що спеціалізується на розробці та виробництві магніторезистивних (MR) датчиків і систем, а також інших магнітних пристроїв. Компанію було засновано 1989 року, і впродовж понад 30 років вона займається інноваційними розробками в галузі магнітних технологій.

Основний фокус NVE Corporation - це розробка і комерціалізація магніторезистивних датчиків. Ці датчики використовують ефект магніторезистивності, який дає змогу вимірювати і виявляти зміни магнітного поля. Магніторезистивні датчики NVE застосовують у різних галузях, включно з автомобільною промисловістю, електронікою, медичною технікою, енергетикою та багатьма іншими.

Компанія NVE є лідером у галузі магніторезистивних технологій і відома своїми високоточними, надійними та інноваційними продуктами. Вони пропонують широкий спектр магніторезистивних датчиків, включно з одновісними та трьохосьовими датчиками, інтегрованими схемами та модулями, а також спеціалізованими рішеннями для конкретних застосувань.

NVE Corporation також активно займається дослідженнями і розробками в галузі нових магнітних технологій. Вони прагнуть постійно покращувати свої продукти, розширювати їхні функціональні можливості та застосування, а також впроваджувати інноваційні рішення у відповідь на мінливі потреби ринку.

Загалом, NVE Corporation є визнаним лідером у галузі магніторезистивних датчиків і систем. Їхні продукти і технології знаходять застосування в багатьох галузях і допомагають клієнтам досягати високої точності, надійності та ефективності у своїх додатках, пов'язаних з вимірюванням і виявленням магнітних полів.

У рамках цього дослідження було обрано магніторезистор серії AA002-02 компанії NVE з таких причин. По-перше, цей датчик має найбільшу чутливість серед усіх доступних у каталозі моделей. Це дає змогу виявляти навіть незначні дефекти і забезпечує високу точність вимірювань.

По-друге, магніторезистор серії AA002-02 має відповідний лінійний діапазон, який відповідає вимогам вже розрахованої збудливої котушки. Це дає змогу використовувати його для ефективного контролю вихрострумових явищ із мінімальними спотвореннями даних.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, вибір магнітрезистора серії AA002-02 обґрунтовано його високою чутливістю і відповідним лінійним діапазоном, що дає змогу проводити точний і надійний вихрострумний контроль у досліджуваній системі. Цей вибір важливий для забезпечення достовірності та точності результатів цього наукового дослідження.

## 2.6. Коротка характеристика та вибір мікроконтролера як головного блоку керування.

В даний час мікроконтролери є незамінними компонентами у багатьох сферах промисловості, електроніки та автоматизації. Вони служать головними блоками управління, забезпечуючи функціональність і інтелектуальність системи. Вибір відповідного мікроконтролера є ключовим етапом проектування, оскільки від його характеристик залежать ефективність, надійність та можливості реалізувати весь функціонал пристрою.

Мікроконтролери - це невеликі інтегральні схеми, що поєднують центральний процесор, пам'ять, периферійні пристрої і вбудовані інтерфейси. Вони здатні виконувати програми та обробляти дані, а також взаємодіяти з різними пристроями та датчиками. Важливо вибрати мікроконтролер, який найкраще відповідає вимогам та завданням проекту.

При виборі мікроконтролера необхідно враховувати безліч факторів, таких як обчислювальні можливості, обсяг доступної пам'яті, наявність необхідних периферійних пристроїв (наприклад, аналогових та цифрових входів/виходів, таймерів, інтерфейсів зв'язку), підтримка протоколів, енергоспоживання, вартість та доступність на ринку.

