

**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 неруйнівного контролю та діагностики»**

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

**на тему: «Автоматизований вимірювач залишкового магнітного поля
феромагнітних виробів»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ПК-91

Новожилова Альона Володимирівна _____

Керівник:

Доцент, к.т.н., доцент

Лисенко Юлія Юріївна _____

Рецензент:

доцент, к.т.н.

Добролюбова Марина Валеріївна _____

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	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ	Пояснювальна записка	53	
3	A3	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 СхС	Структурна схема	1	
4	A3	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 СхФ	Функціональна схема	1	
5	A2	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 СхЕ	Електрична принципова схема	1	
6	A1	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 СК	Складальний кресленик	1	
7	A3	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.001	Кришка	1	
8	A3	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.002	Ліва половина основи вимірювальної котушки	1	
9	A1	ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ТК	Друкована плата	1	
10	A1		Друкована плата	1	
11	A1		Актуальність приладу	1	

				ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Новожилова А.В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Лисенко Ю.Ю.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-91	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизований вимірювач залишкового
магнітного поля ферромагнітних виробів»**

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 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики»»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студентці

Новожиловій Альоні Володимирівні

1. Тема проєкту «Автоматизований вимірювач залишкового магнітного поля феромагнітних виробів», керівник проєкту Лисенко Юлія Юріївна, доцент, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2057-с.

2. Термін подання студентом проєкту _____

3. Вихідні дані до проєкту: ОК – феромагнітні вироби, форма осердя – циліндр, діаметр осердя – 0,1 мм, чутливість ферозонду – 100 мкВ/А, діапазон вимірювання – (10,1000) А/м, похибка вимірювання – 2,5 %.

4. Зміст пояснювальної записки:

- 1) Аналітичний огляд;
- 2) Розрахункова частина;
- 3) Вибір елементів принципової схеми
- 4) Висновок;
- 5) Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) : структурна схема, функціональна схема, електрична принципова схема, складальний кресленик, друкована плата.

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.04.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз особливостей об'єкта контролю	01.04.2023	
2	Обґрунтування вибору ферозондового методу контролю	16.04.2023	
3	Постановка завдання	10.05.2023	
4	Вибір структурної схеми	14.05.2023	
5	Розрахунок всіх елементів	20.05.2023	
6	Проектування дефектоскопа	25.05.2023	
7	Оформлення дипломного проєкту	28.05.2023	
8	Підбиття підсумків	03.06.2023	

Студент

Альона НОВОЖИЛОВА

Керівник

Юлія ЛИСЕНКО

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

Анотація

Метою проекту є розробка та впровадження автоматизованого вимірювача, який здатний ефективно вимірювати залишкове магнітне поле у феромагнітних виробках. В процесі розробки проекту була поставлена і успішно вирішена задача проектування вимірювача, включаючи розрахунки кількості витків вимірювальної обмотки та повної активної та реактивної потужностей, які витрачаються на збудження ферозонду. В графічній частині проекту представлені структурна схема приладу, функціональна схема, складальний кресленик вимірювача та електрична принципова схема.

Ключові аспекти проекту включають розробку ферозондового перетворювача, який є основним компонентом вимірювача, а також вивчення методів та засобів точного вимірювання залишкового магнітного поля у феромагнітних матеріалах.

Висновки проекту внесуть свій внесок у галузь вимірювання магнітного поля у феромагнітних виробках, надаючи важливі відомості щодо проектування та реалізації автоматизованого вимірювача для точної та ефективної оцінки залишкового магнітного поля. Результати дослідження можуть бути використані в промислових сферах, де вимагається якісний контроль магнітних параметрів виробів.

Ключові слова: вимірювач, залишкове магнітне поле, феромагнітні вироби, автоматизація.

Abstract

The aim of the project is to develop and implement an automated meter capable of effectively measuring the residual magnetic field in ferromagnetic products. During the project development, the task of designing the meter was successfully addressed, including calculations for the number of turns in the measurement winding and the total active and reactive power required for fluxgate excitation. The graphic part of the project presents the structural diagram of the device, functional diagram, assembly drawing of the meter, and electrical schematic.

Key aspects of the project include the development of a fluxgate transducer, which is the main component of the meter, and the study of methods and means for accurate measurement of the residual magnetic field in ferromagnetic materials.

The conclusions of the project will contribute to the field of magnetic field measurement in ferromagnetic products by providing important insights into the design and implementation of an automated meter for precise and efficient assessment of the residual magnetic field. The research findings can be applied in industrial sectors where quality control of magnetic parameters in products is required.

Key words: meter, residual magnetic field, ferromagnetic products, automation.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОК – об'єкт контролю;

МРТ – магнітно-резонансна томографія;

SQID - Superconducting Quantum Interference Device;

ФП – ферозондовий перетворювач;

СФ – смуговий фільтр;

П – повторювач;

АД – амплітудний детектор;

ПК – інвертуючий підсилювач зі змінним коефіцієнтом;

МК – мікроконтролер;

Д – дисплей;

БК – блок контролю;

БОС – блок обробки сигналів;

FIFO – first-in, first-out - це спосіб організації та маніпулювання даними щодо часу та пріоритетів;

LCD – liquid crystal display.

Зміст

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1.АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1 Опис та фізико-технічні характеристики феромагнітних матеріалів.....	13
1.2 Характеристики магнітного поля	17
1.3 Причини виникнення залишкового магнітного поля.....	18
1.4 Проблеми, які викликає залишкове магнітне поле	22
1.5 Методи вимірювання магнітного поля	23
1.5.1 Вимірювання за допомогою ефекту Холла	23
1.5.2 Вимірювання за допомогою ферозондового магнітометра	24
1.5.3 Вимірювання за допомогою магніторезистивного ефекту	26
1.5.4 Вимірювання за допомогою вібраційного магнітометра.....	27
1.5.5 Вимірювання за допомогою надпровідного магнітометра	28
1.6 Вибір методу вимірювання залишкового магнітного поля	30
1.6.1 Переваги обраного методу	30
1.6.2 Тип ферозондового датчика.....	32
1.7 Огляд існуючих ферозондових вимірювачів магнітного поля	33
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	36
2.1 Розрахунок диференціального ферозонду з повздовжнім збудженням	36
2.1.1 Вибір матеріалу осердь та їх геометричних розмірів.	36
2.1.2 Вибір частот струму збудження.	36
2.1.3 Розрахунок вимірювальної котушки.....	36
2.1.4 Розрахунок збуджуючої котушки.	39
2.1.5 Розрахунок граничного струму збудження (намагнічування).....	40
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ	41
3.1 Структурна схема	41
3.2 Функціональна схема.....	41
3.3 Розрахунок коефіцієнтів підсилення.....	43
3.4 Розрахунок та підбір елементів електричної принципової схеми.....	43
3.4.1 Розрахунок вимірювального підсилювача	43
3.4.2 Розрахунок смугового фільтру	44
3.4.3 Вибір мікросхеми підсилювача зі змінним коефіцієнтом.....	46
3.4.4 Вибір операційного підсилювача	47
3.4.5 Вибір мікроконтролера.....	48

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
		Новожилова А.В.			Автоматизований вимірювач залишкового магнітного поля феромагнітних виробів	Літ.	Арк.	Аркушів
		Лисенко Ю.Ю.					9	53
						<i>ПБФ, АСНК</i>		
		Киричук Ю.В.						

3.4.6 Вибір дисплею	50
ВИСНОВОК	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		10

ВСТУП

Феромагнетизм - це властивість матеріалів виявляти інтенсивні магнітні властивості під впливом зовнішнього магнітного поля. Залишкове магнітне поле феромагнітних виробів виникає після припинення дії зовнішнього поля та має велике значення для багатьох технічних сфер.

Задача вимірювання залишкового магнітного поля феромагнітних виробів є важливою з точки зору контролю та оцінки їх магнітних властивостей. Це особливо актуально в області виробництва електричних машин, трансформаторів, динамічних систем, комп'ютерної техніки та інших приладів, де точність вимірювань магнітних полів є критичною.

Дослідження та розробка вимірювача залишкового магнітного поля феромагнітних виробів є складним завданням, оскільки вимагає поєднання знань з фізики магнетизму, інженерії матеріалів та електроніки. Однак, успішне вирішення цієї задачі має потенціал поліпшити якість контролю та виробництва феромагнітних виробів, забезпечуючи точні вимірювання залишкового магнітного поля з високою чутливістю та надійністю.

Метою даного дипломного проекту є розробка та реалізація вимірювача залишкового магнітного поля феромагнітних виробів. Проект передбачає вивчення основ магнетизму та феромагнетизму, аналіз існуючих методів вимірювання залишкового магнітного поля, розробку та оптимізацію пристрою вимірювання, а також проведення експериментальних вимірювань для перевірки його ефективності та точності.

У процесі дослідження будуть розглянуті основні принципи роботи феромагнетиків та формування залишкового магнітного поля. Важливо врахувати взаємозв'язок між магнітними властивостями матеріалів та параметрами вимірювача, такими як чутливість, діапазон вимірювання та точність.

Для реалізації вимірювача будуть використані сучасні технології та компоненти електроніки. Розробка буде зосереджена на створенні ефективної схеми

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						11
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

зчитування та обробки сигналу, яка дозволить отримати точні та достовірні результати вимірювань.

Очікується, що розроблений вимірювач буде мати широкі можливості застосування в промисловості та дослідницьких лабораторіях. Він забезпечить можливість контролювати магнітні властивості феромагнітних виробів на різних етапах їхнього виробництва, виявляти недоліки та виробничі дефекти.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						12
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Опис та фізико-технічні характеристики феромагнітних матеріалів

Феромагнітний матеріал (або феромагнетик) — це речовина в твердому кристалічному або аморфному стані, яка за відсутності будь-якого магнітного поля має намагніченість лише при низьких критичних температурах, тобто температурах нижче точки Кюрі. Магнітна сприйнятливість цього матеріалу позитивна і перевищує одиницю. Деякі феромагнетики можуть мати мимовільну намагніченість, сила якої буде залежати від зовнішніх факторів. Серед них такі матеріали мають відмінну магнітну проникність і можуть посилювати зовнішнє магнітне поле в сотні тисяч разів.

У феромагнітному матеріалі в ненамагніченому стані атомні диполі в невеликих областях, які називаються доменами, розташовані в різних напрямках. Домени виявляють сумарний магнітний момент навіть за відсутності зовнішнього поля, що намагнічує.

Однак магнітні моменти сусідніх доменів орієнтовані в протилежних напрямках. Вони компенсуються, і тому чистий магнітний момент матеріалу дорівнює нулю. При застосуванні зовнішнього магнітного поля ці домени вирівнюються в напрямку прикладеного поля. Таким чином, матеріал сильно намагнічується в напрямку, паралельному полю намагнічування (Рис. 1.1).

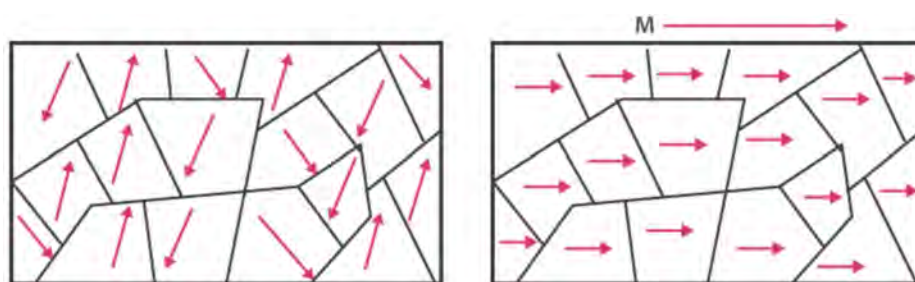


Рис 1.1 напрям магнітних диполів у доменах

Більшість феромагнітних матеріалів є металами. Поширеними прикладами таких речовин є залізо, кобальт, нікель тощо. Крім того, металеві сплави та рідкоземельні магніти також класифікуються як феромагнетики.

Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Арку

13

Магнетит - це феромагнітний матеріал, який утворюється в результаті окислення заліза в оксид. Має температуру Кюрі 580°C . Раніше він був визнаний магнітною речовиною. Магнетит має найбільший магнетизм серед усіх природних мінералів на Землі.

Феромагнітні матеріали поділяються на дві групи:

1. **Магнітно-м'які матеріали** мають низьку коерцитивну силу (нижче 400 A/m), високу магнітну проникність і малі втрати від гістерезису (Рис. 1.2). Також вони мають здатність збільшувати індукцію. Завдяки своїм властивостям вони легко намагнічуються і розмагнічуються.

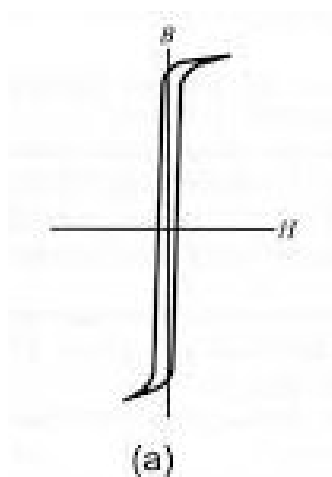


Рис. 1.2 – Крива гістерезису магнітно-м'якого матеріалу

До цієї групи матеріалів відносяться: технічне залізо та низьковуглецеві сталі, листові електротехнічні сталі, залізонікелеві сплави з високою проникністю (пермалої) та оксидні феромагнетики – ферити та оксифери.

Технічне залізо із вмістом вуглецю до $0,04\%$, вуглецеві сталі та чавун широко застосовуються для магнітопроводів, що працюють в умовах постійних магнітних полів.

Електротехнічні сталі – це сплави заліза із кремнієм ($1-4\%$). Шляхом зміни вмісту кремнію та застосуванням різних технологічних прийомів виходять сталі з широким діапазоном магнітних властивостей. Кремній покращує властивості технічного заліза: збільшуються початкова і максимальна магнітні проникності,

зменшується коерцитивна сила, зменшуються втрати енергії від гістерезису, збільшується питомий електричний опір, що важливо для зменшення так званих вихрових струмів, що виникають при магнітному полі, що циклічно змінюється, і нагрівають.

Сталі, з низьким вмістом кремнію, мають низьку магнітну проникність, велику індукцію насичення та великі питомі втрати, вони застосовуються в установках та приладах ланцюгів постійного струму або змінного струму низької частоти. Сталі з високим вмістом кремнію застосовуються в тих випадках, коли потрібно мати високу магнітну проникність у слабких і середніх полях і малі втрати від гістерезису та вихрових струмів, внаслідок чого вони можуть застосовуватися для магнітопроводів, що працюють при підвищеній частоті струму.

Деякі види магнітно-м'яких матеріалів, які найчастіше застосовуються у промисловості:

Пермалої – це сплави різного відсоткового вмісту заліза та нікелю, а деякі з них, крім того, молібдену, хрому, кремнію, алюмінію. Пермалої мають високу магнітну проникність, в 10-15 разів більшу, ніж у листової електротехнічної сталі. У цих сплавах індукція насичення досягається при малих напруженнях поля (від десятих часток до кількох сотень ампер на метр). Одні мають низьку індукцію насичення B_s (близько 0,6 – 0,8 Тл), інші – відносно високу (1,3 – 1,6 Тл). У пермалоїв з прямокутною петлею гістерезису ступінь прямокутності петлі характеризується відношенням залишкової індукції B_r до максимальної індукції B_{max} під якою розуміють індукцію при напруженості поля, що в 5-10 разів перевищує коерцитивну силу. Це відношення сягає 0,85-0,99. Коерцитивна сила таких пермалоїв лежить у межах від 1 до 30 А/м. Магнітні властивості пермалоїв сильно залежить від технології їх виготовлення.

Феритами називають феромагнітні матеріали, одержувані із суміші оксидів заліза, цинку та інших елементів. При виготовленні магнітопроводів суміш розмелюють, пресують і відпалюють при температурі близько 1200 °С; таким чином,

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						15
Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата		

отримують магнітопроводи потрібної форми. Ферити мають дуже великий питомий опір, внаслідок чого втрати через вихрові струми надзвичайно малі і їх можна застосовувати при високій частоті.

Ферити мають значну початкову магнітну проникність, незначну індукцію насичення (0,18 – 0,32Тл) та малу коерцитивну силу (8 – 80 А/м).

Магнітодіелектрики – це матеріали, які одержують із суміші дрібнозернистого феромагнітного порошку з діелектриком (полівінілхлорид, поліетилен). Суміш формують, пресують та запікають. В результаті дрібні частинки феромагнетиків виявляються розділеними електроізолюючою плівкою з немагнітного матеріалу.

Ферити та магнітодіелектрики широко застосовуються як сердечники в апаратурі провідного та радіозв'язку, в магнітних підсилювачах, обчислювальних машинах та в інших областях техніки.

2. **Магнітно-тверді(магнітно-жорсткі) матеріали** призначені для виготовлення постійних магнітів різного призначення. Ці матеріали характеризуються великою коерцитивною силою та великою залишковою індукцією (Рис. 1.3).

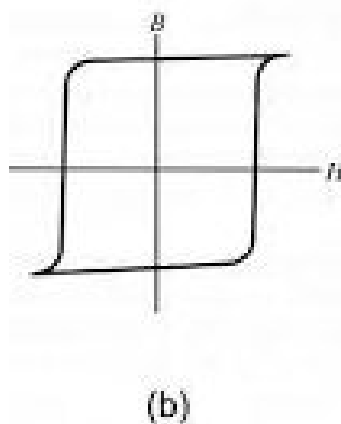


Рис. 1.3 Крива гістерезису магнітно-твердого матеріалу

До магнітно-твердих матеріалів відносяться: вуглецеві, вольфрамові, хромисті та кобальтові сталі. Їхня коерцитивна сила 5000-8000 А/м, залишкова індукція 0,8 – 1 Тл. Вони мають ковкість, піддаються прокатці, механічній обробці і випускаються промисловістю у вигляді смуг або листів.

Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Арку

16

1.2 Характеристики магнітного поля

Магнітне поле - це фізичне поле, яке виникає навколо магнітів, електричних струмів та інших джерел магнітного впливу. Воно проявляється у взаємодії з магнітними матеріалами, зарядженими частинками та іншими магнітними полями. Характеристики використовуються для визначення і вимірювання магнітного поля у різних дослідженнях та технологіях. Знання цих характеристик дозволяє керувати та використовувати магнітні поля згідно з вимогами і потребами конкретного дослідження чи пристрою. До них належать такі як:

Магнітна індукція (B) вказує на кількість магнітних силових ліній, які проходять через певну площу, перпендикулярну до магнітного поля. Вимірюється в Теслах (Тл) або Гаусах (Гс). 1 Тесла дорівнює 10 000 Гаусам. Для вимірювання магнітної індукції можна використовувати магнітометри або гаусометри.

Напруженість магнітного поля (H) – векторна величина, що характеризує величину і напрям магнітного поля в заданій точці в потрібний. Вимірюється в Ампер на метр (А/м).

Коерцитивна сила (Hc) є магнітною характеристикою, яка вимірює стійкість матеріалу до розмагнічення. Вона вказує на необхідну силу магнітного поля для зниження намагніченості матеріалу до нуля. Іншими словами, це властивість матеріалу утримувати свою намагніченість при наявності протидіючого магнітного поля.

Коерцитивна сила є важливим параметром для феромагнітних матеріалів, оскільки вона визначає їхню придатність для застосувань, де магнітна стабільність має вирішальне значення. Матеріали з високою коерцитивною силою мають вищу стійкість до розмагнічення, ніж матеріали з низькою коерцитивною силою.

Для вимірювання коерцитивної сили використовується пристрій, який називається коерциметр. Він застосовує зростаюче магнітне поле до матеріалу, доки його намагніченість не знизиться до нуля. Застосоване магнітне поле, необхідне для досягнення цього результату, називається коерцитивним полем або коерцитивною силою.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						17
Зм.	Аркуш	№ докum.	Підпис	Дата		

Коерцитивну силу можна виміряти в різних одиницях, таких як ампер на метр (А/м) за системою СІ або Ерстедах за системою СГС.

Магнітна проникність (μ) - це основна властивість матеріалу, яка описує його здатність реагувати на зовнішнє магнітне поле та створювати власне магнітне поле. Вона відображає легкість, з якою магнітний потік може проникати через матеріал. В Міжнародній системі одиниць (СІ) вимірюється Генрі на метр (Гн/м).

Магнітна проникність матеріалу залежить від різних факторів, таких як його хімічний склад, кристалічна структура, температура та сила прикладеного магнітного поля. Різні матеріали проявляють різний рівень проникності, починаючи від діамагнетиків з низькою проникністю (слабке відштовхування від магнітних полів) до парамагнетиків і феромагнетиків з високою проникністю (притягуються до магнітних полів).

Магнітна сила вказує на силу, що діє між двома магнітними полюсами. Вона виникає в результаті взаємодії між магнітними полями обох полюсів. Магнітна сила вимірюється в ньютонах (Н) .

Магнітна сила залежить від величини та взаємного розташування магнітних полюсів. За законом взаємодії магнітних полюсів, сила взаємодії пропорційна добутку магнітних зарядів двох полюсів та обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

Магнітна сила є важливою характеристикою при вивченні взаємодії магнітних матеріалів, проектуванні та виготовленні магнітних систем, а також в дослідженнях в області фізики та інженерії. Вона дозволяє встановлювати і контролювати силу взаємодії між магнітними об'єктами і використовується в багатьох практичних сферах, включаючи магнітні системи у машинобудуванні, магнітотерапію, магнітну резонансну томографію (МРТ) та інші області.