У цьому розділі ми розглянемо деякі мікроконтролери та виберемо найбільш підходящий для цього проекту. Враховуючи важливість мікроконтролера як головного блоку управління, правильний вибір стає вирішальним чинником успішної реалізації проекту.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



## I. Мікроконтролер PIC16F877A

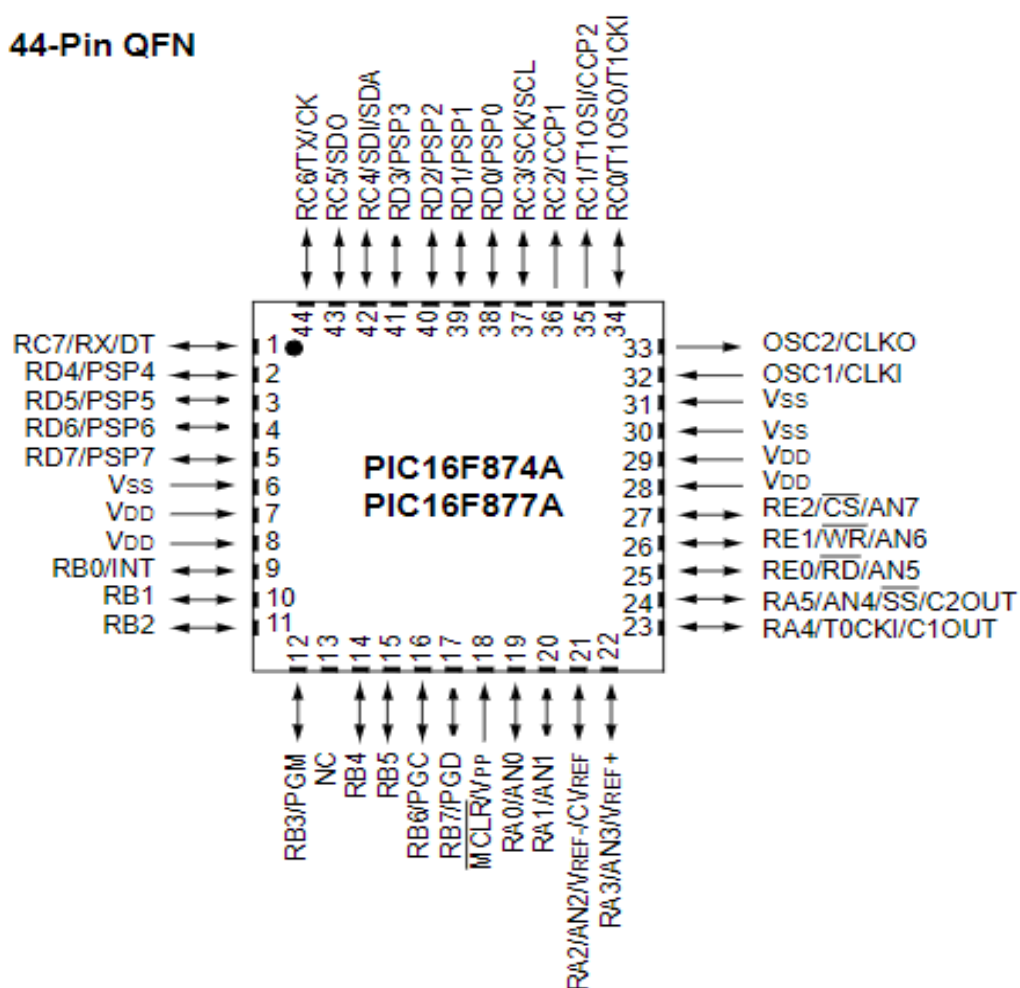


Рис.2.4 - Схема виводів PIC16F877A

PIC16F877A виробляється компанією Microchip Technology, великим американським виробником мікроконтролерів і напівпровідникових компонентів. Microchip Technology широко відома своїми мікроконтролерами сімейства PIC (Peripheral Interface Controller). Вони пропонують різноманітні мікроконтролери для різних застосувань, включно з промисловими, автомобільними, споживчими та багатьма іншими галузями.

- Архітектура: PIC16F877A є 8-бітовим мікроконтролером, заснованим на архітектурі RISC (Reduced Instruction Set Computer). Він має набір інструкцій, спеціально оптимізованих для виконання малих і швидких операцій.
- Частота: Максимальна робоча частота PIC16F877A становить 20 МГц, що забезпечує достатню продуктивність для більшості проектів.
- Об'єм пам'яті: Він оснащений 14 КБ флеш-пам'яті для зберігання програмного коду і 368 байт RAM для зберігання даних під час виконання програми.
- Входи/виходи: PIC16F877A має 33 входи/виходи загального призначення (GPIO), які можна використовувати для підключення периферійних пристроїв, сенсорів, дисплеїв та інших компонентів.
- Інтегровані периферійні пристрої: Він володіє різними інтегрованими периферійними пристроями, включно з модулями ADC (аналогово-цифрового перетворення), UART (універсальний асинхронний приймач), SPI (послідовний інтерфейс периферійних пристроїв), I2C (двопровідний інтерфейс) і таймерами/лічильниками.
- Інтерфейси: PIC16F877A підтримує різні інтерфейси, включно з SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit) і USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter), що полегшує комунікацію з іншими пристроями.
- Переривання: Мікроконтролер підтримує переривання, які дають змогу реагувати на зовнішні події та обробляти їх із високим пріоритетом.

## II. Мікроконтролер ESP8266

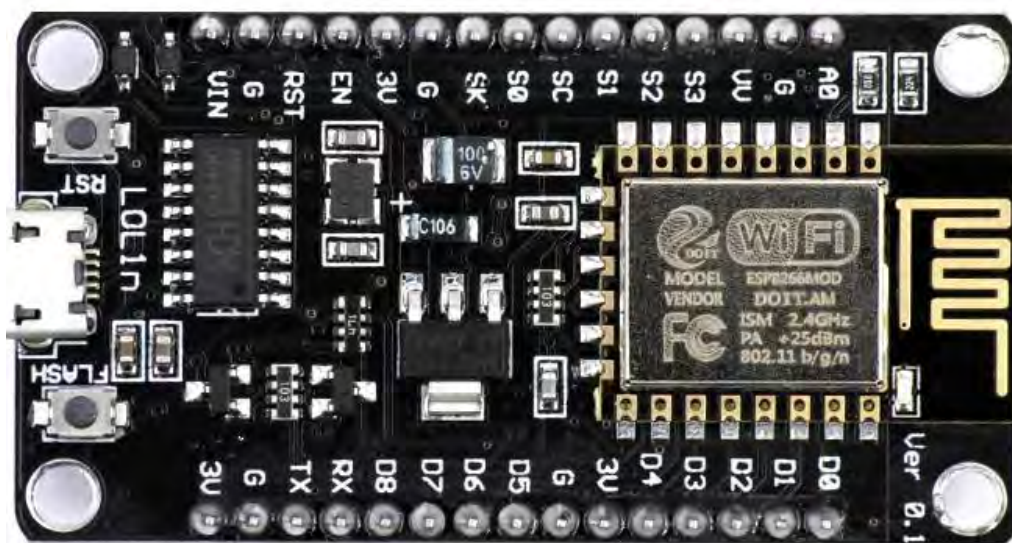


Рис2.5 – налагоджувальна плата ESP8266

ESP8266 розроблений і виробляється компанією Espressif Systems, китайським виробником напівпровідників. Espressif Systems спеціалізується на розробці мікроконтролерів із підтримкою бездротового зв'язку, як-от Wi-Fi і Bluetooth. Вони є одним із провідних виробників чипів для інтернету речей (IoT) і пропонують широкий спектр рішень, включно з модулями ESP8266.

це мікроконтролер із вбудованим модулем Wi-Fi, розроблений компанією Espressif Systems. Він отримав широке визнання завдяки своїй низькій вартості, простоті використання та потужним можливостям бездротового зв'язку.

- Мікропроцесор: ESP8266 використовує ядро Tensilica L106, що працює на частоті до 80 МГц. Він має архітектуру Xtensa, що забезпечує високу продуктивність і ефективність виконання інструкцій.
- Wi-Fi: Вбудований модуль Wi-Fi дає змогу ESP8266 підключатися до бездротових мереж і обмінюватися даними через протоколи TCP/IP. Він

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримує режими клієнта (станція), точки доступу та з'єднання між пристроями (ад-хок режим).