1.3 Причини виникнення залишкового магнітного поля

Небажане магнітне поле може виникати у феромагнітних деталях з різних причин. В даному підрозділі наведені деякі поширені причини.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						18
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Зварювання: Під час зварювання феромагнітних деталей досягаються високі температури, що спричиняє перехід матеріалу через фазові перетворення. Під час швидкого охолодження матеріалу, у процесі зварювання, відбувається його затвердіння, що призводить до нерівномірного розподілу магнітних властивостей. Ця нерівномірність може виникати через варіації в швидкості охолодження, що призводить до різних рівнів залишкової намагніченості на зварній області.

Також під час зварювання швидкі цикли нагрівання та охолодження можуть спричиняти термічні напруження всередині матеріалу, що призводить до механічної деформації. Вона може змінювати вирівнювання магнітних доменів, впливаючи на загальний розподіл намагніченості.

Крім того, процес зварювання включає проходження електричного струму, що генерує електромагнітні поля. Ці поля індують зворотні струми в середині феромагнітних деталей, що додатково впливає на їх магнітні властивості. Взаємодія між індукованими зворотніми струмами та магнітними доменами всередині матеріалу може призвести до змін розподілу намагніченості.

Зовнішні магнітні впливи: Небажані залишкові магнітні поля можуть виникати через зовнішні джерела, такі як сильні магнітні поля, що генеруються електромагнітними пристроями або оточуючим середовищем. Ці зовнішні поля можуть викликати магнітні ефекти у феромагнітних деталях.

Електромагнітні пристрої, такі як електродвигуни, трансформатори або машини магнітного резонансу (МРТ), генерують сильні магнітні поля в процесі своєї роботи. Вони можуть поширюватися за межами самого пристрою і впливати на навколишні феромагнітні деталі. Близькість феромагнетиків до цих пристроїв може призводити до магнітного індукції, де зовнішнє магнітне поле індукує намагніченість у них.

Крім електромагнітних пристроїв, оточуюче середовище також може впливати на феромагнітні деталі. Природні магнітні поля, такі як магнітне поле Землі, або штучні магнітні поля від ліній передачі електроенергії або магнітних сховищ,

можуть впливати на феромагнітні деталі. Сила і напрямок цих зовнішніх магнітних полів можуть варіюватися залежно від місцезнаходження та наявності наближених магнітних джерел.

Коли феромагнітні деталі піддаються впливу зовнішніх магнітних полів, магнітні домени всередині матеріалу вирівнюються з прикладеним полем, що призводить до утворення залишкового магнітного поля. Це залишкове поле залишається навіть після зняття зовнішнього магнітного впливу.

Невідповідність виробничих процесів: Неправильне виконання виробничих процесів може сприяти виникненню небажаного залишкового магнітного поля. Процеси, такі як обробка, нагрівання, охолодження та інші операції, повинні бути контрольовані, щоб забезпечити рівномірний розподіл магнітних властивостей у феромагнітних деталях. Нерівномірне нагрівання або охолодження може призводити до варіацій у намагніченості матеріалу і створювати залишкове магнітне поле.

У деяких випадках невідповідність виробничим процесам може призводити до ненавмисного магнітного забруднення. Це може статися, коли феромагнітні частинки стають вкрапленими або відкладаються на поверхні деталей під час обробки. Ці магнітні забруднення можуть створювати місцеві варіації в розподілі магнітного поля.

Механічні напруження: Механічні напруження, що застосовують до деталей з феромагнітних матеріалів, можуть змінювати їх магнітні властивості і спричинити появу небажаного магнітного поля. Деформація, нерівномірне затягування або вигинання деталей можуть призводити до змін у розподілі намагніченості. Застосування механічних сил може спричинити зміни в кристалічній структурі або решітці матеріалу, впливаючи на розташування магнітних доменів та їх взаємодії.

Важливо відзначити, що вплив механічних напружень на магнітну поведінку феромагнітних деталей не обмежується зовнішніми силами. Внутрішні напруження, такі як ті, що виникають під час виробничого процесу, також можуть сприяти утворенню залишкових магнітних полів. Ці внутрішні напруження можуть

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						20
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

звільнятися або змінюватися під зовнішнім механічним навантаженням, що призводить до змін у магнітних властивостях.

Наявність магнітних матеріалів: Використання магнітних матеріалів або наявність магнітних джерел у феромагнітних деталях можуть спричинити появу небажаного магнітного поля. Якщо деталі містять магніти або інші магнітні матеріали, то вони можуть створювати локальні магнітні поля, які залишаються навіть після видалення зовнішнього магнітного впливу. Взаємодія між властивими магнітними полями цих матеріалів та феромагнітних деталей може спричинити появу залишкових магнітних полів.

Аналогічно, ненавмисна наявність магнітних матеріалів під час процесу виготовлення або складання може сприяти утворенню небажаних залишкових магнітних полів. Наприклад, якщо феромагнітні деталі контактують з магнітними інструментами, оснащеннями або механізмами, магнітні поля, створювані цими об'єктами, можуть впливати на магнітну поведінку феромагнітних деталей.

Магнітне перемикання: Під час процесу намагнічування або розмагнічування може відбуватися неконтрольоване або неповне перемикання магнітних властивостей у феромагнітних деталях. Це може призводити до появи залишкових магнітних полів через неповне переналаштування магнітних доменів всередині матеріалу. Фактори, такі як недостатня сила або тривалість магнітного поля під час процесу перемикання, можуть сприяти неповному намагнічуванню або розмагнічуванню, що призводить до залишкових магнітних полів.

Нерівномірний розподіл магнітних властивостей: Нерівномірний розподіл магнітних властивостей у феромагнітних матеріалах може призводити до появи небажаного магнітного поля. Фактори, такі як варіативність намагніченості, наявність дефектів або включень або локальні зміни магнітних властивостей матеріалу, можуть призводити до нерівномірного розподілу магнітних потоків ОК. Ці чинники можуть генерувати локалізовані магнітні поля.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						21
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1.4 Проблеми, які викликає залишкове магнітне поле

Наявність залишкового магнітного поля у феромагнітних виробках може створювати різноманітні проблеми та складнощі. У цьому розділі ми розглянемо потенційні проблеми, пов'язані з залишковим магнітним полем, та їх вплив на феромагнітні деталі та складальні одиниці, що їх містять.

Магнітна перешкода: Одна зі значних проблем, спричинених залишковим магнітним полем, - це магнітна перешкода. Коли феромагнетики зі значним залишковим намагнічуванням знаходяться у безпосередній близькості до чутливих електронних пристроїв або магнітно-чутливого обладнання, це може призводити до перешкоди та негативно впливати на їх функціонал. Магнітні поля можуть викликати неконтрольовані струми, змінювати магнітні вимірювання та призводити до непередбачуваної поведінки або неправильної роботи електронних компонентів.

Ефект магнітної пам'яті: Ефект магнітної пам'яті є ще однією проблемою, пов'язаною з залишковим магнітним полем. Цей ефект полягає в тому, що феромагнітний виріб зберігає певну частку свого намагнічення навіть після зняття зовнішнього магнітного поля. Він може призводити до небажаних магнітних взаємодій та впливати на функціональність виробу. Наприклад, у пристроях для магнітного зберігання даних або магнітних датчиках ефект магнітної пам'яті може призводити до пошкодження даних, спотворення сигналу або неточності вимірювань.

Вплив магнітного поля на напругу: Залишкове магнітне поле може викликати механічні напруги та деформацію феромагнітних виробів. Цей ефект, відомий як магнітострикція, виникає, коли магнітні домени в матеріалі спрямовуються або переорієнтуються під впливом зовнішнього магнітного поля. Внаслідок цього виникають напруги, які можуть спричинити зміни розмірів, деформацію або навіть механічну втому виробу. Магнітострикційні напруги можуть бути особливо проблематичними у випадках, де точна стабільність розмірів є важливою, наприклад, в прецизійних інструментах, датчиках або магнітних актуаторах.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						22
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Втрата магнітних властивостей: Залишкове магнітне поле також може привести до поступової втрати магнітних властивостей ферромагнітних виробів. Це відбувається через явище, відоме як магнітна релаксація, де намагнічення з часом поступово знижується під впливом внутрішніх дислокацій, температури та інших факторів. Поступова втрата магнітних властивостей може призводити до зменшення ефективності та надійності деталей з ферромагнетиків, особливо у випадках, де стабільність магнітних властивостей є критично важливою.

1.5 Методи вимірювання магнітного поля

Вимірювання залишкових магнітних полів у ферромагнітних виробках є важливим для оцінки їх магнітних властивостей, забезпечення контролю якості та оцінки ефективності магнітних матеріалів. У цій главі ми дослідимо різноманітні електромагнітні методи, які використовуються для вимірювання залишкового магнітного поля. Ці методи базуються на принципах електромагнетизму і використовують різні техніки та прилади для точного визначення залишкової намагніченості у ферромагнітних виробках.

1.5.1 Вимірювання за допомогою ефекту Холла

Вимірювання ефекту Холла є електромагнітним методом, який використовується для вимірювання залишкового магнітного поля ферромагнітних виробів. Ефект Холла - це явище, при якому в провіднику, що перебуває в магнітному полі, виникає напруга, перпендикулярна як напрямку потоку струму, так і напрямку прикладеного магнітного поля (Рис. 1.4).

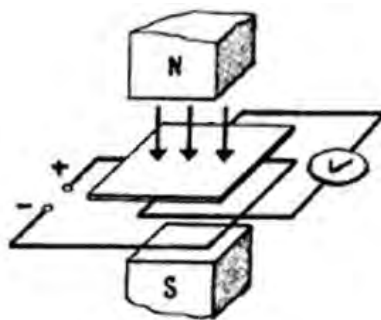


Рис. 1.4 - Схематичне зображення ефекту Холла

Під час вимірювання ефекту Холла, датчик або зонд розташовують близько до досліджуваного феромагнітного виробу. Датчик Холла складається з тонкого провідного матеріалу, через який проходить постійний струм. Датчик розміщується таким чином, щоб струм протікав перпендикулярно до напрямку магнітного поля.

При прикладанні магнітного поля перпендикулярно до напрямку струму, сила Лоренца діє на носіїв заряду всередині провідника, що призводить до накопичення зарядів на протилежних боках провідника. Це скупчення зарядів генерує електричне поле, яке, в свою чергу, створює напругу вздовж провідника, перпендикулярну як до струму, так і до прикладеного магнітного поля. Вона відома як напруга Холла.

Величина напруги Холла прямо пропорційна силі магнітного поля. Шляхом її вимірювання можна визначити залишкове магнітне поле феромагнітного виробу. Ефект Холла забезпечує неруйнівний і точний метод оцінки магнітних властивостей матеріалів.

Переваги вимірювання даного ефекту включають їх простоту, високу чутливість та швидкий час реакції. Вони можуть вимірювати як статичні, так і динамічні магнітні поля і здатні виявляти слабкі магнітні потоки. Вимірювання ефекту Холла також забезпечує хорошу лінійність в широкому діапазоні сил магнітного поля.

Однак важливо враховувати можливі причини помилок при вимірюванні ефекту Холла, такі як зміни температури, механічне напруження та зовнішні електромагнітні перешкоди. Необхідно застосовувати відповідні калібрування та компенсаційні техніки для забезпечення точних результатів.