- Об'єм пам'яті: ESP8266 зазвичай постачається з 512 КБ або 4 МБ флеш-пам'яті для зберігання програмного коду та даних. Він також має вбудовану оперативну пам'ять (RAM) для тимчасового зберігання даних.
- GPIO: У ESP8266 є кілька входів/виходів загального призначення (GPIO), які можна налаштувати для керування зовнішніми пристроями або читання стану сенсорів. Кількість доступних GPIO залежить від конкретної моделі ESP8266.
- Інтерфейси: Він підтримує різні інтерфейси, включно з UART (серійний порт), SPI (послідовний інтерфейс периферійних пристроїв) і I2C (двопровідний інтерфейс), що робить його сумісним з безліччю периферійних пристроїв.
- Аналогово-цифровий перетворювач (ADC): Деякі моделі ESP8266 мають вбудований модуль АЦП для вимірювання аналогових сигналів. Це дає змогу використовувати ESP8266 для збирання даних від аналогових датчиків.
- Програмування: ESP8266 можна програмувати з використанням Arduino IDE або з використанням мови Lua за допомогою офіційної фірмової прошивки NodeMCU.
- Потужність: Він має низьке енергоспоживання, що дає змогу використовувати його в проєктах, де потрібна тривала автономна робота від батарейного живлення.
- ESP8266 вирізняється з-поміж інших мікроконтролерів своєю зручністю використання та багатим набором функцій, особливо в галузі бездротового зв'язку. Він ідеально підходить для різних проєктів Інтернету речей (IoT), де потрібне під'єднання до мережі Wi-Fi та обмін даними з віддаленими серверами або іншими пристроями.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### III. Мікроконтролер STM32F103C8T6

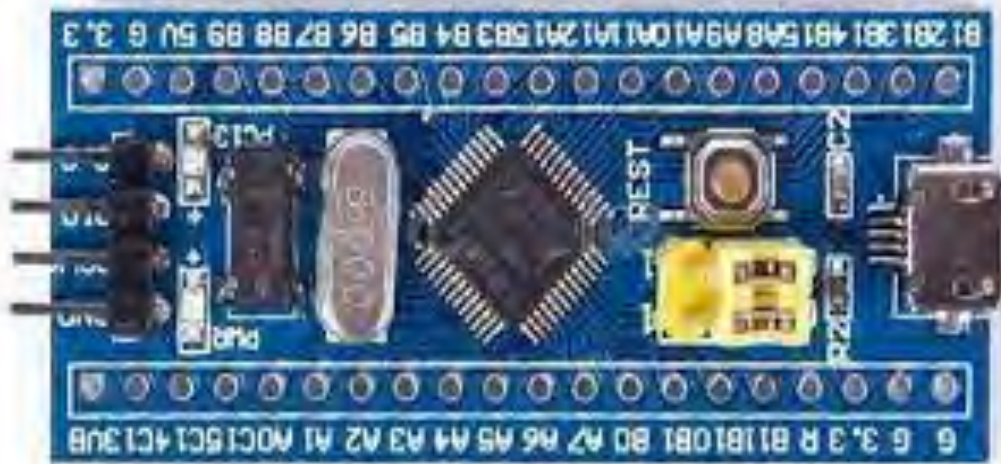


Рис. 2.6 - налагоджувальна плата STM32F103C8T6

Виробляється компанією STMicroelectronics, одним із провідних світових виробників напівпровідників. STMicroelectronics відома своїми високоякісними та інноваційними рішеннями в галузі мікроконтролерів та інших напівпровідникових компонентів. Вони пропонують широкий спектр продуктів, включно з різними серіями STM32, що мають різні функціональні можливості та характеристики.

STM32F103C8T6 є одним із членів сімейства мікроконтролерів STM32, розроблених компанією. Цей мікроконтролер заснований на архітектурі ARM Cortex-M3 і пропонує безліч можливостей для широкого спектра застосувань.