1.5.2 Вимірювання за допомогою ферозондового магнітометра

Ферозондова магнітометрія є високочутливим електромагнітним методом для вимірювання залишкового магнітного поля феромагнітних виробів. Вона базується на властивостях феромагнітних осердь та їх реакції на прикладені магнітні поля.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						24
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Основна конфігурація ферозондового вимірювача включає феромагнітне осердя, збуджувальну обмотку та одну або декілька вимірювальних обмоток. Осердя зазвичай виготовлюють з матеріалу який має високу магнітну проникність, такого як пермалой. Збуджувальна обмотка відповідає за створення змінного струму, що проходить через осердя.

Коли змінний струм протікає через збуджувальну обмотку, то індукує магнітне поле в осерді. Воно спричиняє проникнення магнітного потоку в осердя. Однак його кількість проникнення залежить від зовнішнього магнітного поля, включаючи магнітне ОК.

Вимірювальна обмотка підключена до постійного струму (Рис. 1.5). Коли магнітний потік в осерді змінюється під впливом магнітного поля, вимірювальні обмотки виявляють ці зміни та генерують вихідну напругу. Вона пропорційна силі магнітного поля і надає корисну інформацію про залишкове магнітне поле феромагнітного виробу.



Рис. 1.5 – Ферозондові датчики

Аналізуючи зміну вихідної напруги, можна визначити різні магнітні властивості феромагнітного виробу, включаючи його залишкову намагніченість та коерцитивну силу. Ферозондові магнітометри можуть виявляти як статичні, так і динамічні магнітні поля.

Ферозондові вимірювачі мають кілька переваг у вимірюванні залишкових магнітних полів. Вони високочутливі і можуть виявляти дуже слабкі магнітні поля. Але в той самий час вони мають широкий динамічний діапазон, що дозволяє

Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Арку

25

вимірювати великі магнітні поля. Крім того, дані вимірювачі мають швидкий час реакції і можуть забезпечувати вимірювання в реальному часі.

1.5.3 Вимірювання за допомогою магніторезистивного ефекту

Магніторезистивні датчики є універсальними інструментами, які використовуються для вимірювання залишкового магнітного поля феромагнітних виробів. Вони можуть бути розташовані у безпосередній близькості до ОК для виявлення та кількісного вимірювання магнітного поля.

Магніторезистивні датчики базуються на магніторезистивному ефекті, де електричний опір матеріалу змінюється відповідно до прикладеного магнітного поля. Дані датчики зазвичай ґрунтуються на структурах тонкоплівкових мультишарів, таких як гігантська магніторезистивність або анізотропна магніторезистивність (Рис. 1.6).

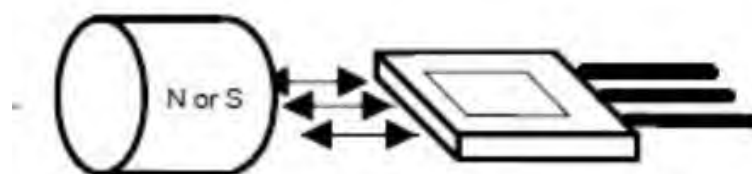


Рис. 1.6 – Схематичне зображення магніторезистивного датчика

Коли до магніторезистивного датчика застосовується магнітне поле, орієнтація магнітних моментів у матеріалі змінюється, що призводить до зміни електричного опору. Ця зміна опору може бути виміряна та корелюватися з силою прикладеного магнітного поля, включаючи залишкове магнітне поле феромагнітного виробу.

Магнітні зонди є дуже чутливими та надають точні вимірювання магнітного поля. Вони мають переваги, такі як маленький розмір, легкість інтеграції у системи та здатність вимірювати як статичні, так і динамічні магнітні поля.

Проте, важливо відзначити, що магнітні зонди можуть бути чутливими до зовнішнього електромагнітного впливу або шуму. Техніки екранування та належне калібрування можуть допомогти мінімізувати ці ефекти та забезпечити точні вимірювання.

1.5.4 Вимірювання за допомогою вібраційного магнітометра

Вібраційна магнітометрія - це електромагнітний метод, що використовується для вимірювання магнітних властивостей, включаючи залишкове магнітне поле, феромагнітних виробів. Ця техніка передбачає вплив магнітним полем на ОК під час його вібрації.

У вібраційній магнітометрії ОК, часто у вигляді тонкої стрічки або дроту, механічно стимулюється до вібрації з певною частотою. В той самий час до зразка прикладається зовнішнє магнітне поле. При вібрації зразка його магнітний момент зазнає змін у відповідь на прикладений зовнішній вплив.

Зазвичай, вібраційні магнітометри використовують вимірювальну котушку або датчик, що знаходиться у безпосередній близькості до вібруючого ОК, для виявлення змін магнітного моменту (Рис. 1.7). Вимірювальний елемент перетворює змінне магнітне поле на електричний сигнал, який можна виміряти та проаналізувати.

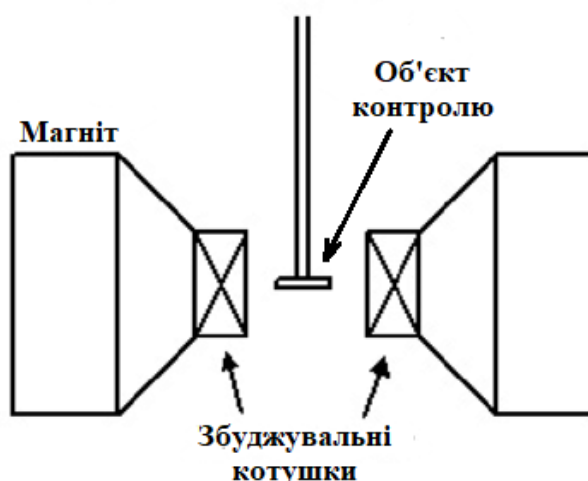


Рис. 1.7 – Схематичне зображення вібраційного методу

Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Аркуш
27

Проаналізувавши зареєстровані дані, дослідники можуть визначити магнітні властивості феромагнітного виробу, включаючи його залишкове намагнічування та коерцитивну силу.

Вібраційна магнітометрія має декілька переваг. По-перше, це неструктурний метод, який не вимагає зміни зразка і дозволяє повторні вимірювання на тому самому зразку. По-друге, вона надає чутливу міру магнітних властивостей, оскільки можна виявити навіть невеликі зміни магнітного моменту. Крім того, даний метод дозволяє виконувати вимірювання при різних частотах та амплітудах, що надає цінну інформацію про магнітну поведінку зразка при різних умовах.

Проте, вібраційна магнітометрія також має свої обмеження. Цей метод вимагає ретельної калібрування та контролю таких факторів довкілля, як температурні зміни та амплітуда вібрацій, для забезпечення точних вимірювань. Крім того, розмір та форма зразка можуть впливати на отримані результати, і необхідно враховувати відповідні особливості.

1.5.5 Вимірювання за допомогою надпровідного магнітометра

Надпровідна або «сквід» магнітометрія («SQID» - від англ. Superconducting Quantum Interference Device) - це високорозвинена електромагнітна техніка, яка надає неперевершену чутливість у вимірюванні дуже слабких магнітних полів. Вона ґрунтується на принципах надпровідності та квантової механіки для виявлення та кількісного вимірювання мінімальних змін магнітного потоку. Ці магнітометри широко використовуються в різних наукових та промислових сферах для точного опису властивостей залишкових магнітних полів у феромагнітних виробках.

Основною складовою даного вимірювача є сквід-сенсор, який складається з надпровідної петлі, розділеної двома переходами Джозефсона (Рис. 1.8). Надпровідна петля зазвичай виготовлена з тонкоплівкового матеріалу низькотемпературного надпровідника, такого як ніобій або свинець. Переходи Джозефсона складаються з двох надпровідних електродів, розділених тонким ізоляційним бар'єром.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						28
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

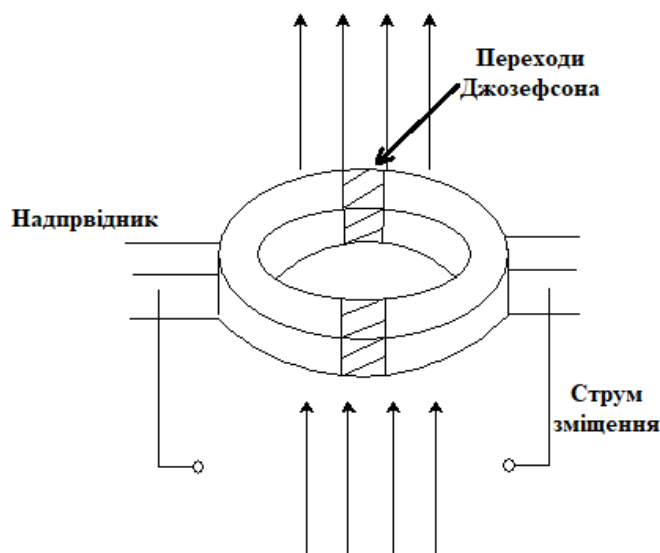


Рис. 1.8 – Схематичне зображення сквід-сенсор

Сквід-магнетометри працюють при криогенних температурах, зазвичай близькими до абсолютного нуля ($-273,15^{\circ}\text{C}$ або 0 Кельвінів), для збереження надпровідного стану петлі. Завдяки охолодженню сквід-сенсора, електричний опір в межах петлі стає доволі малим, що дозволяє точно виявляти найменші зміни магнітного потоку.

Чутливість надпровідного магнітометра надзвичайно велика, дозволяє виявляти магнітні поля таких як декілька пікоТесл (10^{-12} Тесла). Цей рівень чутливості робить сквід-магнітометрію невід'ємною складовою у багатьох галузях, включаючи матеріалознавство, геофізику, медичну діагностику та фундаментальні дослідження.

Крім вимірювання залишкового магнітного поля, сквід-магнітометри можуть надати детальні уявлення про магнітні властивості феромагнітних матеріалів. Вони можуть визначати параметри, такі як магнітний момент, магнітний гістерезис, коерцитивну силу та залишковість, що дозволяє проводити комплексну характеристику магнітної поведінки зразка.

Незважаючи на те, що сквід-магнітометрія - це дуже потужна техніка, для її роботи потрібне спеціалізоване обладнання та досвід. Необхідними для досяг-

нення точних вимірювань є криогенні системи охолодження, точні процедури калібрування та уважний захист від зовнішнього електромагнітного впливу. Однак, виняткова чутливість та точність, які надають дані прилади, роблять їх незамінними інструментами для вивчення залишкової намагніченості в феромагнітних виробках та просування нашого розуміння магнітних явищ на атомному та молекулярному рівнях.

1.6 Вибір методу вимірювання залишкового магнітного поля

Точне вимірювання та характеристика залишкових магнітних полів у феромагнітних виробках відіграють важливу роль у різних галузях промисловості, включаючи виробництво, матеріалознавство та контроль якості. При виборі відповідного методу для вимірювання залишкового намагнічення, ферозондовий метод виділяється як надійний та ефективний технічний прийом.