- Частота: Максимальна робоча частота становить до 72 МГц, що забезпечує високу продуктивність.
- Пам'ять: Вбудована пам'ять включає 64 КБ флеш-пам'яті для програмного коду і 20 КБ оперативної пам'яті (RAM) для даних.

- GPIO-порти: Всього 37 GPIO-портів (General-Purpose Input/Output), які можна налаштувати для роботи з різними периферійними пристроями.
- Інтерфейси: STM32F103C8T6 підтримує різні інтерфейси, зокрема UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit), USB (Universal Serial Bus), CAN (Controller Area Network), Ethernet та інші. Це дає змогу легко інтегрувати контролер у різні системи та взаємодіяти з периферійними пристроями.
- АЦП: Мікроконтролер оснащений 12-бітовим АЦП (аналого-цифровим перетворювачем), який забезпечує високу точність вимірювання аналогових сигналів. У STM32F103C8T6 є до 16 каналів АЦП.
- Таймери: Мікроконтролер має кілька вбудованих таймерів, які можуть використовуватися для вимірювання часу, генерації сигналів і виконання інших таймінгових операцій.
- Енергоспоживання: Споживання енергії залежить від конфігурації та режиму роботи, але зазвичай становить від 1 мА до 100 мА.

Характеристика	STM32F103C8T6	ESP8266	PIC16F877A
Архітектура	ARM Cortex-M3	Xtensa	8-бітний RISC
Розрядність	32 біта	32 біта	8 біт
Робоча частота	72 МГц	80 МГц	20МГц
Обсяг флеш-пам'яті	64КБ	512КБ	14КБ

Об'єм опера- тивної пам'яті	20КБ	Залежить від моделі	368 Б
GPIO-порти	37	9	33
Інтерфейси	UART, SPI, I2C, USB, CAN	UART, SPI, I2C, Wi-Fi	UART, SPI, I2C
Роздільна зда- тність АЦП	12 біт	--	8 біт
Енергоспожи- вання	От 1 мА до 100 мА	От 10 мкА до 70 мА	От 1мА до 100мА

Отже підсумовуючи для проєкту було обрано мікроконтролер STM32F103C8T6 через його високу продуктивність і можливість ефективно обробляти складні завдання. Багатий набір периферійних модулів: має безліч GPIO-портів, інтерфейсів UART, SPI, I2C, USB, CAN та інших, що робить його універсальним для підключення і взаємодії з різними периферійними пристроями. Широкі можливості АЦП порівняно з іншими контролерами, 12-бітний АЦП і 16 каналів, що забезпечує високу точність вимірювання аналогових сигналів і паралельність. STMicroelectronics є відомим і шанованим виробником напівпровідників, і їхні мікроконтролери мають хорошу репутацію в галузі завдяки своїй надійності та якості. Також слід зазначити, що цей контролер дешевший ніж інші.

## 2.7. Вибір попереднього підсилювача та розрахунок шумів.

При розрахунках шумів підсилювача, зазвичай розглядають такі три основні види шумів:

- Шум Джонсона або тепловий шум : Це шум, який виникає внаслідок статистичних теплових коливань носіїв заряду в опорі. Він є незалежним від зовнішніх джерел сигналу та від температури, і його спектральна густина розраховується за формулою:

$$E_{\text{ш}} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.22)$$

Де  $E_{\text{ш}}$  - середньоквадратичне значення напруги шума;

$k$ - постійна Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К)

$T$  – абсолютна температура по Кельвіну;

$\Delta f$  - робоча ширина смуги частот приладу

$R$  – опір резистора в Омах

Вихідні дані:

$$T = 293,15\text{K}$$

$$R = 1\text{кОм}$$

$$\Delta f = 100\text{кГц} - 10\text{ Гц} = 99,99\text{ кГц}$$

Розрахуємо  $E_{\text{ш}}$  :

$$E_{\text{ш}} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293,15 \cdot 10^3 \cdot 99,99 \cdot 10^3} = 1.272 \cdot 10^{-6}\text{В}$$

- Спектральна густина шумової напруги. Це міра шуму в залежності від частоти. Вона виражається у вольтах на корінь герц і представляє роз-

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис (2.7) – зовнішній вигляд та розміри ОП 140 УД6 .