1.6.1 Переваги обраного методу

Існує кілька причин, чому ферозондовому детектору часто віддають перевагу перед іншими детекторами для вимірювання залишкового магнітного поля феромагнітних виробів:

Детектор демонструє **високу чутливість** до навіть незначних змін магнітного поля, що дозволяє здійснювати точні вимірювання навіть у випадку дуже слабких магнітного потоку.

Це особливо важливо для багатьох випадків, де необхідна висока точність вимірювань, таких як дослідження матеріалів, контроль якості виробництва тощо. Чутливість детектора дозволяє виявляти навіть малий зміщення магнітного поля, що може бути викликано зовнішніми факторами або внутрішніми характеристиками феромагнітного виробу.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						30
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Другою з головних переваг використання ферозондового детектора є його **висока стабільність та надійність вимірювань**. У порівнянні з вібраційним методом та методом магніторезистивної, він забезпечує більш точні та стабільні результати без необхідності складних процедур калібрування та коригування.

Детектор має вбудовані компенсаційні механізми, які дозволяють автоматично коригувати вплив внутрішніх та зовнішніх факторів, таких як температурні зміни, дрейфи, електромагнітні перешкоди та вплив силових полів. Це робить його дуже стійким до змін умов вимірювання та дозволяє отримувати постійно високу точність результатів.

Також варто відзначити, що детектор не вимагає регулярного обслуговування та підтримки. Він може працювати без змін протягом тривалого часу без необхідності встановлення додаткових компонентів або складних систем управління.

Ще однією з ключових переваг вимірювання магнітного поля за допомогою ферозондового детектора є його **здатність працювати в широкому діапазоні робочих частот**. Це означає, що він може вимірювати як постійні, так і змінні магнітні поля з високою точністю та надійністю.

Це робить детектор універсальним і придатним для вимірювання магнітних полів в різноманітних випадках. Він може бути використаний у промисловості, наукових дослідженнях, медицині, електроніці та інших галузях, де важлива вимірювання магнітних полів в різних діапазонах частот.

Також не можна не згадати таку перевагу даного методу вимірювання магнітного поля як його **менша залежність від зовнішніх факторів**.

Вібрації можуть впливати на точність вимірювання магнітного поля, спричиняючи шум чи спотворення сигналу. Однак, детектор, завдяки своїй конструкції, має високу стійкість до впливу такого типу. Він може бути добре закріплений та захищений від зовнішніх коливань, що забезпечує стабільні та точні результати вимірювання.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						31
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Також, датчик менше піддається впливу температурних змін. Він може працювати в широкому діапазоні температур без значного зниження точності вимірювання. Це особливо важливо, оскільки температурні зміни можуть відбуватися в багатьох промислових та лабораторних умовах, і детектор повинен забезпечувати стабільні результати в будь-яких температурних умовах.

Крім того, детектор має меншу вразливість до електромагнітних перешкод. Він може працювати в навколишньому електромагнітному полі без значного спотворення вимірювань. Це робить його придатним для вимірювання магнітного поля в умовах з наявністю електромагнітного шуму, який може бути присутнім в багатьох промислових середовищах.

1.6.2 Тип ферозондового датчика

Прилад, що буде розроблений в даному проєкті буде побудований на базі диференціального ферозонду з повздовжнім збудженням. В детекторі такого типу результати вимірювань не будуть залежати від напруженості магнітного поля збудження на відміну від недиференціального .

Він має два ідентичних сердечника з пермалою, плюс обмотки намагнічування, які з'єднані послідовно, назустріч одна одній і разом складають обмотку збудження (Рис. 1.9). Вимірювальна обмотка є спільною для обох сердечників. Величина напруженості поля збудження H_{\sim} повинна бути значно більшою за напруженість постійного досліджуваного поля H_x і бути достатньою для намагнічування осердя до стану насичення.

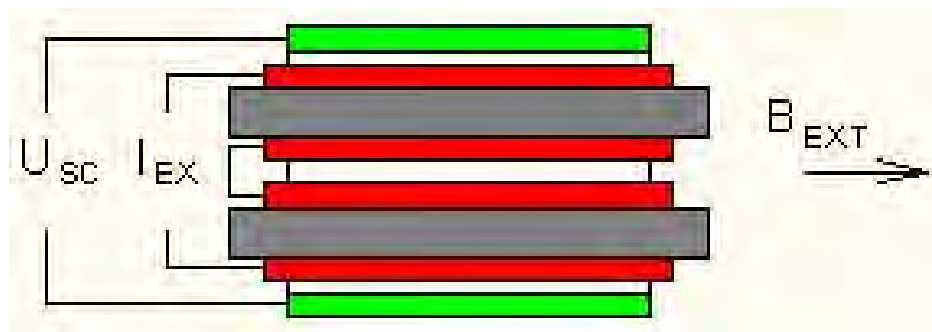


Рис. 1.9 – Схематичне зображення диференціального ферозонду з повздовжнім збудженням

За відсутності досліджуваного поля ($H_x=0$) поле H_{\sim} діє на кожне з осердь, але ЕРС на виході вимірювальної обмотки дорівнює нулю через зворотні включення. За наявності досліджуваного поля ($H_x \neq 0$) на осердя феромагнітного зонда діють магнітні поля напруженістю $(H_{\sim} - H_x)$ і $(H_{\sim} + H_x)$. Через дещо різну напруженість магнітного поля сердечників на виході вимірювальної обмотки індукується ЕРС пропорційна H_x (тобто пропорційна поздовжній складовій вимірюваного магнітного поля).

1.7 Огляд існуючих ферозондових вимірювачів магнітного поля

Один із найбільш поширених ферозондових магнітометрів для залишкового магнітного поля феромагнітних виробів в Україні є модель **МФ-24ФМ** (Рис. 1.10). Прилад призначений для вимірювання залишкового магнітного поля феромагнітних виробів. Даний магнітометр є незамінним засобом контролю якості розмагнічування виробів під час зварювальних робіт з використанням електронної та електродугової зварки, а також після проведення магнітного неруйнівного контролю.



Рис. 1.10 - МФ-24ФМ

Основні характеристики приладу:

Діапазон виміру - ± 2000 мкТл;

Похибка вимірювання - 5%;

Тип перетворювача - ферозонд градієнтнометричний;

Живлення - 2 бат. АА;

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Арку

33

Діапазон робочих температур, 0...+40 град.

Ще один поширений вимірювач магнітного поля це **МФ-1** (Рис. 1.11). Даний прилад оснащений датчиком Холла для вимірювання магнітної індукції у таких одиницях вимірювання як Гауси, Тесла або Ампер/метр. За допомогою нього можна вимірювати постійні магнітні поля.



Рис. 1.11- МФ-1

Основні характеристики приладу:

Дискретність відліку на цифровому індикаторі:

- Гаус, Ампер / сантиметр - 0,1;
- Мілі Тесла - 0,01;

Час встановлення показань - не більше 1 с;

Живлення від двох Ni-Mh акумуляторних батарей типу АА по 1,2 В;

Одиниці виміру - Гс, мТл, А/см;

Технічні характеристики перетворювачів Холла наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики перетворювачів Холла приладу МФ-1

Тип перетворювача Холла	Діапазон вимірювань	Похибка вимірів
ПХ-100	±100 Гс	±0,1 Гс
ПХ-1000	±1000 Гс	±0,5 Гс
ПХ-3000	±300 Гс	±1 Гс

Висновок до розділу

В аналітичному огляді ми детально оглянули фізико-технічні характеристики феромагнітних матеріалів. Визначили для яких характеристик магнітного поля можна використати прилад Також ми оглянули причини, за яких виникає залишкове магнітне поле та які проблеми це може викликати.

Ще теоритично дослідили методи вимірювання залишкового магнітного поля та обрано варіант, що більш за все підходить – магнітометр побудований на базі диференціального ферозонду з повздовжнім збудженням.

І в кінці були розглянуті декілька існуючих ферозондових вимірювачів магнітного поля, щоб було зрозуміло на які діапазони вимірювання потрібно рівнятися та що можна покращити.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						35
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок диференціального ферозонду з повздовжнім збудженням

Оберемо:

Форма осердя – циліндр;

Діаметр осердя – $d = 0,1 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;

Чутливість ферозонду – $S = 100 \text{ мкВм/А}$;

Діапазон вимірювання – $H = (10,1000) \text{ А/м}$;

Похибка вимірювання – 2,5 %;

2.1.1 Вибір матеріалу осердь та їх геометричних розмірів.

Довжина осердя – $l = (80 \dots 100)d = 100d = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$.

Матеріал осердя – 79НМУ.

Площа поперечного перерізу осердя:

$$S_0 = \pi R^2 = \pi \cdot 0,00005^2 = 7,85 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2. \quad (2.1)$$

2.1.2 Вибір частот струму збудження.

Частота струму збудження: $f \leq (4 \dots 16)d^{-2}$

$$f \leq 16 \cdot d^{-2} \rightarrow f \leq 16 \cdot 0,1^{-2} = 1600 \text{ Гц}. \quad (2.2)$$

Частота по другій гармоніці: $f_2 = 3200 \text{ Гц}$.

2.1.3 Розрахунок вимірювальної котушки.

Розрахунок аксіальної довжини вимірювальної котушки:

$$l_2 = 0.5 \cdot l = 5 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнти, що залежать від форми осердя:

$k = 2,4$;

$c = 0,8$.

Магнітні властивості холоднокатаної стрічки з найвищою магнітною проникністю у слабких магнітних полях:

$$\mu_{dmax}^* = 525000.$$

$$\mu_{max}^* = 150000.$$

$$\mu_n^* = 22000.$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

$$H_c = 1.2 \text{ А/м.}$$

$$B_s = 0.073 \text{ Тл.}$$

Вибір співвідношення H_m/H_s та розрахунок та розрахунок амплітудного значення магнітного поля А:

$$\frac{H_s}{H_m} = \frac{1}{3}; \quad (2.4)$$

$$A = \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2} \in [0,19 \dots 0,314] \quad (2.5)$$

Допустимо, що вимірювальна обмотка буде розташована на осердях симетрично відносно їх центрального поперечного перерізу. В такому випадку коефіцієнт розмагнічування осердь N можна буде розрахувати за формулою:

$$N = d^2 \frac{\ln \frac{kl}{2d} - 1}{l^2 - \frac{c}{3} l^2} = 0,0001^2 \frac{\ln \frac{2,4 \cdot 0,01}{2 \cdot 0,0001} - 1}{(0,01)^2 - \frac{0,8}{3} (0,005)^2} = 0,0004; \quad (2.6)$$

Визначення відносної магнітної проникності осердь :

$$\mu_T^* \approx \frac{1}{N} \approx \frac{1}{0,0004} \approx 2500; \quad (2.8)$$

Перевірка умови $N \cdot \mu_{max}^* \gg 1$:

$$0,0004 \cdot 525000 = 210 \gg 1 - \text{умова виконується.}$$

Середній діаметр вимірювальної обмотки:

$$d_{2cp} = a + d + (2 \div 3) = 2 + 0,1 + 3 = 5,1 \text{ (мм)} = 0,0031 \text{ м}; \quad (2.9)$$

Розрахунок параметру V:

$$V = 2d \left(\ln \frac{kl}{2d} - 1 \right) = 2 \cdot 0,0001 \left(\ln \frac{2,4 \cdot 0,01}{2 \cdot 0,0001} - 1 \right) = 0,00076 \text{ м}; \quad (2.10)$$

Відстань між серединами осердь обираємо з рекомендованого співвідношення:

$$L = \frac{1}{5} = \frac{0,01}{5} = 0,002 \text{ м}; \quad (2.11)$$

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		37

Розрахунок коефіцієнту, який залежить від відстані між осердями:

$$\varepsilon_1 = \frac{2-e^{\frac{L}{V}}}{2} = \frac{2-e^{\frac{0,002}{0,00076}}}{2} = 0,964; \quad (2.12)$$

Визначення коефіцієнту, що залежить від середнього діаметру вимірювальної обмотки:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{1,5 \cdot \left(\frac{d_{2cp}}{1}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1,5 \cdot \left(\frac{0,0051}{0,01}\right)^2 + 1}} = 0,935; \quad (2.13)$$

Коефіцієнт, який визначається шунтуючою дією осердь:

Коефіцієнту ε_3 прирівнюється до "1" якщо у ферозондах всі деталі крім осердь, виготовляються з непровідних (діелектричних) і немагнітних матеріалів.

$$\varepsilon_3 = 1;$$

Безрозмірний коефіцієнт ε , який залежить від конструктивних параметрів ферозонда:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 = 0,964 \cdot 0,935 \cdot 1 = 0,901; \quad (2.14)$$

Число витків вимірювальної обмотки:

$$W_2 = \frac{S_2}{32f_2 S_0 \varepsilon \mu_r^* \mu_0 \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}} = \quad (2.15)$$

$$= \frac{100 \cdot 10^{-6}}{32 \cdot 3200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-9} \cdot 0,901 \cdot 2500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{3} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2}} = 140;$$

100 < W2 < 500 – Умова виконується.

Індуктивний опір котушки:

$$X_2 = \frac{8f_2 W_2^2 S_0 \mu_0 \mu_r^* \varepsilon_1}{l_2} \sqrt{2\pi \arcsin \frac{H_s}{H_m}} = \quad (2.16)$$

$$= \frac{8 \cdot 3200 \cdot 140^2 \cdot 7,85 \cdot 10^{-9} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2500 \cdot 0,964}{0,005} \sqrt{2\pi \cdot \arcsin \frac{1}{3}} = 3,49 \text{ Ом};$$

Діаметр мідного дроту

$$d_2 = 0,1 \text{ мм} = 0,0001 \text{ м}; \quad (2.17)$$

Значення активної складової опору котушки:

$$R_2 = \frac{4\rho d_{2cp} W_2}{d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0031 \cdot 140}{0,0001^2} = 3,038 \text{ Ом}; \quad (2.18)$$

Модуль комплексного опору котушки (по другій гармоніці):

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{3,038^2 + 3,49^2} = 4,63 \text{ Ом}; \quad (2.19)$$

2.1.4 Розрахунок збуджуючої котушки.

Розрахунок показників H_m та H_s :

$$H_s = \frac{B_s}{\mu_r^* \mu_0} = \frac{0,073}{2500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 23,24 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad (2.20)$$

$$H_m = 3H_s = 3 \cdot 23,24 = 69,72 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad (2.21)$$

Кількість витків обмотки збудження на одному осерді:

$$W'_1 = 300;$$

Аксіальна довжина збуджуючої котушки:

$$l_1 = l = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м};$$

Діаметр дроту :

$$d_1 = 0,1 \text{ мм} = 0,0001 \text{ м};$$

Ефективне значення струму:

$$I_{\text{еф}} = \frac{H_m l_1}{\sqrt{2} W'_1} = \frac{69,72 \cdot 0,01}{\sqrt{2} \cdot 300} = 0,0016 \text{ А} = 1,6 \text{ мА}; \quad (2.22)$$

Індуктивна складова опору збуджуючої котушки:

$$X_1 = \frac{4f_2 W_1^2 S_0 \varepsilon \mu_r^* \mu_0}{l} \sqrt{2\pi \arcsin \frac{H_s}{H_m}} = \quad (2.23)$$
$$\frac{4 \cdot 3200 \cdot 300^2 \cdot 7,85 \cdot 10^{-9} \cdot 0,901 \cdot 2500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{0,01} \sqrt{2\pi \cdot \arcsin \frac{1}{3}} = 3,74 \text{ Ом};$$

Середній діаметр збуджуючої котушки:

$$d_{1\text{ср}} = d + 1,5 = 0,1 + 1,5 = 1,6 \text{ мм} = 0,0016 \text{ м}; \quad (2.24)$$

Активна складова опору збуджуючої котушки:

$$R_1 = \frac{4\rho d_{1\text{ср}} W_1}{d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0016 \cdot 300}{0,0001^2} = 3,36 \text{ Ом}; \quad (2.25)$$

Модуль комплексного опору збуджуючої котушки:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{3,36^2 + 3,74^2} = 5,03 \text{ Ом}; \quad (2.26)$$

Ефективне значення робочої напруги на котушці збудження:

$$U_{\text{еф}} = Z_1 I_{\text{еф}} = 5,03 \cdot 0,0016 = 0,008 \text{ В} = 8 \text{ мВ}; \quad (2.27)$$

Повна, активна та реактивна потужності, що витрачаються на збудження ферозонду дорівнюють відповідно:

$$S = U_{\text{еф}} I_{\text{еф}} = 0,008 \cdot 0,0016 = 0,0000128 \text{ Вт} = 12,8 \text{ мкВт}; \quad (2.28)$$

$$P = R_1 I_{\text{еф}}^2 = 3,36 \cdot 0,0016^2 = 0,0000086 \text{ Вт} = 8,6 \text{ мкВт}; \quad (2.29)$$

$$Q = X_1 I_{\text{еф}}^2 = 3,74 \cdot 0,0016^2 = 0,0000096 \text{ Вт} = 9,6 \text{ мкВт}; \quad (2.30)$$

2.1.5 Розрахунок граничного струму збудження (намагнічування)

Активний опір котушки :

$$R = \frac{4\rho W_1 D_{\text{ср}}}{d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,0001^2} = 2,1 \text{ Ом}; \quad (2.31)$$

Граничне значення струму збудження:

$$I_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{\lambda S_{\text{ох}}[\theta]_{\text{д}}}{R}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot 2}{2,1}} = 0,0214 \text{ А} = 21,4 \text{ мА}; \quad (2.32)$$

Значення робочого струму рекомендується обирати дещо нижче, тому:

$$I = (0,85 \div 0,9) I_{\text{гр}} = 0,9 \cdot 0,0214 = 0,01926 \text{ А} = 19,26 \text{ мА}; \quad (2.33)$$

Висновок до розділу

Були розраховані геометричні та фізичні характеристики ферозондового перетворювача. Обрано матеріал осердя, підібрано діаметр дроту збуджувальної та вимірювальної обмотки. Розраховано граничний струм струму збудження.

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

3.1 Структурна схема

Для контролю залишкового магнітного поля феромагнітних виробів буде використано ферозондовий метод, для якого спроектовано структурну схему(рис. 3.1)

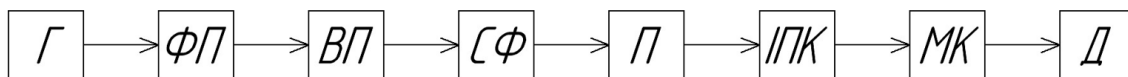


Рис. 3.1 – Структурна схема приладу

На схемі показані блоки, де Г – генератор зондуючих імпульсів, ФП – ферозондовий перетворювач, ВП – вимірювальний підсилювач, СФ – смуговий фільтр, П - повторювач, ИПК – інвертуючий підсилювач зі змінним коефіцієнтом, МК – мікроконтролер, Д – дисплей.

Генератор генерує гармонійний струм, що потрапляє на ферозондовий перетворювач, де протікає через збуджувальні котушки. Далі ЕРС, що виникла у вимірювальній котушці, внаслідок перенасичення осердя, потрапляє на вимірювальний підсилювач, який підсилює сигнал та перенаправляє його на смуговий фільтр для фільтрації. Повторювач узгоджує вихідний опір однієї частини схеми з входним опором другої. Інвертуючий підсилювач зі змінним коефіцієнтом підсилює сигнал для певних піддіапазонів вимірювання напруженості магнітного поля. Після цього сигнал надходить на мікроконтролер, за допомогою якого ми виводимо дані на дисплей.

3.2 Функціональна схема

На основі структурної схеми була розроблена функціональна схема (рис. 3.2).

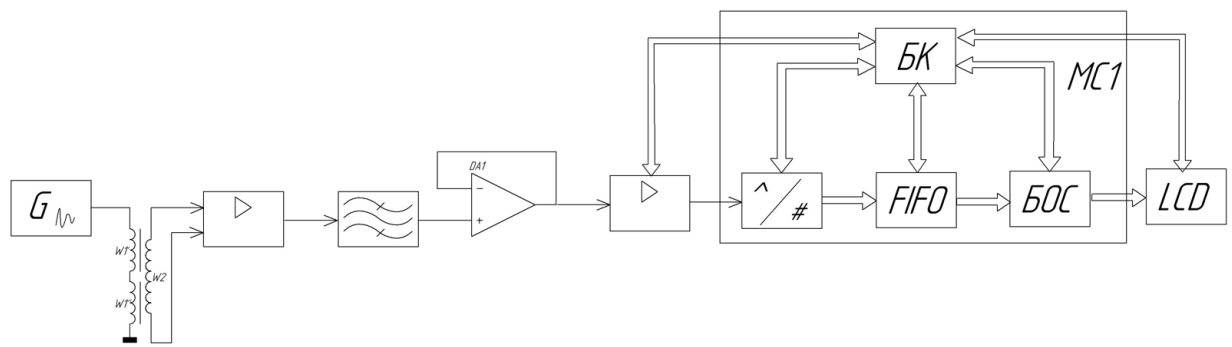


Рис. 3.2 – Функціональна схема приладу

Генератор (G) генерує сигнал гармонійного струму, який потрапляє на збуджуючі котушки W1' та W1''. Під час проходження через них струму виникає магнітне потік, яке перенасичує пермалоеві осердя. Вони в свою чергу викликають ЕРС в вимірювальній котушці W2. Далі сигнал переходить на вимірювальний підсилювач (ВП), який забезпечує роботу ферозонда у режимі близькому до режиму холостого ходу, завдяки чому на виході блоку ми отримуємо значення вносимої напруги. Також вимірювальний підсилювач узгоджує струм з електричною схемою та підсилює сигнал на потрібний коефіцієнт підсилення. Смуговий фільтр СФ виділяє корисну другу гармоніку 2ω вихідного сигналу ферозонда та пригнічувати всі інші. Повторювач це своєрідний підсилювач, який має високий вхідний опір, низький вихідний опір, коефіцієнт посилення єдності. Він узгоджує вихідний опір однієї частини схеми з вхідним опором другої. ППК дозволяє вимірювати напругу у значних динамічних діапазонах, контролюючи їх зміною коефіцієнта підсилення. Змінний коефіцієнт контролюється за допомогою цифрових сигналів мікроконтролера. Наступним кроком сигнал потрапляє на мікроконтролер, який містить вбудований АЦП та пам'ять, блок обробки сигналів. Все це керується за допомогою блоку контролю. Він оцифровується та накопичується в пам'яті та оброблюється блоком обробки сигналів і далі через 4 порти мікросхеми іде на рідкокристалічний дисплей.

Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Арку

42

3.3 Розрахунок коефіцієнтів підсилення

На виході розроблюваного приладу електрична напруга має бути рівна 10 В. Розрахуємо напругу, яка буде на виході ферозонду перемноживши чутливість ферозонду на діапазон його вимірювання:

$$U = S \cdot H ; \quad (3.2)$$

$$U_1 = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1 \text{ мВ};$$

$$U_2 = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 100 \text{ мВ};$$

Тоді загальний коефіцієнт підсилення блоків буде рівний:

$$K_{\text{заг}} = 10\text{В}/100\text{мВ} = 100;$$

Розподілемо коефіцієнти підсилення між блоками

Коефіцієнт вимірювального підсилювача:

$$K_{\text{ВП}} = 10;$$

Коефіцієнт смугового фільтру:

$$K_{\text{СФ}} = 5;$$

Коефіцієнт повторювача:

$$K_{\text{П}} = 1;$$

Коефіцієнт інвертуючого підсилювача зі змінним коефіцієнтом :

$$K_{\text{ІП}} = 1;$$

3.4 Розрахунок та підбір елементів електричної принципової схеми

3.4.1 Розрахунок вимірювального підсилювача

Вимірювальний підсилювач - це різновид диференціального підсилювача з додатковими вхідними буферними каскадами. Вони дозволяють легко зіставити (узгодження імпедансу) підсилювача з попереднім каскадом. Переваги підсилювача: малий температурний дрейф, малий внесок власного шуму в сигнал, можливе досягнення значного коефіцієнта підсилення та регулювання коефіцієнта підсилення за рахунок одного резистора. Ці прилади зазвичай використовуються в

промислових випробуваннях і вимірюваннях. Схема підсилювача зображена на рисунку 3.3.

На вимірювальний підсилювач ми розподілили коефіцієнт підсилення 10. Для цього потрібно підібрати номінали резисторів такими, щоб результат формули дорівнював коефіцієнту підсилення.

$$K_{\text{п}} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_2}\right) \cdot \frac{R_6}{R_4}; \quad (3.1)$$

Номінали резисторів обираємо $R_1 = R_3 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_4 = R_5 = 1 \text{ кОм}$, $R_6 = R_7 = 2 \text{ кОм}$.

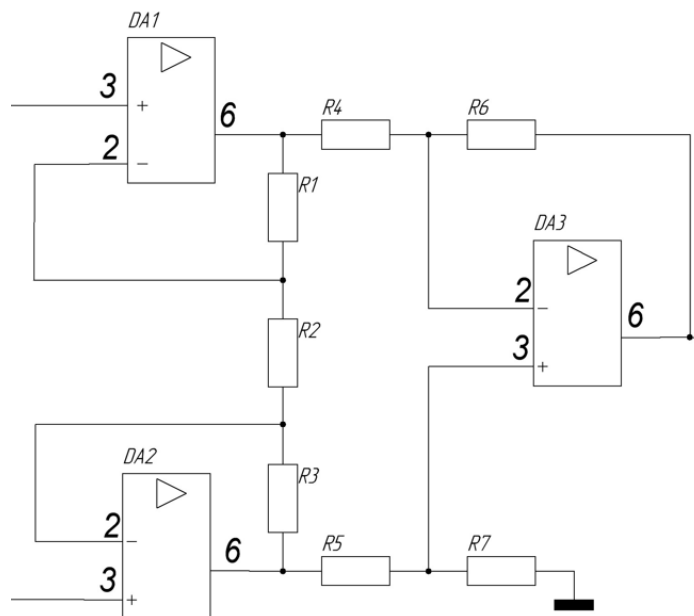


Рис. 3.3 – Вимірювальний підсилювач

3.4.2 Розрахунок смугового фільтру

Смуговий фільтр - це пристрій, який пропускає частоти в певному діапазоні і відкидає (загасає) частоти за межами цього діапазону. Схема фільтру зображена на рисунку 3.4

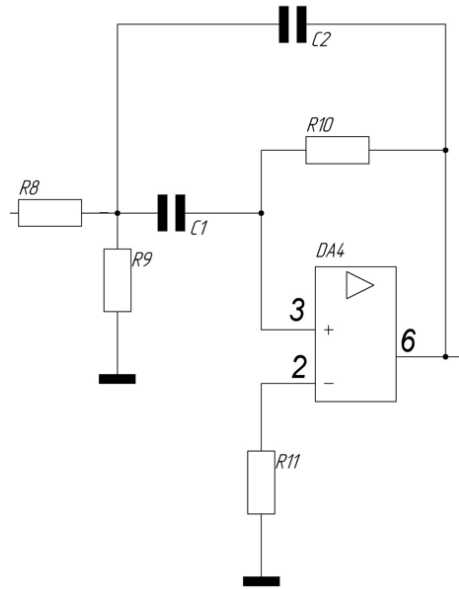


Рис. 3.4 – Смуговий фільтр

Встановимо діапазон пропускання:

$$f_1 = 2200 \text{ Гц};$$

$$f_2 = 4655 \text{ Гц};$$

Визначимо резонансну частоту:

$$f_0 = \sqrt{f_1 * f_2} = 3200 \text{ Гц}; \quad (3.3)$$

Підрахуємо добротність:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = 1,3; \quad (3.4)$$

Конденсатори $C = C_1 = C_2 = 10 \text{ нФ}$;

Розрахуємо опори резисторів:

$$R_8 = \frac{Q}{2\pi * f_0 * C * K_{CF}} = 1,3 \text{ кОм}; \quad (3.5)$$

Використаємо номінал $1,3 \text{ кОм} \pm 5\%$.

$$R_9 = \frac{Q}{2\pi * f_0 * C * (2 * Q^2 - K_{CF})} = 797 \text{ Ом}; \quad (3.6)$$

Використаємо номінал $820 \text{ Ом} \pm 5\%$.

$$R_{10} = R_{11} = \frac{2 * Q}{2\pi * f_0 * C} = 12,93 \text{ кОм}; \quad (3.7)$$

Використаємо номінал $13 \text{ кОм} \pm 5\%$.

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата

3.4.3 Вибір мікросхеми підсилювача зі змінним коефіцієнтом

Діапазон вимірювання можна розділити на 2 піддіапазони:

- 1) 10 – 100 мкВм/А;
- 2) 100 – 1000 мкВм/А;

Коефіцієнт підсилення для I піддіапазону 10А/м-100А/м:

$$K_{II} = 1000/100 = 10$$

Коефіцієнт підсилення для II піддіапазону 100А/м-1000А/м:

$$K_{II} = 1000/1000 = 1$$

Отже, наш підсилювач має забезпечувати коефіцієнт підсилення або рівний 10 або 1. Для вирішення цієї задачі нам чудово підійде мікросхема AD8253.

AD8253 – це вимірювальний підсилювач зі змінним цифровим програмованим коефіцієнтом підсилення. Він має великий вхідний імпеданс, низький рівень вихідного шуму і мале спотворення сигналу, що робить його придатним для взаємодії з аналогово-цифровими перетворювачами, що мають високу частоту дискретизації. Ця мікросхема виготовлена за запатентованою технологією іCMOS компанії Analog Devices, яка забезпечує прецизійну лінійну продуктивність. Паралельний інтерфейс дозволяє користувачам в цифровому вигляді програмувати коефіцієнти підсилення 1, 10, 100 та 1000. Регулювання підсилення виконується за допомогою перемикання резисторів у внутрішній матриці. Розміщення пінів зображено на рисунку 3.5 та описано у таблиці 3.1.

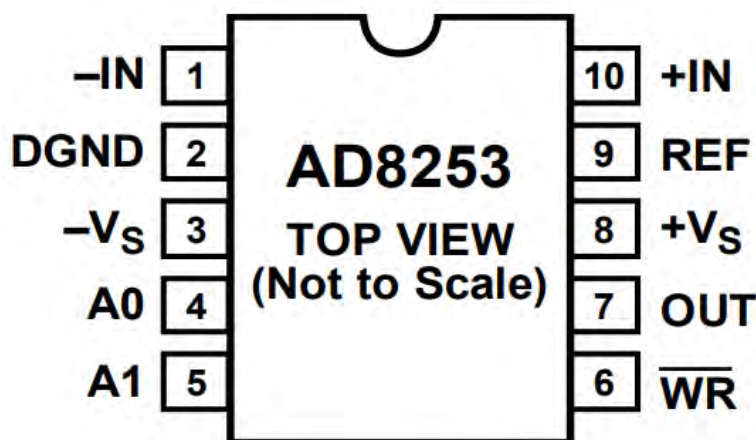


Рис. 3.5- AD8253

Таблиця 3.1 – Опис пінів AD8253

Номер піву	Позначення	Призначення
1	-IN	Інвертуючий вхід. Істинний диференціальний вхід
2	DGND	Цифрова земля
3	-Vs	Пін від'ємного живлення
4	A0	Пін налаштування живлення
5	A1	Пін налаштування живлення
6	\overline{WR}	Перемикання алгоритму підсилення
7	OUT	Вихід
8	+Vs	Пін додатнього живлення
9	REF	Пін опорної напруги
10	+IN	Неінвертуючий вхід. Істинний диференціальний вхід

Логічні рівні навантаження пінів A0 та A1 для режиму підсилення наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Логічні рівні навантаження

\overline{WR}	A1	A0	Коефіцієнт підсилення
-Vs	-	-	1
-Vs	-	+	10
-Vs	+	-	100
-Vs	+	+	1000

3.4.4 Вибір операційного підсилювача

AD9631 – це високошвидкісний широкосмуговий підсилювач. Завдяки використанню структури зворотного зв'язку по напрузі, експоненційна стабілізація часу, смуга пропускання і низький рівень спотворень AD9631 відповідають вимогам багатьох приладів, які раніше покладалися на підсилювачі зворотного зв'язку

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ

Арку

47

по струму. Побудований на класичній структурі операційного підсилювача дозволяє бути впевненим у його роботі і спрогнозувати результат на виході. Розміщення пінів зображено на рисунку 3.6

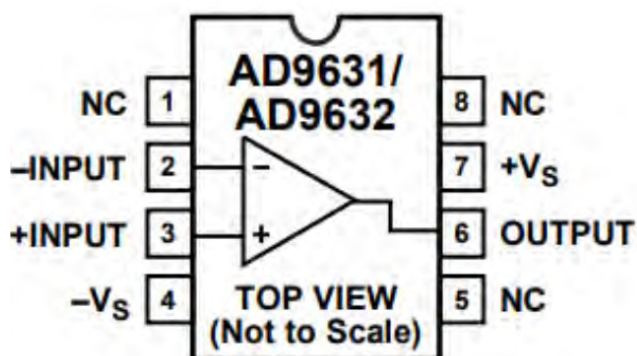


Рис. 3.6 - AD9631

3.4.5 Вибір мікроконтролера

Оскільки мікроконтролер має містити аналогово-цифровий перетворювач то нам потрібно розрахувати його основні характеристики.