А так як підсилювач має коефіцієнт підсилення 1000, то на виході підсилювача отримаємо шум рівний 4мВ

## 2.8. Розрахунок ФНЧ

Згідно з розділом 2.2, можна зробити висновок, що після проходження сигналу через блок САД (синхронний аналоговий детектор), на виході ми отримаємо сигнал із подвоєною частотою вихідного сигналу зі змінною складовою. Для аналізу постійної складової було прийнято рішення створити фільтр низьких частот з частотою зрізу 45 Гц. Вибір цієї частоти зумовлений тим, що в електромережі використовується частота 50 Гц, і для запобігання завадам, пов'язаним із цією частотою, необхідно використовувати фільтр низьких частот.

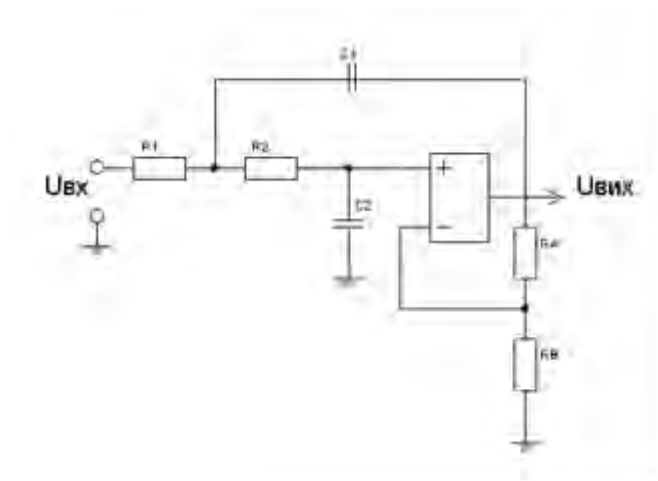


Рис. 2.8 – ФНЧ

Частота зрізу

У фільтрах Батерворта частота зрізу  $f_{зр}$  збігається з частотою, на якій коефіцієнт підсилення  $k_u$  зменшується на 3 дБ.

$$\frac{f_{здБ}}{f_{зр}} = 1$$

$$f_{зр} = f_{здБ} = 50 \text{ Гц}$$

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Далі обираємо величину R та C, враховуючи співвідношення:

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Задаємо значення ємності C і розраховуємо R.

$$C_1 = C_2 = C = 0,047 \text{ мкФ}$$

$$R = \frac{1}{2\pi f_{\text{ср}} C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 45 \cdot 0,047 \cdot 10^{-6}} = 752880 \text{ Ом}$$

1. Знаходимо величину затухання  $\alpha$  з таблиці.

$$\alpha = 1,414$$

2. Розраховуємо резистори  $R_A$  та  $R_B$ .

$R_A = 10 \text{ кОм}$ , тоді  $R_B$  знаходимо за формулою:

$$R_B = (2 - \alpha) \cdot R_A = (2 - 1,414) \cdot 10^4 = 5860 \text{ Ом}$$

3. Визначаємо коефіцієнт підсилення фільтру до полоси пропускання.

$$k_u = \frac{R_B}{R_A} + 1 = \frac{5860}{10^4} + 1 = 1.586$$

## Висновок до 2 розділу:

Висновок до 2 розділу дипломної роботи містить підсумки та результати проектування вихрострумowego дефектоскопа і розрахунку вихрострумowego перетворювача.

У даному розділі було сформульовано постановку завдання, яке передбачало розробку функціональної схеми вихрострумowego дефектоскопа. В процесі розробки було проведено розрахунок вихрострумowego перетворювача та вибір мікроконтролера як головного блоку керування. Для поліпшення вимірювальних характеристик було обґрунтовано заміну вимірювальної котушки на магніторезистор та виконано підбір датчика. Також був здійснений вибір попереднього підсилювача та проведено розрахунок шумів. З метою фільтрації шумів у системі було розраховано фільтр нижніх частот.

В результаті проведених досліджень та розрахунків було розроблено функціональну схему вихрострумowego дефектоскопа, обґрунтовано заміну

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювальної котушки на магніторезистор, вибрано мікроконтролер та попередній підсилювач, а також розраховано фільтр нижніх частот. Отримані результати дають підстави для подальшої реалізації вихрострумowego дефектоскопа та його застосування в неруйнівному контролі металевих виробів.

### **Висновок до дипломного проекту**

Дипломний проект на тему "Вихрострумовой дефектоскоп на базі магніторезистора" присвячений розробці та дослідженню ефективного методу неруйнівного контролю металевих виробів. Метою роботи є проектування та розрахунок вихрострумowego дефектоскопа, який базується на використанні магніторезистора як датчика.

У розділі 1 "Аналітичний огляд" проведений детальний аналіз методів неруйнівного контролю, зокрема магнітного, індукційного та магніторезистивного методів. Розглянуті основні характеристики вихрострумowego методу контролю та класифікація вихрострумowych перетворювачів. Досліджено опрацювання сигналів з вихрострумowych перетворювачів.

У розділі 2 "Проектування вихрострумowego дефектоскопа і розрахунок ВСП" проведений процес проектування вихрострумowego дефектоскопа. Сформульовано постановку завдання для даного розділу, розроблено функціональну схему дефектоскопа та розраховано вихрострумовой перетворювач та фільтр нижніх частот. Також виконано вибір мікроконтролера як головного блоку керування та розрахунок шумів для попереднього підсилювача.

У висновках до розділів 1 і 2 підсумовано отримані результати. Висновок до розділу 1 містить висновки щодо проведеного аналізу методів неруйнівного контролю. Висновок до розділу 2 містить підсумки проектування вихрострумowego дефектоскопа та результати проведених розрахунків.

В цілому, дипломний проект пропонує новий підхід до неруйнівного контролю металевих виробів за допомогою вихрострумowego дефектоскопа на базі магніторезистора. Отримані результати вказують на можливість ефективного використання цього пристрою в промислових умовах для виявлення дефектів у металевих виробах.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЛІТЕРАТУРА

- [1]. Технології електромагнітного неруйнівного контролю. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с.
- [2]. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение / Егиазарян Г. А., Стафеев В. И. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.: ил. – (Массовая б-ка инженера «Электроника»).
- [3]. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. : Наука, 1968. – 940 с. – (4).
- [4]. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин.
- [5]. Кобус А. Датчики Холла и магниторезисторы. Перевод с польского В. И. Тихонова и К. Б. Макидонской, под редакцией О. К. Хомерики / А. Кобус, Я. Тушинский. -1971. – 352 с.
- [6]. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: навчальний посібник / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький – ІваноФранківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 330 с.
- [7]. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 2: В 2 кн.: Вихретоковый контроль/ Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д.Покровский, Ю.Я.Останин. — М.: Машиностроение, 2003. — 688 с.: ил.Ермолов И. Н., Останин Ю. А. Методы и средства неразрушающего контроля качества. — М.: Высшая школа, 1988. — 368 с.
- [8]. Герасимов В. Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. «Методы и приборы вихретокового контроля промышленных изделий». М.: Энергоатомиздат, 1983. 242с.
- [9]. Власов К.В., Бобров А.Л. Основы вихретокового неразрушающего контроля, Учебное пособие. — Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2015. — 54 с.

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

[10]. Троицкий В.А. Вихретоковый контроль. Учебное пособие / В. А. Троицкий. -К.:— . «Феникс». - 2011. - с. 148.

[11] Магніторезистор AA002-02-NVE [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1323853/NVE/AA002-02/1>

[12] Мікроконтролер STM32F103X6 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/201590/STMICROELECTRONICS/STM32F103C8.html>

[13] Ева Мёрфи, Колм Слэттери. Всё о синтезаторах DDS “Компоненты и Технологии”, №1, 2005.

[14] Синтезатор частоты AD9835 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9835.pdf>

[15] Умножитель AD734 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad734.pdf>

					ПК-91.18.0000.000ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		