Частота дискретизації є однією з основних характеристик АЦП. Частоту дискретизації f_d можна визначити виходячи із теореми Котельникова-Найквіста

$$f_d > 2 \cdot f_v; \quad (3.8)$$

Частота дискретизації визначається виходячи з f_v , де f_v – верхня частота обмеженого спектра вхідного сигналу. Збільшення частоти дискретизацій в 2 рази від верхньої частоти не завжди відтворює необхідну інформацію вірно, тому для підвищення точності відцифрованого сигналу збільшуємо частоту дискретизації в 3 рази.

Хоча і в нашому приладі найбільш інформативна 2 гармоніка, але найвищою більш менш чіткою гармонікою буде 5 гармоніка, подальші гармоніки вже не будуть такими інформативними. За вище згадану теоремою Котельникова-Найквіста частота 5 гармоніки буде рівна $f_5 = f_1 \cdot 5 = 1600 \cdot 5 = 8000$ Гц.

Враховуючи все вище сказане, отримуємо частоту дискретизації:

$$f_d > 3 \cdot f_v = 3 \cdot 8000 = 24000 \text{ Гц}; \quad (3.9)$$

Тоді час періоду дискретизації:

$$t_d = \frac{1}{24000} = 41 \text{ мкс}; \quad (3.10)$$

Розрахуємо необхідну розрядність нашого АЦП.

$$n = \log_2 \frac{100}{0,025} = 11,96 \text{ біт} \quad (3.11)$$

Округлюємо в більшу сторону до 12 біт.

В ролі плати обробки інформації було обрано набираючий популярності мікроконтролер STM32F411CEU6 (3.7). Дана плата містить пам'ять типу FIFO та АЦП з більшою частотою дискретизації. Також на даній платі встановлено більш нове ядро Cortex-M4F, частота якого сягає 100 МГц. Значною перевагою є наявність різновиду USB – USB Type-C, який набуває поширення серед розробників портативних девайсів

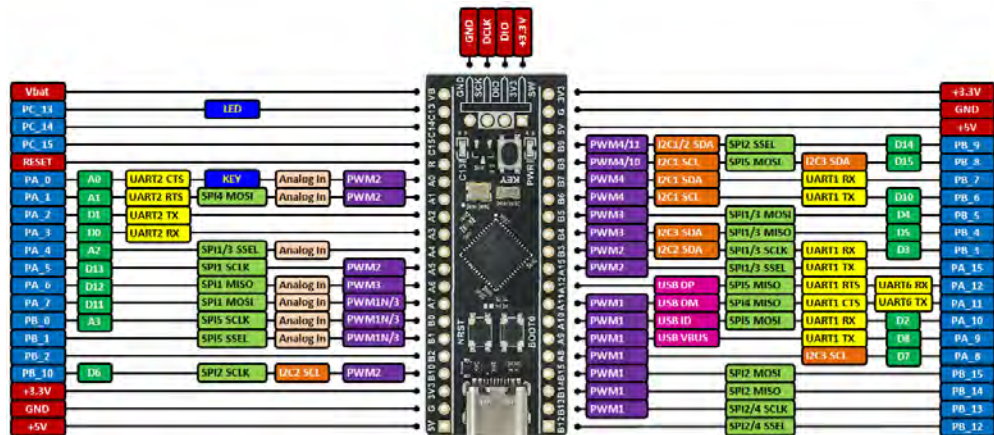


Рис. 3.7 - Виводи плати на базі мікроконтролера STM32F411CEU6

Розглянемо характеристики плати у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Характеристики плати мікроконтролера STM32F411CEU6

Розрядність мікропроцесора	32 біти
Максимальна частота	100 МГц
Flash-пам'ять	512 кБ
Оперативна пам'ять	128 кБ
Кількість виводів	36
Кількість таймерів	11
Кількість інтерфейсів UART	3 (2x12.5 Мбіт/с, 1x6.25 Мбіт/с)
Кількість інтерфейсів SPI	5 (50 Мбіт/с)
Кількість інтерфейсів I2C	3

Кількість інтерфейсів USB	1
АЦП	1 АЦП на 16 каналів
Розрядність АЦП	12 біт
Час перетворення АЦП	1 мкс

3.4.6 Вибір дисплею

Для виводу результатів вимірювань який систематизував мікроконтролер оберемо дисплей WH1604A від фірми Winstar.

Основні характеристики дисплею:

Характеристики дисплея:

- 16 символний x 4 лінія
- 5x8 точок (включаючи курсор)
- Вбудований контролер
- 5 В живлення

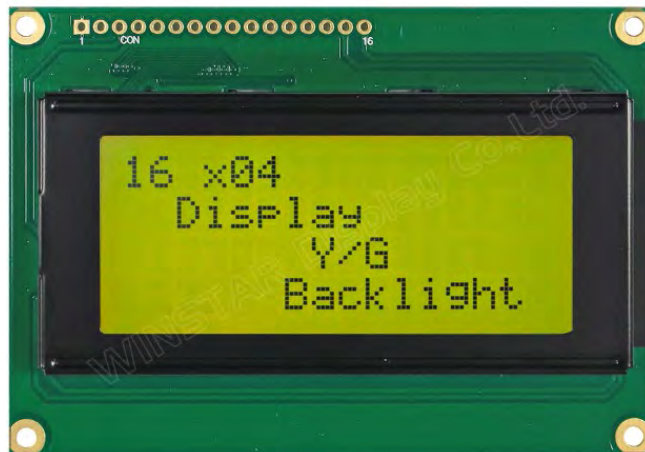


Рис. 3.8 - WH1604A

Висновок до розділу

Було розроблено структурну та функціональну схеми з описом принципу роботи самого приладу. Також був розрахований загальний коефіцієнт підсилення та кожного з блоків окремо. Також були розраховані та підібрані всі компоненти схеми електричної принципової.

ВИСНОВОК

У рамках теоретичної частини дипломної роботи було проведено дослідження і розробку вимірювача залишкового магнітного поля ферромагнітних виробів на базі диференціального феррозонду з поздовжнім збудженням. Отримані результати та аналіз свідчать про ефективність та переваги запропонованого вимірювача в контексті вимірювання залишкового магнітного поля.

Застосування диференціального феррозонду з поздовжнім збудженням дозволяє досягти точних та надійних вимірювань залишкового магнітного поля ферромагнітних виробів. Цей підхід забезпечує лінійну та стабільну відповідь феррозонду на магнітне поле, покращуючи якість вимірювань та усуваючи можливі спотворення. Також слід зазначити, що вимірювач виявляє низьку чутливість до зовнішніх впливів, таких як температурні зміни та вібрації, що забезпечує його надійність та стабільність роботи в різних умовах.

Отримані результати підтверджують високу чутливість, точність та стабільність вимірювача залишкового магнітного поля з диференціальним феррозондом з поздовжнім збудженням. Цей вимірювач може знайти широке застосування у промисловості та наукових дослідженнях для вимірювання та контролю магнітних властивостей ферромагнітних матеріалів та виробів. Він є важливим інструментом для забезпечення високої якості продукції та виконання різноманітних дослідницьких завдань, пов'язаних з магнітними вимірюваннями.

Таким чином, розроблений вимірювач залишкового магнітного поля на базі диференціального феррозонду з поздовжнім збудженням представляє собою важливий крок у розвитку сучасних методів вимірювання магнітних полів. Його переваги включають високу чутливість, точність, стабільність та надійність в різних умовах експлуатації. Даний вимірювач може стати цінним інструментом для дослідників, інженерів та виробників, які працюють з ферромагнітними матеріалами, дозволяючи їм здійснювати точні вимірювання та контроль магнітних властивостей з високою ефективністю і надійністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1]. Korepanov, V.; Marusenkov, A. Flux-gate magnetometers design peculiarities. Sur. Geophys. 2012, 33, 1059–1079.

[2]. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика й магнетизм.- К: Техніка, 2001.

[3]. Berkman R. Theoretic and experimental investigation of flux-gate magnetometer noise; Proc. of IMEKO XV World Congress. Osaka, Japan. June 13–18, 1999; 149–156

[4]. Куц, Ю. В. Новітні системи та технології. Частина І. Загальні питання побудови та опрацювання даних в комп'ютерно-інтегрованих системах НКТД [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,59 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с. – Назва з екрана.

[5]. Berkman R., Korepanov V., Bondaruk V. Proceedings of XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland. 1997; 121–126.

[6]. Куц, Ю. В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с. – Назва з екрана.

[7]. Korepanov V., Berkman R. Digital flux-gate magnetometer structural analysis. Measurement Science and Technology. 1999. Vol. 10. P. 734.

[8]. Куц Ю.В. Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко – К: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						52
Зм.	Аркуш	№ док.м.	Підпис	Дата		

[9.]Using The Pulsed Eddy Current Techniques For Monitoring The Aircraft Structure Condition / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, A. Protasov, V. Petryk, A. Alexiev // Transactions on Aerospace Research. - Institute of Aviation : Poland, 2023. - Vol. 1 (270). - P. 22-31

[10]. Korepanov V., Marusenkov A. Abstracts Booklet of International Conference on Magnetism, Geomagnetism and Biomagnetism. 2008. P. 7-8.

[11]. Faulkenberry L. M. An introduction to operational amplifiers with linear ic applications. 2nd ed. New York : John Wiley and Sons, 1982. 530 p.

[12]. Kuts, Y. Methodology for Measuring Phase Shifts of Signals Using Discrete Hilbert Transform / Y. Kuts, O. Kochan, I. Lysenko, R. Humilovych // 2021 13th International Conference on Measurement. Conf. proc. – Smolenice, Slovakia. – 2021. – pp.18 – 21.

[13]. 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.

[14]. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: навчальний посібник / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 330 с.

[15]. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.

[16]. I. Lysenko, V. Uchanin, V. Petryk, Y. Kuts, A. Protasov and A. Alexiev, "Intelligent Automated Eddy Current System for Monitoring the Aircraft Structure Condition," 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1-5.

[17]. Застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумовій дефектокопії / М. О. Редька, Ю. В. Куц, Є. В. Шаповалов, В. М. Учанін, Ю. Ю. Лисенко, О. Д. Близнюк // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. – 2022. – №1. – С. 45-53.

					<i>ДПБ.ПК-91.10.1760.08.000 ПЗ</i>	Арку
						53
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		